



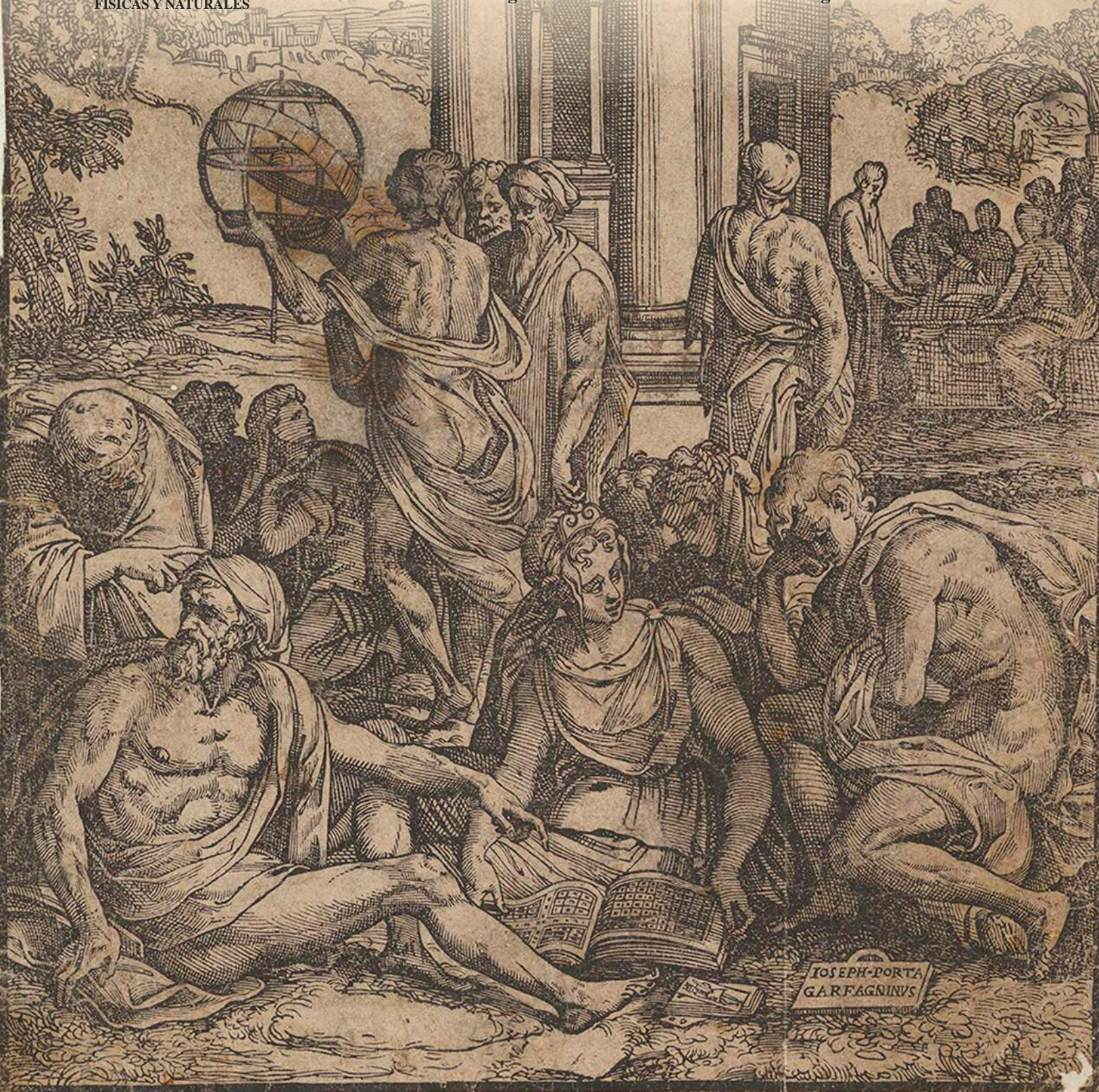
ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

85
Años
1936 - 2021

REVISTA DE LA ACADEMIA COLOMBIANA de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

ACADEMIA COLOMBIANA
DE CIENCIAS EXACTAS,
FÍSICAS Y NATURALES

Vol. 46 • Número 179 • Págs. 305- 610 • Abril - Junio de 2022 • Bogotá - Colombia





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. 46 • Número 179 • Págs. 305-610 • Abril - Junio de 2022 • Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editora

- Elizabeth Castañeda, Ph. D.
editor@accefyn.org.co
Instituto Nacional de Salud,
Bogotá, Colombia

Asistente editorial Carolina Acosta

Grupo de apoyo Marta Renza, correctora de estilo
Johanna Morales, diagramadora
Bibiana Dimate, Publindex

Editores asociados

Ciencias Biomédicas

- Luis Fernando García, M.D., M. Sc.
Profesor emérito, Universidad de Antioquia,
Medellín, 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
- Gloria Patricia Cardona Gómez, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- Helena Groot de Restrepo, M.Sc.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Ciencias del Comportamiento

- Guillermo Páramo, M.Sc.
Universidad Central, 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

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 Guillermo González, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia
- 15 Carlos Duque, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, 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 Clara Inés Orozco, Ph. D.
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

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
- 15 Ligia Sierra García, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- 15 Luz Marina Jaramillo Gómez, Ph. D.
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Ciencias de la tierra

- 15 Carlos Alberto Vargas, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 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 Ligia Estela Urrego, Ph. D.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- 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

Matemáticas

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

Comité científico internacional

- ⑩ Carlos Jiménez, Ph. D.
Universidad de La Coruña, España
- ⑩ Wolfgang Gieren, Ph. D.
Universidad de Concepción, Chile
- ⑩ Alfonso Castro, Ph. D.
Harvey Mudd College, Claremont, CA, EEUU
- ⑩ Rodolfo Castillo, Ph. D.
Fort Lauderdale, Florida, EEUU
- ⑩ José Rubens Pirani Ph. D.
Universidade de São Paulo, Brazil
- ⑩ Federico Ardila, Ph. D.
San Francisco State University, San Francisco, CA, EEUU
- Juan Alfredo Tirao, Ph. D.
Academia Nacional de Ciencias Córdoba, Argentina
- ⑩ Pedro Romero, Ph. D.
Instituto Ludwig de la Universidad de Lausana en Suiza
- ⑩ Ulrich Paessler, Ph. D.
Academia de Ciencias de Berlín-Brandenburg, RFA
- ⑩ Maria Sagrario Millán, Ph. D.
Universidad Tecnológica de Tarrasa, España
- ⑩ Zbigniew Jaroszewicz
Centro de Fotónica Aplicada, Instituto Tele y Radiotécnico, Instituto Nacional de Telecomunicaciones, Polonia
- ⑩ José Luis Moran López, Dr. rer. nat.
Academia Mexicana de Ciencias, México
- ⑩ Jean-Pierre Galaup
Universidad de París Saclay, Francia
- ⑩ Helena Nader, Ph. D.
Academia Brasileira de Ciencias, Brasil
- ⑩ Roberto JJ Williams, Ph. D.
Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Argentina
- ⑩ Walter Fernández Rojas, Ph. D.
Presidente Academia Nacional de Ciencias, Costa Rica
- ⑩ Alex Held, Ph. D.
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia
- ⑩ Rafael Radi, M.D.
Academia de Ciencias de Uruguay

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Actualidad Iberoamericana
Agris
Dialnet
EBSCO
Historia Mathematica

Index Kewensis
Latindex
Mathematical Reviews
MathSciNet (on line data base)
OCLC (Online Computer Library Center)

PERIODICA
Publindex, Colciencias
SciELO, Colombia
Zentralblatt für Mathematik
Zoological Record

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.



Nuestra portada

Reproducción de la portada del volumen 1, número 1, de la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, publicada en diciembre de 1936.

Título: Frontispicio de Le sorti di Francesco Marcolini da Forli intitolato Giardino di Pensieri (Jardín de pensamientos)

Autor: Giuseppe Salviati (Giuseppe Porta, llamado "Il Salviati"), nacido en Castelnuovo di Garfagnana c.1520 y fallecido en Venecia c. 1575. Fecha: 1540. Dimensiones: 24.3 × 19.8 cm

Fuente: The Metropolitan Museum (The MET) New York, Autorizada su reproducción el 19 de diciembre de 2016 • Fondo: Rogers (1918) • Signatura: 18.17.3-120

URL: <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/366854>



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. 46 • Número 179 • Págs. 305-610 • Abril - Junio de 2022 • Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Ciencias Físicas Physical Sciences

Artículo original

Lógica cuántica: enfoque reticular ortocomplementado modular y tesis de la interpretación parcial

Quantum logic: modular orthocomplemented lattice approach and partial interpretation thesis
Carlos Villacís 311

Artículo original

Resolviendo el problema de valores propios complementarios mediante un algoritmo cuasi-Newton

Solving the eigenvalue complementarity problem using a quasi-Newton algorithm
Favián Arenas, Carlos Arias, Rosana Pérez 325

Original article

Multifunctional nanostructured platform for sequential release of therapeutic molecules

Plataforma multifuncional nanoestructurada para entrega secuencial de moléculas terapéuticas
Edgar E. González-Jiménez 339

Artículo original

Uso de refugios artificiales como estrategia para la conservación de murciélagos

Use of artificial refuges as a strategy for the conservation of bats
Juan Camilo Vieda-Ortega, Yaneth Del Socorro Muñoz-Saba, Marie Joëlle Giraud-López, Jaime Aguirre-Ceballos, Daniel Felipe Chaux-Rojas 356

Artículo original

Veliidae (Hemiptera: Gerromorpha) en el piedemonte andino-pacífico en el suroeste de Colombia

Veliidae (Hemiptera: Gerromorpha) in the Andean-Pacific piedmont in South-West Colombia
Dora Nancy Padilla-Gil 372

Artículo original

Caracterización de la diversidad de aves en un humedal altamente intervenido del Pacífico suramericano

Characterization of bird diversity in a highly impacted wetland in the South American Pacific
Antony Apeño, Héctor Aponte 380

Ciencias Naturales Natural Sciences

Artículo original

Registros notables de mamíferos en una cordillera aislada, amenazada y no protegida en la depresión de Huancabamba, norte de Perú

Noteworthy records of mammals from an isolated, threatened, and unprotected mountain range in the Huancabamba depression, northern Perú

Alexander More, Isai Sánchez, Renzo P. Piana, José Vallejos, Robyn D. Appleton, Javier Vallejos 393

Artículo original

Distribución espacial y temporal de microplásticos flotantes en aguas del Caribe central colombiano

Spatial and temporal distribution of floating microplastics in waters of the Colombian central Caribbean region

Andrés Franco-Herrera, Paula Irene Polanía-Zenner, Carlos David Otálora-Rincón, Paulo César Tigreros-Benavides 406

Artículo original

Nuevos registros y estado del conocimiento de heterobranquios marinos (Mollusca: Gastropoda) en el departamento del Atlántico, Caribe colombiano

New records and status of knowledge of marine heterobranchs (Mollusca: Gastropoda) in the department of Atlántico, Colombian Caribbean

Alexander Carvajal-Florian, Adriana Gracia C 426

Artículo original

Relación histórica de dos pioneros de la biogeografía tropical en la cordillera de los Andes: Alexander von Humboldt y Francisco José de Caldas

Historical account of two pioneers of tropical biogeography in the Andes: Alexander von Humboldt and Francisco José de Caldas

Alberto Gómez-Gutiérrez 438

Artículo original

Peces del complejo lagunar Peregrinos, río Caquetá, municipio de Solano, Caquetá, Colombia

Fishes of the Peregrinos lagoon complex in Caquetá River, municipality of Solano, Caquetá, Colombia

Mónica Sirley Celis-Granada, Lina María Correa-Guarnizo, Alexander Velasquez-Valencia, Diego Ossa-Calderón, Yuliana Chala-Velásquez 460

Artículo original

Variación estacional de abejas euglosinas (Apidae: Euglossini) en el norte de la Orinoquia colombiana

Seasonal variation of Euglossine bees (Apidae: Euglossini) in the North of the Colombian Orinoquia

Néstor Pérez-Buitrago, Laura Johana Mojica-Candela, Juan Carlos Agudelo-Martínez 470

Original article

Upper Pleistocene deposits from the Cauca Valley

Depósitos del Pleistoceno Superior en el Valle del Río Cauca

Carlos Jaramillo, Gheny Krigsfeld Shuster, Carlo D. Rojas, Alexander Henao, Germán Y. Ojeda, Dayenari Caballero, Sebastián Escobar-Florez, Sebastián Gomez, Jaime Escobar 482

Artículo original

El Mapa de Timaná: versión de puño y pluma de Francisco José de Caldas

Francisco José de Caldas' long lost *Timaná Map*

Sergio Andrés Mejía Macía 496

Ciencias de la Tierra

Earth Sciences

Matemáticas

Mathematics

Artículo original

Contenido de nutrientes, acidez y textura del suelo en áreas degradadas por la minería en el Chocó biogeográfico

Nutrient content, acidity, and soil texture in areas degraded by mining in the biogeographic Chocó

Harley Quinto-Mosquera, Gentil Ayala-Vivas, Harry Gutiérrez 514

Artículo original

Estimación y pronóstico de radiación solar en el valle de Aburrá – Colombia

Estimation and forecast of solar radiation in the Aburrá Valley- Colombia

Luisa M. Cano, M. Alejandra Carmona, J. Alejandro Martínez, Paola A. Arias 529

Original article

Análisis matemático de un modelo metapoblacional para la dinámica del dengue

Mathematical analysis of a metapopulation model for dengue dynamics

Aarom Llanos, Heliana Arias 550

Opinión/ Opinion

La necesidad de una comunicación científica liderada por autores e instituciones

The need for scientific communication led by authors and institutions

Gerardo Tibaná Herrera 565

Las grandes manchas de plásticos en los océanos

The big plastic stains in the oceans

Jaime R. Cantera K., Andrés Franco-Herrera 567

Comentario bibliográfico/ Bibliographic commentary

En busca del origen

In search of the origin

Alberto Gómez-Gutiérrez 570

Métodos Matemáticos. Segunda edición extendida

Mathematical methods. Second extended edition

Robert Salazar 574

Club de revistas/Journal Club

El genoma humano: llenando los vacíos

Human genome: filling the gaps

Alberto Gómez-Gutiérrez 577

Reconociendo a las mujeres extraordinarias en la historia de la entomología médica

Acknowledging extraordinary women in the history of medical entomology

Angela Stella Camacho-Beltrán 580

Ranas de cristal

Glassfrogs

Mauricio Rivera-Correa 585

Primera imagen del agujero negro en el centro de nuestra galaxia

First image of the black hole at the center of our galaxy

Bernardo Gómez Moreno 587

In Memoriam

Gabriel Poveda Ramos 590

Alberto Morales Alarcón 594

Carlos Corredor Pereira 596

Enfoque y alcance

Focus and Scope 598

Artículo original

Lógica cuántica: enfoque reticular ortocomplementado modular y tesis de la interpretación parcial

Quantum logic: modular orthocomplemented lattice approach and partial interpretation thesis

Carlos Villacís

Facultad de Filosofía, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España

Resumen

En el presente artículo se propone una concepción de la lógica cuántica como forma de interpretación de la mecánica cuántica. Se establece como hipótesis metodológica la tesis metateórica de la interpretación parcial para realizar una reconstrucción del enfoque reticular ortocomplementado modular con el cual Birkhoff y von Neumann iniciaron el desarrollo de la lógica cuántica. Sobre estas bases se elabora una modelización lógica del cálculo proposicional obtenido en comparación analítica con otras estructuras lógico-algebraicas. Se discuten los resultados a partir de la propiedad distributiva y de la capacidad para retener la propiedad de la modularidad. Por último, se ponen de manifiesto problemas heurísticos y formales con respecto al éxito de la consecución de tal núcleo conceptual.

Palabras clave: Mecánica cuántica; Lógica cuántica; Interpretación parcial; Modularidad; Reticulo.

Abstract

In this article, a conception of quantum logic is proposed as a way of interpreting quantum mechanics. The metatheoretical thesis of partial interpretation is established as a methodological hypothesis to carry out a reconstruction of the modular orthocomplemented lattice approach with which Birkhoff and von Neumann began the development of quantum logic. On these bases, the logical modeling of the propositional calculus obtained is elaborated via an analytical comparison with other logical-algebraic structures. The results are discussed from the distributive property and the ability to retain the property of modularity. Finally, heuristic and formal problems are revealed regarding the success of achieving such a conceptual core.

Keywords: Quantum mechanics; Quantum logic; Partial interpretation; Modularity; Lattice.

Introducción

El objeto de investigación del artículo reside en el modelo original elaborado por **Birkhoff & von Neumann** (1936) que dio inicio al desarrollo de la lógica cuántica y en cuyo marco se aboca el análisis de la estructura conceptual de la lógica cuántica a la luz de su composición semántico-algebraica expresada en el fragmento proposicional de una lógica no clásica.

Es menester hacer dos aclaraciones de carácter propeutéico. En primer lugar la lógica cuántica se ha convertido en un campo de estudio con diversas variantes propias de la evolución de los programas de investigación, circunstancia que obliga a distinguir entre enfoques y modelos. Los primeros hacen referencia a los tipos de sistemas lógicos que se emplean para analizar las nociones lógicas subyacentes a la mecánica cuántica y los segundos aluden a las formas matemáticas concretas dentro de los distintos enfoques. En este sentido, el enfoque original de **Birkhoff & von Neumann** (1936) es el reticular y en su marco defienden un modelo ortocomplementado modular.

Citación: Villacís C. Lógica cuántica: enfoque reticular ortocomplementado modular y tesis de la interpretación parcial. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):311-324, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1625>

Editor: Román Eduardo Castañeda-Sepúlveda

Correspondencia:
Carlos Villacís; cvillaci@ucm.es

Recibido: 4 de febrero de 2022

Aceptado: 18 de abril de 2022

Publicado: 28 de junio de 2022



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

En dicho contexto se analiza aquí la propuesta del modelo ortocomplementado modular del enfoque reticular, que en adelante denominamos “ R_{OM} ”. No se trata esta de la única propuesta, dado que se ha investigado la lógica cuántica a partir de diversos enfoques lógicos, entre los que se destacan el algebraico (**Jordan**, 1932; **Segal**, 1947), el polivalente (**Février**, 1937; **Reichenbach**, 1944) y el axiomático (**Mackey**, 1963; **Piron**, 1964; **Jauch**, 1968), siendo este último el más próximo al enfoque inicial de **Birkhoff & von Neumann** (1936). Asimismo, cabe destacar que, ante este panorama plural, **van Fraassen** (1974) hizo uso del análisis semántico de Beth para reconstruir un enfoque unificado.

En segundo lugar, la lógica cuántica ha sido objeto de estudio de distintas áreas del conocimiento. Por este motivo deben establecerse dos restricciones en la metodología de investigación: (i) dado que el aspecto central reside en el problema de la interpretación de una teoría física, nos hallamos dentro del campo de la filosofía de la física, y (ii) empleamos herramientas formales de la lógica y recursos conceptuales de la filosofía de la ciencia para evaluar el cálculo proposicional de R_{OM} en tanto que interpretación de la mecánica cuántica.

Por consiguiente, podemos formular la pregunta que orienta la investigación del siguiente modo: ¿es el R_{OM} una interpretación adecuada de la mecánica cuántica? La evaluación del éxito del enfoque inicial propuesto por Birkhoff y von Neumann exige alcanzar previamente los siguientes objetivos: definir el concepto de interpretación de una teoría física, analizar formalmente la lógica cuántica y coordinar ambos aspectos.

La investigación se estructuró en cuatro partes: primero, adoptamos una hipótesis metodológica para aclarar la definición de interpretación de una teoría; segundo, analizamos los fundamentos heurísticos de la lógica cuántica; tercero, reconstruimos una esquematización lógica del R_{OM} en virtud de la cual se pone de manifiesto su conexión con la mecánica cuántica, y cuarto, discutimos el núcleo conceptual del R_{OM} , es decir, la modularidad, y llevamos a cabo una discusión sobre las dificultades de este enfoque para la interpretación de la mecánica cuántica. En síntesis, se sistematizó la tesis de la interpretación parcial con el enfoque lógico cuántico de Birkhoff y von Neumann mediante una modelización lógico-algebraica del cálculo proposicional.

Método

Tesis metateórica de la interpretación parcial. El primer paso de la investigación implicó aclarar la noción de interpretación de una teoría. La precisión del significado de “interpretar una teoría física” permite una resolución del problema de la lógica cuántica en tanto que interpretación de la mecánica cuántica. Nos hallamos entre dos extremos: uno general y otro restringido. El concepto general de interpretación se propone determinar “qué mundo describe una teoría”. El concepto restringido de interpretación pertenece a la teoría de modelos y en lógica se emplea para caracterizar la semántica formal. En este contexto una interpretación es un par $M := \langle D, v \rangle$ para un lenguaje L , donde $D \neq \emptyset$ es el universo y v es una aplicación cuyo dominio es el conjunto de símbolos propios de L , tal que: $v(R)$ es una relación n -ádica en D si R es un símbolo relacional n -ádico de L y $v(f)$ es una función n -ádica en D si f es un símbolo funcional n -ádico de L . Por consiguiente, se dice que $v(t)$ es la interpretación de t en la estructura M si t es un símbolo de L .

El primer extremo concierne a los aspectos conceptuales y es demasiado amplio para precisar la relación específica entre el formalismo teórico y la interpretación. El segundo extremo, por su parte, es una noción técnica concerniente a las teorías matemáticas. Debemos presentar un problema añadido a tal disyuntiva: la locución “interpretación de una teoría empírica” no es unívoca. **Jammer** (1974) expresa que “*just as physicists disagree on what is the correct interpretation of quantum mechanics, philosophers of science disagree on what it means to interpret such a theory*” para poner de manifiesto que en el desarrollo tanto de la historia de las ciencias como de la filosofía de la ciencia se han propuesto y aplicado diversos conceptos de teoría científica.

Ante este panorama debemos adoptar una hipótesis metodológica. Nos apoyamos en la tesis de la interpretación parcial que emplea **Jammer** (1974) en su análisis de las interpretaciones de la mecánica cuántica. Así pues, comprendemos una teoría física como

un sistema formal parcialmente interpretado. Bajo la tesis de la interpretación parcial se distinguen dos elementos de una teoría física T : el conjunto F del formalismo abstracto y el conjunto R de las reglas de correspondencia. Al conjunto F pertenecen las fórmulas primitivas y derivadas, así como con un cálculo deductivo, de modo que tanto las constantes lógicas como los términos no lógicos pertenecen a F . Estos últimos son específicos del campo de investigación científica correspondiente. No obstante, cabe aclarar que, atendiendo a los elementos de F , el significado de tales términos no es empírico, sino que depende del contexto lógico del formalismo F .

En F los términos no lógicos tales como “función de estado” carecen de contenido empírico, a pesar de sugerir una descripción física. Por este motivo se necesita el conjunto R de reglas de correspondencia. Con ellas podemos establecer una correlación entre determinadas observaciones físicas y los términos no lógicos del formalismo. Con R se dota de significado físico a F de tal modo que se obtiene un sistema hipotético-deductivo cuyos enunciados poseen significado empírico. En este sentido, **Jammer** (1974) explica que: “*To transform F into a hypothetic deductive system of empirical statements and to make it thus physically meaningful, some of the nonlogical terms, or some formulae in which they occur, have to be correlated with observable phenomena or empirical operations*”. R hace posible tal correlación.

Los postulados que se hipotetizan son las fórmulas primitivas de F , el sistema deductivo permite obtener las fórmulas derivadas y R garantiza que el significado de los términos no lógicos de tales fórmulas sea empírico. Ahora bien, la diferencia entre términos observacionales y teóricos no debe equipararse con las fórmulas derivadas y primitivas. Los elementos de R pueden comprenderse como reglas semánticas de tal modo que se expresan en el metalenguaje y atribuyen su significado a los términos no lógicos del formalismo. Por consiguiente, los términos observacionales se definen como aquellos términos no lógicos a los que una regla de R otorga directamente su contenido empírico. Por su parte, los términos teóricos se definen como aquellos términos no lógicos que las reglas de R no interpretan de modo directo. En ambos casos los términos no lógicos pueden ser de fórmulas primitivas o derivadas del conjunto F . Esto permite dilucidar el núcleo de la tesis de la interpretación parcial: se puede hablar de una interpretación parcial de T debido a que los términos teóricos se definen de forma contextual. Pueden darse diversas interpretaciones válidas, dado que es posible establecer un conjunto R' que difiera de R tal que el formalismo pueda estar parcialmente interpretado por R o por R' . F_R expresa que R interpreta parcialmente a F , así pues, pueden ocurrir F_R y $F_{R'}$.

Al hablar de la interpretación de F por R nos encontramos ante interpretaciones del formalismo de una teoría. No obstante, a pesar de la distinción analítica y de la posibilidad de que diferentes conjuntos de reglas de correspondencia interpreten un mismo formalismo, para considerarla como tal, en una teoría científica no puede darse un componente de T sin el otro: “ *F without R is a meaningless game with symbols, R without F is at best an incoherent and sterile description of facts*” (**Jammer**, 1974).

La tesis de la interpretación parcial es la postura metateórica que **Jammer** (1974) emplea para dar cuenta de las interpretaciones de la mecánica cuántica orientadas a resolver el problema de la medida. Sin embargo, en cuanto a la lógica cuántica, Jammer no hace uso de la interpretación de F por R , antes bien, aborda la perspectiva lógico-cuántica como interpretación en tanto que perspectiva que incide sobre la estructura formal que exige el sistema deductivo subyacente en la expresión de T . **Jammer** (1974) relaciona la lógica cuántica con “*the formal structure of the deductive reasoning applied in formulating T* ”, lo cual no es más que “*the logic underlying the formulation of T* ”. Esta perspectiva le permite entroncar con el objetivo manifestado por **Birkhoff & von Neumann** (1936): “El objeto del presente artículo es descubrir qué estructura lógica es dado esperar en las teorías físicas que, como la mecánica cuántica, no se ajustan a la lógica clásica” (traducción propia).

En nuestra hipótesis metodológica asumimos la comprensión de la lógica cuántica bajo la tesis de la interpretación parcial de F por R , conjuntamente con el planteamiento del sistema deductivo que ordena la formulación abstracta de la mecánica cuántica. Esta

línea integradora contrasta con el planteamiento de **Jammer** (1974), quien entiende la lógica cuántica (en tanto que interpretación de la mecánica cuántica) exclusivamente como la modificación de las leyes deductivas que establecen la consistencia del formalismo físico teórico. Por nuestra parte, mostraremos que el modo más adecuado de comprender la lógica cuántica (en tanto que interpretación de la mecánica cuántica) es atendiendo al contenido significativo que adquieren los términos no lógicos a partir de las reglas de correspondencia, dado que tiene mayor rendimiento explicativo de acuerdo con la base heurística de la formulación original del R_{OM} . En definitiva, adoptamos la hipótesis metodológica que propone la comprensión de las leyes lógico-deductivas que estructuran formalmente la teoría mecánico-cuántica en tanto que reglas de correspondencia del conjunto R que interpreta parcialmente el formalismo F dotando de contenido significativo a los términos no lógicos de los enunciados primitivos y derivados. Defendemos que el establecimiento de la “lógica subyacente” de **Birkhoff & von Neumann** (1936) se hace a la luz de la correspondencia con las operaciones empíricas.

La razón por la que el sistema es deductivo y no inductivo tiene una doble motivación. Por un lado, los razonamientos deductivos son, por su estructura formal, inferencias conservadoras y no amplían la verdad de las premisas a la conclusión, en tanto que los razonamientos inductivos son inferencias ampliadoras, pero no conservadoras de la verdad. Así pues, en lo concerniente a la consistencia de la formulación abstracta de la teoría debemos ceñirnos a la necesaria conservación de la verdad y no a la mera verosimilitud. Por otro lado, debemos aproximarnos al método científico formulado en términos hipotético-deductivos, es decir, se conjetura una hipótesis de la cual se derivan deductivamente enunciados que deben ser experimentalmente corroborados, lo que se hace para justificar la ampliación de la verdad y, a su vez, evitar el camino inverso y no incurrir, precisamente, en el problema de la inducción.

Cabe destacar que el concepto de interpretación se encuentra intrínsecamente vinculado al problema de la naturaleza de las teorías científicas, cuyo campo de investigación es la filosofía de la ciencia. Las diferentes propuestas metateóricas se han sucedido en la evolución de esta disciplina. En este sentido, la tesis de la interpretación parcial en la que se apoya **Jammer** (1974) tiene una marcada impronta de la concepción heredada en su comprensión de las teorías empíricas como cálculos interpretados. Frente a esto debe mencionarse que nuestra asunción de dicho concepto de interpretación no es una apología de las tesis neopositivistas, antes bien, se trata de una hipótesis metodológica adoptada por su mayor capacidad explicativa en el ámbito particular de la comprensión del R_{OM} con el que comenzó el desarrollo de la lógica cuántica.

Por último, debemos aclarar que en la filosofía de la mecánica cuántica, el vocablo “interpretación” alude a dar una respuesta al problema de la medida para explicar el colapso de la función de onda. La propuesta lógico-cuántica consistiría en defender que las reglas de la lógica no se adecúan al sistema clásico en el nivel cuántico. Sin embargo, la propuesta inicial del R_{OM} no se presentó explícitamente como una posible respuesta al problema de la medida, por lo que las cuestiones específicas de dicho problema no se abordan de modo directo, es decir, su propósito se circunscribe a la indagación de la lógica subyacente a la teoría. Por consiguiente, nuestra investigación se desarrolla en el marco específico de la interpretación de una teoría física en tanto que interpretación parcial.

Fundamentos conceptuales

Cálculo de enunciados, espacio de fases y proposiciones experimentales. Dado un sistema físico X , una observación de X es una asignación numérica x_1, \dots, x_n tal que mantiene una correspondencia con cada μ_k , donde μ_1, \dots, μ_n denotan las mediciones. Un punto cualquiera (x_1, \dots, x_n) es determinado por cierta medida μ_1, \dots, μ_n . Como explican **Birkhoff & von Neumann** (1936): “an ‘observation’ of a physical system X can be described generally as a writing down of the readings from various compatible measurements”. En este contexto, las predicciones son comprendidas como aquellas circunstancias en las que cierto punto (x_1, \dots, x_n) pertenece a un subconjunto A de un espacio tipo (x_1, \dots, x_n) . Un espacio de observación

de X consiste en un espacio tipo (x_1, \dots, x_n) que se encuentra en relación con X . Así pues, se denominan proposiciones experimentales a los subconjuntos A_i de los espacios de tipo (x_1, \dots, x_n) que se encuentran en relación con X , es decir, sus espacios de observación. A tales espacios de observación pertenecen los puntos (x_1, \dots, x_n) determinados por μ_1, \dots, μ_n .

La representación matemática de un estado de un sistema físico es un punto p de Σ , siendo Σ un espacio de fases fijo. Se asume como hipótesis que cualquier sistema X se encuentra asociado con algún p_i en cada instante t_n . Como señalan **Birkhoff & von Neumann** (1936): “ Σ is a region of ordinary $2n$ -dimensional space” en el contexto mecánico-clásico, pero en electrodinámica “ Σ is a function-space of infinitely many dimensions” y la posibilidad de determinar los puntos del espacio de fases del sistema electrodinámico depende de la especificación previa de determinadas funciones. **Von Neumann** (1932) empleó los espacios de Hilbert para formalizar la mecánica cuántica dado que constituyen una estructura matemática en la que la mecánica de ondas de Schrödinger y la mecánica matricial de Heisenberg son equivalentes. De modo que un sistema mecánico-cuántico Σ es un espacio de función para el cual se emplean los espacios de Hilbert, en tanto que las funciones de onda constituyen los puntos de dicho espacio. Al relacionar esto último con las proposiciones experimentales, decimos que el representante matemático de algún A_i incluido en cualquier espacio de observación relacionado con X no es más que el conjunto al que pertenecen todos los puntos del espacio de fases de X .

Todo ello ofrece los elementos para el establecimiento de un cálculo proposicional mecánico-cuántico que capte las reglas de correspondencia en virtud de las cuales el formalismo adquiere contenido físico. En nuestra propuesta se trataría de las reglas de la interpretación parcial. Debemos tener en cuenta que, dada una predicción, una medida define una asignación de números que llamamos observación, la cual pertenece a una proposición experimental incluida en un espacio de observación que se encuentra asociado al sistema X . Debido a que los subconjuntos de un espacio de fases no son ontológicamente lo mismo que los subconjuntos de un espacio de observación (pues estos subconjuntos son las proposiciones experimentales), el objetivo de la lógica cuántica consiste en esclarecer la relación entre los subconjuntos de un espacio de fases y las proposiciones experimentales en mecánica cuántica.

Si se trata de un sistema clásico, es posible obtener el momento a partir de la velocidad y la posición del estado del sistema, lo cual permite definir una correspondencia entre los subconjuntos de un espacio de observación y los de un espacio de fases en la que la relación de inclusión se preserva. La definición de dicha correspondencia puede representarse con un álgebra de Boole. Un retículo de Boole permite expresar la suma, el producto y el complemento conjuntistas, ya que tienen las mismas propiedades en cualesquiera subconjuntos de espacio de fases y proposiciones experimentales. Ahora bien, no es posible mantener la misma expresión booleana en un sistema cuántico, pues sus medidas no pueden predecirse a partir de su estado. Esta condición no permite establecer una relación biyectiva entre los subconjuntos de un espacio de fases y las proposiciones experimentales. La propuesta del R_{OM} consiste en que: “*this situation has an exact algebraic analogue in the calculus of propositions*” (**Birkhoff & von Neumann**, 1936), definiendo ese análogo a través de un álgebra no booleana. Las condiciones de tal definición son las siguientes:

- La relación que guarda el espacio de fases con la realidad se expresa en la correlación que existe entre las proposiciones experimentales y los subconjuntos de un espacio de fases. Como lo plantean **Birkhoff & von Neumann** (1936), “*before a phase-space can become imbued with reality, its elements and subsets must be correlated in some way with ‘experimental propositions’*”.
- Las reglas de correspondencia expresadas en el álgebra no booleana deben mantener la relación de inclusión conjuntista, de tal modo que se conciben las proposiciones experimentales y los subconjuntos del espacio de fases como subconjuntos de espacios de observación.

- En el caso cuántico no es admisible pensar las proposiciones experimentales como subconjuntos de un espacio de fases, dado que no cabe la posibilidad de instaurar una correspondencia uno-a-uno entre una proposición experimental y un subconjunto del espacio de fases. Por consiguiente, la relación de inclusión no se preserva. **Birkhoff & von Neumann** (1936) indican que el motivo se encuentra en que, “*the readings from measurements on a physical system X from a knowledge of its ‘state’ is denied*”.
- El complemento, la suma y el producto preservan sus propiedades en términos conjuntistas al establecer las reglas de correspondencia entre las proposiciones experimentales y los subconjuntos de un espacio de fases.

Relación de las proposiciones experimentales con los subconjuntos de un espacio de fases

Para esclarecer la relación que existe entre las proposiciones experimentales y los subconjuntos de un espacio de fases, de la cual obtendremos el cálculo proposicional del R_{OM} , Birkhoff y von Neumann introdujeron una definición y un postulado de carácter heurístico.

Dada una sucesión $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ de observaciones compatibles en X , se colige que existe una clase $\Omega_i \in \Sigma$ de subespacios lineales cerrados y mutuamente ortogonales. Por consiguiente, cada $f \in \Sigma$ se expresa $\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3 + \dots + f_i \in \Omega_i$. A partir de tal indicación, **Birkhoff & von Neumann** (1936) elabora la siguiente definición:

“By the ‘mathematical representative’ of a subset A of any observation-space (determined by compatible observations $\alpha_1, \dots, \alpha_n$) for a quantum-mechanical system X , will be meant the set of all points f of the phase-space of X , which are linearly determined by proper functions f_k satisfying $\alpha_1 f_k = \lambda_1 f_k, \dots, \alpha_n f_k = \lambda_n f_k$, where $(\lambda_1, \dots, \lambda_n) \in A$ ”.

La definición permite especificar la relación entre un subconjunto del espacio de fases y una proposición experimental. El representante matemático de cada A_i de un espacio de observación es el conjunto de todas las $f \in \Sigma$. Esto quiere decir que el representante matemático de cualquier A_i de un espacio de observación es el conjunto al que pertenecen las funciones del espacio de fases determinadas linealmente por las funciones propias que cumplen $\alpha_1 f_k = \lambda_1 f_k, \dots, \alpha_n f_k = \lambda_n f_k$. Es menester tener en cuenta que el conjunto A_i y el concepto de proposición experimental son coextensionales y que una función propia f_k es un punto de Σ . Lo que establece la relación consiste en que para cada $\lambda_n \in S$: f_k satisface $\lambda_n f_k$, de tal modo que se preserva una igualdad con las observaciones tal que $\alpha_n f_k = \lambda_n f_k$.

De la definición se extraen dos corolarios conceptualmente relevantes. Por un lado, dado que el espacio de fases de un sistema mecánico-cuántico X es un espacio de Hilbert H , un subespacio lineal cerrado de H es un representante matemático de una proposición experimental. Por otro lado, dado que los operadores son hermíticos en un sistema mecánico-cuántico X , el complemento ortogonal de una proposición experimental es el representante matemático de la negación de dicha proposición experimental. Asimismo, siendo P y Q dos proposiciones experimentales, son equivalentes estas cláusulas:

- El representante matemático de P está incluido en el representante matemático de Q .
- Si es posible predecir P , entonces es posible predecir Q . Este es el concepto de “ P implica Q ” en este contexto.
- La probabilidad de P es a lo sumo la de Q al tomar conjuntamente diversos sistemas.

Tales condiciones permiten a **Birkhoff & von Neumann** (1936) introducir el siguiente postulado necesario para definir el R_{OM} :

“The set-theoretical product of any two mathematical representatives of experimental propositions concerning a quantum-mechanical system, is itself the mathematical representative of an experimental proposition.”

Por consiguiente, dados cualesquiera $\Omega_1, \Omega_2 \in H$, su suma lineal cerrada es el complemento ortogonal del producto cartesiano de los complementos ortogonales de Ω_1 y Ω_2 . De lo cual se deriva que:

- Sean $\Omega_i \in H$ un subespacio lineal cerrado y X un sistema mecánico cuántico, si una proposición experimental de X es representada matemáticamente por Ω_i , entonces su complemento ortogonal constituye también una representación matemática de una proposición experimental de X .

ii. Sean $\Omega_1, \Omega_2 \in H$ subespacios lineales cerrados y X un sistema mecánico cuántico, si dos proposiciones experimentales de X son representadas matemáticamente por Ω_1 y Ω_2 , respectivamente, la suma lineal cerrada y el producto cartesiano de Ω_1 y Ω_2 constituyen también representaciones matemáticas de proposiciones experimentales de X .

En síntesis, un subespacio cerrado de un espacio de Hilbert representa una proposición experimental de una entidad cuántica. Asimismo, es posible realizar la definición lógico-formal de una conectiva unaria, dos binarias y una relación de consecuencia lógica. Esto permite especificar un cálculo proposicional de un sistema mecánico cuántico a partir de sus proposiciones experimentales. Se trata de un cálculo proposicional “*wich is formally indistinguishable from the calculus of linear subspaces with respect to set products, linear sums, and orthogonal complements and resembles the usual calculus of propositions with respect to and, or and not*” (Birkhoff & von Neumann, 1936). No obstante, las proposiciones cuánticas que pertenecen al conjunto de los espacios cerrados de un espacio de Hilbert no satisfacen la distribución de la disyunción en la conjunción y viceversa. Por consiguiente, no pueden ser representadas mediante un álgebra de Boole.

Resultados

La lógica cuántica estándar actualmente se expresa mediante un retículo ortomodular completo (Dalla Chiara & Giuntini, 2008). En la presente sección mostramos el contraste entre la lógica ortomodular y el R_{OM} a partir del retículo de Hilbert. Birkhoff & von Neumann (1936) presentaron los elementos sintáctico-reticulares, sin embargo, nuestro objetivo es mostrar las condiciones semánticas que permitan comprender la relación de consecuencia de un sistema lógico-cuántico.

Lógica ortomodular

Usamos las siguientes constantes metalógicas: no, &, o, \Rightarrow , sii, \forall , \exists , las cuales mantienen el sentido habitual. Partimos de las siguientes definiciones:

Def. 1. Un semirretículo es un par $R := \langle D, \bullet \rangle$, tal que

i. $D \neq \emptyset$

ii. El operador binario \bullet es asociativo, conmutativo e idempotente, respectivamente:

$$- \forall xyz \in D: x \bullet (y \bullet z) = (x \bullet y) \bullet z$$

$$- \forall xy \in D: x \bullet y = y \bullet x$$

$$- \forall x \in D: x \bullet x = x$$

Def. 2. Un retículo es una tripleta $R := \langle D, \sqcup, \sqcap \rangle$, tal que

i. $\langle D, \sqcup \rangle$ es un semirretículo

ii. $\langle D, \sqcap \rangle$ es un semirretículo

iii. R satisface las leyes de absorción:

$$- \forall xy \in D: x \sqcup (x \sqcap y) = x$$

$$- \forall xy \in D: x \sqcap (x \sqcup y) = x$$

Son equivalentes la definición algebraica y la definición en tanto que orden de un retículo (prueba en Grätzer, 2011). Por este motivo emplearemos la relación \leq de orden parcial.

Def. 3. Un retículo acotado es una estructura $R := \langle D, \leq, 1, 0 \rangle$, tal que

i. \leq es una relación antisimétrica, transitiva y reflexiva (orden parcial) en D

ii. $\forall xy \in D$, x, y tienen un supremo $x \sqcup y$ y un ínfimo $x \sqcap y$ que satisfacen:

$$- x \sqcap y \leq x, y \text{ \& } \forall z \in D: z \leq x, y \Rightarrow z \leq x \sqcap y$$

$$- x, y \leq x \sqcup y \text{ \& } \forall z \in D: x, y \leq z \Rightarrow x \sqcup y \leq z$$

iii. 0 es el mínimo y 1 es el máximo. $\forall x \in R$:

$$- 0 \leq x$$

$$- x \leq 1$$

Def. 4. Un ortoretículo es una estructura $R := \langle D, \leq, 1, 0, ' \rangle$, tal que

i. $\langle D, \leq, 1, 0 \rangle$ es un retículo acotado

ii. El ortocomplemento ' es un operador monádico que cumple las reglas de la doble negación, la contraposición y la no-contradicción, $\forall xy \in D$:

- $x'' = x$
- $x \leq y \Rightarrow y' \leq x'$
- $x \sqcap x' = 0$

Def. 5. Un retículo ortomodular es una estructura $R := \langle D, \leq, 1, 0, ' \rangle$, tal que

- i. R es un ortorretículo
- ii. $\forall xy \in D: x \sqcap (x' \sqcup (x \sqcap y)) \leq y$

Un ortorretículo no satisface las leyes distributivas:

- i. $x \sqcup (y \sqcap z) = (x \sqcup y) \sqcap (x \sqcup z)$
- ii. $x \sqcap (y \sqcup z) = (x \sqcap y) \sqcup (x \sqcap z)$

No obstante, sí cumple versiones más débiles:

- i. $(x \sqcap y) \sqcup (x \sqcap z) \leq x \sqcap (y \sqcup z)$
- ii. $x \sqcup (y \sqcap z) \leq (x \sqcup y) \sqcap (x \sqcup z)$

A continuación establecemos una definición algebraica de los modelos lógico-cuánticos que interpretan un lenguaje $L := \langle F_A, C, FBF \rangle$, donde F_A es el conjunto de fórmulas atómicas, $\{\neg, \wedge\}$ es el conjunto C de conectivas y FBF es el conjunto de fórmulas bien formadas que se generan inductivamente a partir de C y F_A del modo habitual y que expresaremos con letras griegas minúsculas. Se trata de un lenguaje simplificado debido a que la finalidad es la aclaración conceptual.

Def. 6. Un modelo M_{OL} del lenguaje L para una ortológica es un par $\langle R, I \rangle$, donde

- i. R es un ortorretículo $\langle D, \leq, 1, 0, ' \rangle$
- ii. $I: FOR(L) \rightarrow \{\perp, \top\}$ es una función de interpretación tal que $\forall \varphi, \psi \in FOR(L)$:
 - $v(\neg\varphi) = v(\varphi)'$
 - $v(\varphi \wedge \psi) = v(\varphi) \sqcap v(\psi)$

En este contexto, \perp y \top son los valores de verdad y se leen como “falso” y “verdadero”, respectivamente.

Def. 7. Verdad en una ortológica:

- i. $M_{OL} \Vdash \varphi$: φ es verdadera en la estructura M_{OL} sii $I(\varphi) = \top$.
- ii. $\models_{MOL} \varphi$: φ es una verdad lógica sii para cualquier estructura M_{OL} , $M_{OL} \Vdash \varphi$.
- iii. M_{OL} es un modelo de φ sii $M_{OL} \Vdash \varphi$. M_{OL} es un modelo del conjunto Γ fórmulas sii $\forall \varphi \in \Gamma, M_{OL} \Vdash \varphi$.

Def. 8. Relación de consecuencia de una ortológica:

$\Gamma \models_{MOL} \varphi$: φ es consecuencia de Γ en M_{OL} sii $\forall x \in D: \forall \psi \in \Gamma (x \leq v(\psi) \Rightarrow x \leq v(\varphi))$.

Def. 9. Un modelo M_O del lenguaje L para una lógica ortomodular es la misma estructura $\langle R, I \rangle$ de M_{OL} (supra, def. 6), pero siendo R un retículo ortomodular.

Def. 10. Verdad en una lógica ortomodular: las definiciones de verdad en M_O , de verdad lógica de una lógica ortomodular y de modelo de una fórmula en una lógica ortomodular son análogas a las definiciones correspondientes de una ortológica (supra, def. 7) empleando M_O .

Def. 11. Relación de consecuencia de una lógica ortomodular: la definición es análoga a la correspondiente definición de una ortológica (supra, def. 8) empleando M_O .

Lógica ortocomplementada ortomodular

Dado el fundamento conceptual de la lógica de un sistema físico, las proposiciones experimentales P de un sistema X pueden ser representadas matemáticamente por los subconjuntos Ω_i de un espacio de fases Σ . Lo que expresa una proposición experimental consiste en que una cantidad física tiene un valor y los subconjuntos Ω_i son las cualidades físicas o eventos. Asimismo, se dice que P se encuentra asociado con Ω si en tal subconjunto de Σ están contenidos aquellos estados puros (u observaciones maximales que comprueban los estados de X) por los que P se sostiene. De este modo, si $p \in \Omega$ es un estado puro, X en p verifica a Ω y a su P asociado. La estructura de la totalidad de las cualidades físicas,

es decir, el conjunto de todos los eventos, es el conjunto $M(\Sigma)$, el cual denota las partes medibles del espacio de fases. Las operaciones lógicas de $M(\Sigma)$ en un sistema clásico son algebraicamente esquematizadas por un álgebra de Boole, esto es, un retículo distributivo complementado.

Def. 12. Un retículo de Boole es una estructura $R := \langle M(\Sigma), 1, 0, \subseteq, -, \cup, \cap \rangle$, tal que

i. 0 representa al conjunto vacío y 1 a la totalidad del espacio Σ .

ii. \subseteq es la relación conjuntista de inclusión y $-, \cup, \cap$ son los operadores conjuntistas.

Si se los caracteriza semánticamente como conectivas lógicas, entonces obtenemos las siguientes condiciones. El estado p verifica:

- La conjunción $\Omega_1 \cap \Omega_2$ sii $p \in \Omega_1 \cap \Omega_2$ sii p verifica los dos conjuntos.

- La disyunción $\Omega_1 \cup \Omega_2$ sii $p \in \Omega_1 \cup \Omega_2$ sii p verifica uno de los disyuntos como mínimo.

- La negación $-\Omega$ sii $p \notin \Omega$ sii p no verifica Ω .

En los sistemas clásicos la ley del tercio excluido se satisface, por lo que en términos semánticos tenemos que los estados deciden todo evento: $\forall p \forall \Omega: p \in \Omega$ o $p \in -\Omega$. Por el contrario, en los sistemas cuánticos los estados puros establecen valores probabilísticos para los eventos. En este caso, los estados puros Ψ_i son funciones de onda. Tal como **Chiara & Giuntini** (2008) observan, dado el estado Ψ y la proposición experimental P , semánticamente caben tres posibilidades:

i. $\Psi(P) = \top$

ii. $\Psi(P) = \perp$

iii. $\Psi(P) \neq \top$ y $\Psi(P) \neq \perp$

Podemos interpretar tales posibilidades como la proposición experimental cuántica P siendo verdadera, falsa o ni verdadera ni falsa en el estado Ψ para el sistema X . Tal como proponen **Birkhoff & von Neumann** (1936), el representante matemático apropiado para las proposiciones experimentales cuánticas es un subespacio lineal cerrado de un espacio de Hilbert. En el caso mecánico-cuántico, $C(H)$ es el conjunto de subespacios lineales cerrados de H . A diferencia del conjunto de eventos medibles $M(\Sigma)$ del caso clásico que constituye un álgebra de Boole, el conjunto $C(H)$ de todos los eventos de H tiene el esquema de un retículo ortomodular ortocomplementado. Esto se debe a que:

i. El complemento ortogonal de un representante matemático de una proposición experimental es el representante matemático de la negación de dicha proposición experimental. El complemento ortogonal Ω' es el conjunto de cada vector que es ortogonal para cada elemento que pertenece a Ω . Tenemos que para todo evento Ω y todo estado puro Ψ : $\Psi(\Omega) = \top$ sii $\Psi(\Omega') = \perp$ y $\Psi(\Omega') = \top$ sii $\Psi(\Omega) = \perp$. El ortocomplemento invierte los valores probabilísticos que representan los valores veritativos.

ii. La disyunción se comprende como el supremo $\Omega_1 \sqcup \Omega_2$ de dos subespacios lineales cerrados, dado que la unión conjuntista de dos subespacios lineales cerrados no es, a su vez, un subespacio lineal cerrado. No obstante, la unión de tales subespacios está incluida en el subespacio más pequeño que contenga a Ω_1 y Ω_2 , esto es, su supremo.

iii. La conjunción se comprende como la intersección conjuntista.

Def. 13. Un retículo ortomodular ortocomplementado es una estructura $R := \langle C(H), 1, 0, ', \subseteq, \sqcup, \sqcap \rangle$, tal que

i. \subseteq es la inclusión conjuntista.

ii. La conjunción es la intersección conjuntista \sqcap .

iii. La disyunción es el supremo reticular \sqcup .

iv. La negación es el complemento ortogonal.

v. 0 representa al conjunto vacío y 1 a la totalidad del espacio H .

Destacan dos aspectos importantes. En primer lugar, debido al teorema de proyección, existe un isomorfismo entre el conjunto $C(H)$ y el conjunto $P(H)$ de todas las proyecciones de H . En segundo lugar, la disyunción cuántica no es semánticamente bivalente, de tal modo que es posible que $\Psi \in \Omega_1 \sqcup \Omega_2$ pero, a la vez, $\Psi \notin \Omega_1$ & $\Psi \notin \Omega_2$, es decir, la ley distributiva falla.

Discusión

Retener la modularidad

El retículo de Hilbert es un ortorretículo no distributivo $R := \langle C(H), \leq, 1, 0, ' \rangle$, por lo que *prima facie* era la alternativa de mayor plausibilidad para el establecimiento de las reglas del sistema proposicional de la mecánica cuántica. Sin embargo, como lo señalan **Dalla Chiara et al.** (2007), se rechazó de forma deliberada la referencia al retículo de Hilbert para hacer efectivo el propósito de retener la modularidad. Explican **Dalla Chiara et al.** (2007) que el objetivo de von Neumann consistía en “*to interpret the algebraic structure representing quantum logic as the algebra of random events in the sense of a non-commutative probability theory*”. Ahora bien, dicha motivación no era viable si las probabilidades se comprendían como frecuencias relativas, lo cual le condujo a estudiar la interpretación lógica con el siguiente carácter:

“*Hence we conclude that the propositional calculus of quantum mechanics has the same structure as an abstract projective geometry.*”

Moreover, this conclusion has been obtained purely by analyzing internal properties of the calculus, in a way which involves Hilbert space only indirectly.”

Birkhoff & von Neumann (1936) introducen heurísticamente el presupuesto de las dimensiones finitas, en virtud de lo cual se restringe finitamente la cadena de elementos de un retículo. Así pues, “*(...) the projective geometry corresponding to the complex Hilbert space represents more intrinsically the physics of the quantum world as does the Hilbert space itself.*” (**Aerts**, 2009).

Birkhoff (1935) mostró que las geometrías proyectivas son definibles en términos de operaciones combinatorias elementales dado el presupuesto de la finitud. Más aún, probó que son expresables en un sistema abstracto de geometría proyectiva tanto la identidad modular como los retículos finitos complementados. El recurso a la geometría proyectiva abstracta permite considerar estructuras algebraicas que presentan propiedades más débiles que el álgebra de Boole, no obstante, **Rédei** (2009) indica que, dentro de esa posibilidad, lo que se plantea es un cálculo proposicional formulado a partir de un retículo ortocomplementado no distributivo modular y no identificado con el retículo ortomodular no modular de todos los subespacios lineales cerrados de un espacio de Hilbert complejo de infinitas dimensiones, el cual es el retículo de Hilbert.

La ley distributiva falla en las estructuras lógicas de la mecánica cuántica. Conceptualmente, el motivo de su incumplimiento estriba en que esta ley es “*a logical consequence of the compatibility of the observables*” (**Birkhoff & von Neumann**, 1936), compatibilidad que no se cumple en un sistema cuántico. Los autores ofrecen dos justificaciones del fallo de la ley distributiva en mecánica cuántica:

i. De un modo tácito sugieren que el principio de incertidumbre de Heisenberg se vería transgredido con la conjunción de dos observables incompatibles, de modo que si se elimina la distribución, se elude la posibilidad de tal transgresión.

ii. De modo explícito exponen un experimento mental: “*if a denotes the experimental observation of a wave-packet Ψ on one side of a plane in ordinary space, a' correspondingly the observation of Ψ on the other side, and b the observation of Ψ in a state symmetric about the plane, then: $b \cap (a \sqcup a') = b \cap 1 = b \neq 0 = (b \cap a) = (b \cap a') = (b \cap a) \sqcup (b \cap a')$ ” (**Birkhoff & von Neumann**, 1936) (adaptamos la notación original a la nuestra). De ello se sigue que $b \cap (a \sqcup a') \neq (b \cap a) \sqcup (b \cap a')$, cuya validez niega la propiedad distributiva.*

Para seleccionar el retículo adecuado debemos considerar las diferencias entre las siguientes tres propiedades $\forall xyz \in D$:

i. Distribución: $x \sqcup (y \cap z) = (x \sqcup y) \cap (x \sqcup z)$

ii. Modularidad: $x \leq y \Rightarrow x \sqcup (y \cap z) = (x \sqcup y) \cap (x \sqcup z)$

iii. Ortomodularidad: $x \leq y \ \& \ x' \leq z \Rightarrow x \sqcup (y \cap z) = (x \sqcup y) \cap (x \sqcup z)$

La alternativa que proponen como condición suficiente para expresar las relaciones entre los subespacios cerrados de H es la modularidad. Esta propiedad es una versión débil de la ley distributiva y una forma fuerte de la ortomodularidad. **Rédei** (2009) señala

dos propiedades del álgebra de Boole que pretenden ser conceptualmente análogas en el cálculo proposicional cuántico: “*it represents the propositional algebra of a classical propositional calculus and it also represents the set of random events on which probability measures are defined*”. Si mantenemos el retículo de Hilbert y, por lo tanto, no tenemos la modularidad, entonces la estructura algebraica no tiene capacidad para expresar una “*event structure for a relative frequency interpreted non-commutative probability theory*” (Rédei, 2009, p.19). La modularidad debe conservarse para que el cálculo proposicional pueda representar algebraicamente los eventos de una teoría de la probabilidad donde la propiedad de aditividad fuerte sea fundamental para la medida probabilística. **Birkhoff & von Neumann** (1936) mencionan que la modularidad “*is closely related to the existence of an ‘a priori thermo-dynamic weight of states’*” (la justificación se puede consultar en **Dalla Chiara et al.**, 2007, y en Rédei, 2009, dado que **Birkhoff & von Neumann**, 1936, no la desarrollan). Es la conservación de la modularidad el motivo por el cual rechazaron el retículo de Hilbert, puesto que esta estructura solo es modular si H “*is finite dimensional as a linear space*” (**Dalla Chiara et al.**, 2007) dada su definición en términos de geometría proyectiva. Sin embargo, para representar un sistema cuántico, H debe ser infinitamente dimensionado. Más aun, “*von Neumann viewed this fact as a pathological property of the Hilbert space formalism. (...) von Neumann expected the standard Hilbert space formalism to be superseded by a mathematical theory that he hope would be more suitable for quantum mechanics*” (**Dalla Chiara et al.**, 2007).

En síntesis, tal como **Birkhoff** (1948) lo declara, “*the logic of quantum mechanics is an orthocomplemented modular lattice*”. Para definir la estructura de un retículo ortocomplementado modular debemos mencionar que un retículo de Dedekind es aquel cuyos elementos satisfacen la identidad modular.

Def. 14. La estructura de un retículo ortocomplementado modular es la de un retículo de Dedekind que admite un automorfismo dual $x \rightarrow x'$, tal que $\forall xy \in D$:

- i. $(x \sqcap y)' = x' \sqcup y'$ & $(x \sqcup y)' = x' \sqcap y'$
- ii. $(x')' = x$
- iii. $x \sqcap x' = 0$ & $x \sqcup x' = 1$

Def. 15. Un modelo M_{OM} del lenguaje L para una lógica ortocomplementada modular es la misma estructura $\langle R, I \rangle$ de M_{OL} (supra, def. 6), donde R es un retículo ortocomplementado modular.

Def. 16. En una lógica ortocomplementada modular (M_{OM}) las definiciones de verdad lógica y de modelo son análogas a las definiciones correspondientes de una ortológica (supra, def. 7) empleando M_{OM} .

Def. 17. Relación de consecuencia de una lógica ortocomplementada modular: la definición es análoga a la correspondiente definición de una ortológica (supra, def. 8) empleando M_{OM} .

Problemas

Al coordinar el R_{OM} con la tesis de la interpretación parcial para proponerlo como enfoque exitoso de interpretación de la mecánica cuántica, nos encontramos ciertos problemas en distintos niveles. Tomando como referencia las críticas planteadas por **Popper** (1968), determinamos dos aspectos problemáticos para la discusión. En primer lugar, formalmente los propios Birkhoff y von Neumann obtuvieron resultados en la teoría de retículos posteriores a su propuesta de 1936. **Popper** (1968) destaca que tres de ellos problematizan la sostenibilidad del R_{OM} : (i) si un retículo es modular y únicamente complementado, entonces es un álgebra de Boole; (ii) si un retículo es únicamente complementado, completo y atómico, entonces es un álgebra de Boole, y (iii) si un retículo es únicamente complementado y ortocomplementado, entonces es un álgebra de Boole.

Por consiguiente, estos resultados muestran que, técnicamente, la lógica cuántica de **Birkhoff & von Neumann** (1936) es un álgebra de Boole: “*The lattice proposed by Birkhoff and von Neumann and intended to be non-Boolean is, in fact, Boolean*” (**Popper**,

1968). Una posible réplica es la reformulación del cálculo proposicional de Birkhoff y von Neumann como “*non-Boolean and orthocomplemented, with a unique operation of orthocomplementation, but not with unique complements*” (Popper, 1968). Sin embargo, la contraréplica consiste en poner de manifiesto que el retículo propuesto por Birkhoff y von Neumann es únicamente complementado, puesto que es mensurable. Al coordinar una estructura reticular con una función de medición tenemos tres reglas: (i) $\forall xy \in D, x=y$ sii para toda medición μ admisible, $\mu(x)=\mu(y)$, (ii) para toda μ admisible hay dos números reales tal que $k_0=\mu(0)$ & $\mu(1)=k_1$ y (iii) para toda μ admisible, $\mu(x)+\mu(y)=\mu(1)+\mu(x \sqcup y)$. Una medición μ es “admisible” si $\mu(x)$ es una función que asigna números reales a cada elemento de su dominio, está definida en un retículo mensurable y cumple las reglas expuestas. Popper (1968) aclara que en la propuesta de Birkhoff & von Neumann (1936) están vigentes las reglas de la medición antedichas y, por consiguiente, su lógica cuántica es un retículo mensurable.

En segundo lugar, conceptualmente, Birkhoff y von Neumann plantean una doble justificación de la inadmisibilidad de la identidad distributiva. Para dar razón del carácter no distributivo del cálculo proposicional propio de la mecánica cuántica, oblicuamente hacen referencia al principio de incertidumbre de Heisenberg y directamente a un experimento mental (supra p. 320). La dificultad a la que se enfrenta la primera justificación consiste en que Birkhoff & von Neumann (1936) no la desarrollan argumentalmente. Simplemente sugieren que “*it is interesting that [distributive law] is also a logical consequence of the compatibility of the observables (...)*”. En cuanto a la segunda justificación, Popper (1968) critica que, aun siendo formalmente correcto, el argumento no contiene elementos que lo enlacen de manera específica con la mecánica cuántica: “*for wave-packets, elephants, or even classical mass-points, this is perfectly compatible with the property denoted earlier by b; that is to say with the property ‘symmetric about the plane’. It is also compatible with many other properties*”. Jammer (1974) continúa este contraargumento mostrando la forma en que se viene abajo la desigualdad que motiva el fallo de la ley distributiva: el complemento a' no es la observación de Ψ en el ‘otro’ lado del plano, sino su observación ‘no en un lado’ (“*not on the one side*”) del plano, siendo a la observación de una Ψ en un lado de un plano en espacio ordinario. De modo que b (la observación de Ψ en un estado simétrico sobre el plano) se puede sustituir por a' , de lo que obtenemos $b=b \sqcap a'$. Por consiguiente, la desigualdad desaparece (debe tenerse presente el experimento mental supra p. 320). El principal argumento que desarrollan Birkhoff & von Neumann (1936) en favor del fallo de la ley distributiva es precisamente el comentado experimento mental. Popper (1968) lo consideró como “*a simple slip—one of those slips which, once in a lifetime, may happen even to the greatest mathematicians*”.

La problemática reside en dificultades técnicas para eludir el álgebra de Boole y retener la modularidad. Es posible modificar la propuesta de tal modo que se redefinan los operadores del cálculo de enunciados para elaborar una adecuada interpretación. Así pues, las dificultades pueden concebirse como ambigüedades expresivas concernientes a la disyunción y la conjunción de proposiciones incompatibles en lugar de errores técnicos. En este sentido, para el caso cuántico el ínfimo y el supremo de dos proposiciones experimentales serían también proposiciones experimentales sii el caso excepcional en que las medidas fueran compatibles. Birkhoff & von Neumann (1936) declararon que “*in classical mechanics, one can easily define the meet or join of any two experimental propositions as an experimental proposition (...). This is true in quantum mechanics only exceptionally—only when all the measurements involved commute (are compatible)*”. Para resolver la excepcionalidad es preciso modificar las reglas de las conectivas del cálculo no booleano que se proponga. Por consiguiente, las dificultades inciden en el modelo ortocomplementado modular pero no necesariamente en el enfoque general.

Conclusiones

En conclusión, obtenemos dos resultados: a) el enfoque reticular funciona como una interpretación de la mecánica cuántica, y b) el modelo ortocomplementado modular tiene

problemas técnicos y conceptuales para retener determinadas propiedades de un sistema cuántico. De la conjunción de a) y b) obtenemos que el R_{OM} es una interpretación, pero presenta dificultades para ser exitosa.

La validez del resultado depende de la coordinación de resultados parciales anteriores. En primer lugar, el enfoque reticular puede funcionar como una interpretación: las condiciones del cálculo proposicional operan como las reglas de correspondencia de la tesis metateórica de la interpretación parcial entre el formalismo de los subconjuntos de H y los fenómenos observables expresados mediante las proposiciones experimentales. A partir de tales reglas podemos construir modelos para definir una lógica cuántica. No se trata de que las estructuras modelo-teóricas sean las interpretaciones metateóricas, sino de que, a partir de las reglas de la interpretación parcial, se pueden estipular las condiciones semánticas de una lógica cuántica. En este sentido, la lógica cuántica es adecuada para expresar el razonamiento presupuesto en los fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica (von Neumann, 1932) y mediante la concreción de la interpretación de F por R para el caso cuántico. En segundo lugar, el modelo ortocomplementado modular que Birkhoff & von Neumann (1936) propusieron tiene dificultades técnicas para no ser un álgebra de Boole, lo que provoca problemas para retener la modularidad.

Ante la consideración del R_{OM} como una interpretación con dificultades para ser exitosa realizamos dos observaciones. Rédei (2009) explica que von Neumann no llegó a valorar satisfactoriamente sus resultados relativos a la lógica cuántica. Asimismo, la lógica ortocomplementada modular no representa un formalismo particularmente disruptivo ante el panorama actual de las lógicas no clásicas. La novedad de la lógica de Birkhoff & von Neumann (1936) presenta una ligera diferencia con respecto al álgebra de Boole con la propuesta de una versión débil de la identidad distributiva. Sin embargo, es indudable que “*One of the aspects of quantum theory which has attracted the most general attention, is the novelty of the logical notions which it presupposes*” (Birkhoff & von Neumann, 1936), lo cual mantiene abierta la investigación y ha motivado soluciones a las problemáticas discutidas dentro y fuera del enfoque reticular.

Conflicto de intereses

El autor declara que no existe conflicto de intereses en la publicación del artículo.

Referencias

- Aerts, D. (2009). Quantum Axiomatics. En Engesser, K., Gabbay, D.M. y Lehmann, D. (eds.) *Handbook of Quantum Logic and Quantum Structures*. Amsterdam: North-Holland, pp. 79-126.
- Birkhoff, G. (1935). Combinatorial Relations in Projective Geometries. *Annals of Mathematics*, 36(3), 743-748.
- Birkhoff, G. (1948). *Lattice Theory*. Nueva York: American Mathematical Society, pp. 1-283.
- Birkhoff, G. & von Neumann, J. (1936). The Logic of Quantum Mechanics. *Annals of Mathematics*, 37(4), 823-842.
- Dalla Chiara, M.L. & Giuntini, R. (2008). *Quantum Logics*. [arXiv.org > quant-ph > arXiv: quantph/0101028v2]
- Dalla Chiara, M.L., Giuntini, R., Rédei, M. (2007). The History of Quantum Logic. En Gabbay, D.M. y Woods, J. (eds.) *Handbook of the History of Logic: Volume 8: the Many Valued and Nonmonotonic Turn in Logic*. Amsterdam: North-Holland, pp. 205-283.
- Février, P. (1937). Les relations d'incertitude de Heisenberg et la logique. *Travaux du IXe Congrès International de Philosophie*, 6, 88-94.
- Grätzer, G. (2011). *Lattice Theory Foundation*. Birkhäuser. Basilea: Birkhäuser, pp. 1-613.
- Jammer, M. (1974). *The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of Quantum Mechanics in historical perspective*. Nueva York: Wiley, pp. 1-536.
- Jauch, J.M. (1968). *Foundations of Quantum Mechanics*. Addison-Wesley Publishing Company. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, pp. 1-299.
- Jordan, P. (1932). *Ueber eine Klasse nichtassoziativer hyperkomplexer Algebren*. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, pp. 569-575

-
- Mackey, G.W.** (1963). *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Nueva York: Benjamin, pp. 1-148.
- Piron, C.** (1964). Axiomatique Quantique. *Helvetica Physica Acta*, 37, 439-468.
- Popper, K.** (1968). Birkhoff and von Neumann's Interpretation of Quantum Mechanics. *Nature*, 219, 682-685.
- Rédei, M.** (2009). The Birkhoff-von Neumann Concept of Quantum Logic. En Engesser, K., Gabbay, D.M. y Lehmann, D. (eds.). *Handbook of Quantum Logic and Quantum Structures*. Amsterdam: North-Holland, pp. 1-22.
- Reichenbach, H.** (1944). *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics*. California: University of California Press, pp. 1-189.
- Segal, I.E.** (1947). Postulates for General Quantum Mechanics. *Annals of Mathematics*, 48(4), 930-948.
- van Fraassen, B.** (1974). *The Labyrinth of Quantum Logics*. En Cohen, R.S. y Wartofsky, M.W. (eds.) Boston Studies in the Philosophy of Science Vol. XIII. Logical and Epistemological Studies in Contemporary Physics. Dordrecht: Reidel Publishing Company, pp. 224-254.
- von Neumann, J.** (1932). *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlín: Springer-Verlag, pp. 1-262.

Artículo original

Resolviendo el problema de valores propios complementarios mediante un algoritmo cuasi-Newton

Solving the eigenvalue complementarity problem using a quasi-Newton algorithm

 Favián Arenas^{1,*},  Carlos Arias¹,  Rosana Pérez¹

¹Departamento de Matemáticas, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

Resumen

En este artículo consideramos el problema de valores propios complementarios, de gran interés para muchos investigadores por sus numerosas aplicaciones en Ingeniería y Física, y abordamos su solución como un problema de complementariedad no lineal usando un método cuasi-Newton, un tipo de método que, hasta donde conocemos, no ha sido utilizado para dicho fin. Verificamos que el problema satisface ciertas hipótesis que permiten utilizar un algoritmo global cuasi-Newton y realizamos pruebas numéricas que muestran la eficacia del algoritmo utilizado y lo hacen una buena alternativa de solución para problemas de valores propios complementarios.

Palabras clave: valores propios complementarios; problema de complementariedad no lineal; programación no lineal; cuasi-Newton.

Abstract

In this article we consider the complementarity eigenvalue problem, which is of great interest to many researchers due to its numerous applications in Engineering and Physics. We approach its solution as a nonlinear complementarity problem using a quasi-Newton method, a type of method that, as far as we know, has not been used for this purpose. We verify that the problem satisfies certain hypotheses that allow the use of a global quasi-Newton algorithm and we analyze its numerical performance. Numerical tests show the efficiency of the algorithm used and make it a good alternative to solve complementary eigenvalue problems.

Keywords: eigenvalue complementarity; nonlinear complementarity problem; nonlinear programming; quasi-Newton. AMS Subject Classification: 93B60; 90C30; 90C33.

Citación: Arenas F, Arias C, Pérez R. Resolviendo el problema de valores propios complementarios mediante un algoritmo cuasi-Newton. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):325-338, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1623>

Editor: Luis Español González

***Correspondencia:**

Favian Arenas; farenas@unicauca.edu.co

Recibido: 25 de enero de 2022

Aceptado: 6 de mayo de 2022

Publicado: 28 de junio de 2022



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

Introducción

Sean A y $B \in \mathbb{R}^{n \times n}$, con B una matriz definida positiva. El problema de Valores Propios Complementarios, abreviadamente $VPC(A, B)$, consiste en encontrar un escalar positivo λ y un vector $x \in \mathbb{R}^n$, no nulo, tal que

$$x \geq 0, \quad (\lambda B - A)x \geq 0, \quad x^T (\lambda B - A)x = 0. \quad (1)$$

Este problema tiene numerosas aplicaciones en ingeniería y física tales como, el estudio de la frecuencia de resonancia en estructuras y la estabilidad de sistemas dinámicos (**Pinto da Costa, Martins, Figueiredo, y Júdice**, 2004).

Una solución al problema $VPC(A, B)$ es un par (λ, \mathbf{x}) , donde λ es llamado un *valor propio complementario*, y \mathbf{x} es llamado *vector propio complementario* asociado a λ .

Como ocurre con los vectores propios convencionales, los vectores propios complementarios asociados a un valor propio complementario también forman un conjunto infinito, el cual es un cono convexo (**Iusem, Júdice, Sessa, y Sarabando**, 2019). Esto puede verse fácilmente con las siguientes matrices,

$$A = \begin{pmatrix} 18 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ y } B = \begin{pmatrix} 9 & 3 \\ 3 & 5 \end{pmatrix}.$$

En este caso, las soluciones del problema $VPC(A, B)$ son de la forma: $(\lambda_1, \mathbf{x}) = (2, (\alpha, 0)^T)$ y $(\lambda_2, \mathbf{x}) = (\frac{1}{5}, (0, \alpha)^T)$, con $\alpha > 0$. En efecto, si $\mathbf{x} = (x_1, x_2)^T$ entonces

$$\mathbf{x}^T (\lambda_B - A) \mathbf{x} = (9\lambda - 18)x_1^2 + 6x_1x_2 + (5\lambda - 1)x_2^2.$$

Teniendo en cuenta que $\mathbf{x} \geq 0$, tenemos que

- Si $\lambda = 2$ entonces $\mathbf{x}^T (\lambda_B - A) \mathbf{x} = 0$ si, y solo si $x_2 = 0$ y $x_1 \geq 0$.
- Si $\lambda = 1/5$ entonces $\mathbf{x}^T (\lambda_B - A) \mathbf{x} = 0$ si, y solo si $x_1 = 0$ y $x_2 \geq 0$.

Más aún, para los pares $(\lambda_1, \mathbf{x}) = (2, (\alpha, 0)^T)$ y $(\lambda_2, \mathbf{x}) = (\frac{1}{5}, (0, \alpha)^T)$, con $\alpha > 0$, es fácil verificar que $(\lambda_B - A) \mathbf{x} \geq 0$. Por lo tanto, son soluciones del $VPC(A, B)$.

Observe que, para cada valor propio hay infinitos vectores propios. Como es de esperarse, se prefiere un vector representante, como si fuera un “generador”. Con el fin de obtener este vector propio complementario, el problema $VPC(A, B)$, se puede transformar en el siguiente problema equivalente (**Facchinei y Pang**, 2003).

Dado $p > 0$ encontrar un escalar positivo λ y un vector $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ tal que

$$\mathbf{x} \geq 0, \quad (\lambda B - A) \mathbf{x} \geq 0, \quad \mathbf{x}^T (\lambda B - A) \mathbf{x} = 0, \quad \|\mathbf{x}\|_1 = p. \quad (2)$$

Por la no negatividad del vector \mathbf{x} , se tiene que $\|\mathbf{x}\|_1 = \sum_{k=1}^n x_k$, lo cual se puede expresar como $\mathbf{e}^T \mathbf{x}$, donde $\mathbf{e}^T = (1, 1, \dots, 1)$. Así, el problema (2) se transforma en

$$\mathbf{x} \geq 0, \quad (\lambda B - A) \mathbf{x} \geq 0, \quad \mathbf{x}^T (\lambda B - A) \mathbf{x} = 0, \quad \mathbf{e}^T \mathbf{x} = p \quad (3)$$

que llamaremos problema $VPC2(A, B)$.

El caso particular, en el cual las matrices A y B son simétricas, generalmente se analiza independientemente, ya que pueden aplicarse métodos especiales para su solución (**Iusem y cols.**, 2019); este tipo de problemas se les llama problema de valores propios complementarios simétrico. Cuando alguna de las matrices A o B no es simétrica, que es el caso más general, el problema es llamado no simétrico.

El problema $VPC(A, B)$ puede reformularse como un problema de minimización con restricciones de complementariedad (**Sherali y Tuncbilek**, 1992), como uno de minimización global (**Júdice, Sherali, y Ribeiro**, 2007) y como un problema de complementariedad no lineal (**Facchinei y Pang**, 2003). Nuestro interés está en esta última reformulación debido a que existen algoritmos competitivos, en particular, tipo *cuasi-Newton* que permiten resolver en forma eficiente problemas de complementariedad no lineal y no han sido utilizados, hasta donde conocemos, para resolver problemas de valores propios complementarios.

En este artículo, consideramos el problema de los valores propios complementarios y su reformulación como un problema de complementariedad no lineal. Verificamos que este

problema satisface ciertas hipótesis que permiten usar un algoritmo global cuasi-Newton propuesto en (Arias, Martínez, y Pérez, 2017) para resolver problemas de complementariedad no lineal en general. Implementamos dicho algoritmo adaptándolo al caso particular de los valores propios complementarios y realizamos un análisis numérico de su desempeño. Pruebas numéricas preliminares indican que es una buena alternativa para resolver dichos problemas.

El resto de este documento está organizado de la siguiente forma: en la siguiente sección, se reformula el problema de valores propios complementarios como uno de complementariedad no lineal, se mencionan métodos numéricos tradicionales para resolverlo y se introduce el algoritmo cuasi-Newton global que se usará para resolver indirectamente el VPC(A,B), luego, se verifica que el problema de valores propios complementarios satisface las hipótesis necesarias para que el algoritmo utilizado converja, posteriormente, se incluyen las pruebas numéricas que se realizaron para analizar la eficacia de esta estrategia y finalmente, se presentan algunos comentarios sobre el trabajo realizado.

Reformulación del VPC(A,B) como un problema de complementariedad no lineal

En general, dada $F: \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}^{n+1}$, $F(\mathbf{y}) = (F_1(\mathbf{y}), \dots, F_{n+1}(\mathbf{y}))^T$, continuamente diferenciable, el Problema de Complementariedad No Lineal consiste en encontrar un vector $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{n+1}$ que satisfaga las tres condiciones siguientes,

$$\mathbf{y} \geq 0, \quad F(\mathbf{y}) \geq 0, \quad \mathbf{y}^T F(\mathbf{y}) = 0. \tag{4}$$

Veamos a continuación que, en efecto, el problema $VPC2(A,B)$ puede reformularse como un problema de complementariedad no lineal.

A partir de (3), $VPC2(A,B)$ puede expresarse de la siguiente forma (Júdice y cols., 2007): hallar $\lambda > 0$ y $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ tal que

$$\mathbf{x} \geq 0, \quad \left(B - \frac{1}{\lambda} A \right) \mathbf{x} \geq 0, \quad \mathbf{x}^T (\lambda B - A) \mathbf{x} = 0, \quad \mathbf{e}^T \mathbf{x} = p.$$

Haciendo un cambio de variable, se definen $F: \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}^{n+1}$ y $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{n+1}$ tales que,

$$y_i = \begin{cases} x_i, & \text{si } 1 \leq i \leq n \\ \frac{1}{\lambda}, & \text{si } i = n + 1, \end{cases} \quad F(\mathbf{y}) = \begin{cases} [B - y_{n+1}A]_i \mathbf{x}, & \text{si } 1 \leq i \leq n \\ \mathbf{e}^T \mathbf{x} - p, & \text{si } i = n + 1, \end{cases} \tag{5}$$

con lo cual, el problema $VPC2(A,B)$, es de la forma (4); es decir, es un problema de complementariedad lineal.

Una estrategia de solución para problemas de complementariedad no lineal, tal vez, la más popular y ampliamente usada, consiste en reformularlo como un sistema de ecuaciones no lineales mediante ciertas funciones especiales, $\varphi: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, llamadas *funciones de complementariedad* (Yong, 2010) que satisfacen la equivalencia, $\varphi(a,b) = 0 \iff a \geq 0, b \geq 0, ab = 0$.

En este artículo usaremos la familia de funciones de complementariedad introducida en (Kanzow y Kleinmichel, 1998), y definida por,

$$\varphi_\tau(a,b) = \sqrt{(a-b)^2 + \tau ab} - a - b, \quad \tau \in (0,4), \tag{6}$$

la cual ha resultado competitiva en la reformulación de problemas de complementariedad (Arenas, Martínez, y Pérez, 2014) (Pérez, Arenas, Martínez, y Arias, 2019). Así, la reformulación del problema de valores propios complementarios puede, a su vez, reformularse

como el siguiente sistema de ecuaciones no lineales no diferenciable

$$\Phi_{\tau}(\mathbf{y}) = \begin{pmatrix} \varphi_{\tau}(y_1, F_1(\mathbf{y})) \\ \vdots \\ \varphi_{\tau}(x_{n+1}, F_{n+1}(\mathbf{y})) \end{pmatrix} = \mathbf{0}. \quad (7)$$

Este sistema se puede resolver mediante un método tipo *Newton* generalizado (**Ferris y Pang**, 1997; **Facchinei y Pang**, 2003; **Kanzow y Kleinmichel**, 1998) o *cuasi-Newton* (**Arenas y cols.**, 2014; **Arias y cols.**, 2017), entre otros (**Arenas, Martínez, y Pérez**, 2020; **Sánchez, Pérez, y Martínez**, 2021). En el primer caso, la iteración básica, es de la forma

$$\mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{y}_k - H_k^{-1} \Phi_{\tau}(\mathbf{y}_k),$$

donde $H_k \in \partial \Phi_{\tau}(\mathbf{y}_k)$, es decir B_k es una matriz en el jacobiano generalizado de Φ_{τ} en \mathbf{y}_k (**Clarke**, 1975). En el caso, de un método *cuasi-Newton*, la iteración básica, es de la forma

$$\mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{y}_k - B_k^{-1} \Phi_{\tau}(\mathbf{y}_k),$$

donde $B_k \approx H_k \in \partial \Phi_{\tau}(\mathbf{y}_k)$.

Por otra parte, con el fin de globalizar este tipo de algoritmos que resuelven sistemas de ecuaciones no lineales como el planteado en (7), se introduce una función de mérito y se resuelve un problema de minimización (**Dennis y Schnabel**, 1996). La función de mérito natural y ampliamente usada es Ψ_{τ} definida por $\Psi_{\tau}(\mathbf{y}) = \frac{1}{2} \Phi_{\tau}(\mathbf{y})^T \Phi_{\tau}(\mathbf{y})$, y el problema de minimización es el siguiente:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar} && \Psi_{\tau}(\mathbf{y}). \\ & \mathbf{y} \in \mathbb{R}^{n+1} \end{aligned} \quad (8)$$

En (**Arias y cols.**, 2017), los autores proponen un algoritmo global *cuasi-Newton*, concretamente un algoritmo *secante de cambio mínimo*, para resolver problemas de complementariedad no lineal, como el problema (8), el cual usa búsqueda lineal como estrategia de globalización. Este algoritmo mostró resultados excelentes al ser probado con funciones de difícil comportamiento numérico. Por ello, consideramos que es la mejor opción para resolver el problema $VPC(A, B)$ vía la reformulación como un problema de complementariedad no lineal. En la experimentación numérica, presentamos más detalles de este algoritmo; en lo que sigue, nos referiremos a él como **Algoritmo 1**.

Verificación de hipótesis

El **Algoritmo 1** converge con tasa superlineal, y esta convergencia está condicionada a que satisfaga las siguientes hipótesis:

H.1 Existe una solución \mathbf{y}^* del sistema $\Phi_{\tau}(\mathbf{y}) = \mathbf{0}$.

H.2 Las funciones F_i son continuamente diferenciables y su gradiente es una función semi-suave.

H.3 La matriz jacobiana de F es *Lipschitz* continua en una vecindad de \mathbf{y}^* .

A continuación, analizaremos hasta qué punto la función F satisface las hipótesis que requiere el **Algoritmo 1** para alcanzar la convergencia. Para ello, usamos (5) y deducimos que la matriz Jacobiana de F , está dada por

$$F'(\mathbf{y}) = \begin{bmatrix} B - y_{n+1}A & -A\mathbf{x} \\ \mathbf{e}^T & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Estas expresiones nos facilitarán la verificación de las hipótesis que garantizan la viabilidad del **Algoritmo 1** para este problema particular.

H.1 En general, para determinar si un problema de complementariedad tiene solución, bastaría verificar que la función que define el problema es estrictamente monótona (Ferris y Pang, 1997); sin embargo, para el problema (4) con F definida en (5), este camino conduce a imponer condiciones muy fuertes sobre A y B para garantizar la monotonía de F y con ello, la solución al problema.

Una alternativa para garantizar la existencia de al menos una solución del problema $VPC(A, B)$ es imponer condiciones menos restrictivas sobre A y B . Esto fue hecho en (Queiroz, Júdice, y Humes, 2004), donde los autores demuestran que, si todas las componentes de A son positivas y $B = I_n$, el problema $VPC(A, B)$ tiene solución. Adicionalmente, si A es simétrica la solución es única. Este resultado, nos permite verificar la hipótesis **H1** y diseñar experimentos numéricos, como veremos más adelante.

Vale la pena mencionar que la cantidad máxima de soluciones que puede tener el problema $VPC(A, B)$ es $n2^{n-1}$ (Seeger, 1999).

H.2 Las funciones F_i son diferenciables. En efecto, cuando $1 \leq i \leq n$, su respectivo gradiente está dado por

$$\nabla F_i(\mathbf{y}) = \begin{pmatrix} B_{i1} + y_{n+1}A_{i1} \\ \vdots \\ B_{in} + y_{n+1}A_{in} \\ -A_{i1}y_1 - \dots - A_{in}y_n \end{pmatrix}$$

y, para $n + 1$, el $\nabla F_i(\mathbf{y})$ es el vector de unos de $n + 1$ componentes. Cada uno diferenciable, con además para $1 \leq i \leq n$

$$\nabla^2 F_i(\mathbf{y}) = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & A_{i1} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & A_{in} \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

y, para $i = n + 1$, la $\nabla^2 F_i(\mathbf{y})$ es la matriz nula de orden $n + 1$. Esto demuestra que cada gradiente ∇F_i es continuamente diferenciable; por lo tanto, es también una función semisuave¹.

H.3 Probemos que F' es Lipschitz continua en todo su dominio. Sean $\mathbf{y}, \mathbf{z} \in \mathbb{R}^{n+1}$ de tal forma que

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ y_{n+1} \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{w} \\ z_{n+1} \end{bmatrix}$$

Considérese la diferencia

$$\begin{aligned} \|F'(\mathbf{y}) - F'(\mathbf{z})\|_1 &= \left\| \begin{bmatrix} (B - y_{n+1}A) & -A\mathbf{x} \\ \mathbf{e}^T & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (B - z_{n+1}A) & -A\mathbf{w} \\ \mathbf{e}^T & 0 \end{bmatrix} \right\|_1 \\ &= \left\| \begin{bmatrix} (z_{n+1} - y_{n+1})A & -A(\mathbf{x} - \mathbf{w}) \\ 0^T & 0 \end{bmatrix} \right\|_1 \\ &= \max \{ \|(z_{n+1} - y_{n+1})A\|_1, \| -A(\mathbf{x} - \mathbf{w}) \|_1 \} \end{aligned}$$

¹Sea $G: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ una función localmente Lipschitz continua, se dice que G es semisuave en $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, si G en \mathbf{x} es direccionalmente diferenciable y,

$$G(\mathbf{x} + h) - G(\mathbf{x}) - Hh = o(\|h\|)$$

para todo $H \in \partial_C G(\mathbf{x} + h)$ cuando $h \rightarrow 0$.

Caso 1. Si $\max\{\|(z_{n+1} - y_{n+1})A\|_1, \|-A(\mathbf{x} - \mathbf{w})\|_1\} = \|(z_{n+1} - y_{n+1})A\|_1$

$$\begin{aligned}\|F'(\mathbf{y}) - F'(\mathbf{z})\|_1 &= \|(z_{n+1} - y_{n+1})A\|_1 \\ &= |y_{n+1} - z_{n+1}| \|A\|_1 \\ &\leq \|A\|_1 (|y_{n+1} - z_{n+1}| + \|\mathbf{x} - \mathbf{w}\|_1) \\ &\leq \|A\|_1 \|\mathbf{y} - \mathbf{z}\|_1.\end{aligned}$$

Caso 2. Si $\max\{\|(z_{n+1} - y_{n+1})A\|_1, \|-A(\mathbf{x} - \mathbf{w})\|_1\} = \|-A(\mathbf{x} - \mathbf{w})\|_1$

$$\begin{aligned}\|F'(\mathbf{y}) - F'(\mathbf{z})\|_1 &= \|-A(\mathbf{x} - \mathbf{w})\|_1 \\ &\leq \|A\|_1 \|\mathbf{x} - \mathbf{w}\|_1 \\ &\leq \|A\|_1 (\|\mathbf{x} - \mathbf{w}\|_1 + |y_{n+1} - z_{n+1}|) \\ &\leq \|A\|_1 \|\mathbf{y} - \mathbf{z}\|_1,\end{aligned}$$

por lo tanto, F' es *Lipschitz* continua con constante $\|A\|_1$.

Al satisfacer de manera razonable las hipótesis del algoritmo, se procede a mostrar los resultados numéricos.

Experimentación numérica

En esta sección, resolvemos numéricamente la reformulación del problema $VPC2(A, B)$ como un problema de complementariedad no lineal, el cual a su vez, lo hemos reformulado como el problema de minimización (8). Para ello usaremos el algoritmo propuesto en (Arias y cols., 2017), el cual hemos denominado en este documento **Algoritmo 1**. Este es un algoritmo cuasi-Newton, exactamente secante de cambio mínimo (Martínez, 1992), globalizado mediante una estrategia de búsqueda lineal (Dennis y Schnabel, 1996). Para mayor claridad en la lectura de este documento lo incluimos a continuación.

Algoritmo 1 Cuasi Newton

Entrada: vector inicial $y_0 \in \mathbb{R}^{n+1}$; ε : tolerancia; N : número máximo de iteraciones.

Salida: vector solución $y^* \in \mathbb{R}^{n+1}$ o mensaje de error.

$k \leftarrow 0$

Calcule $B_k \in \partial\Phi_\tau(y_k)$ como en (15) de (Arenas, Martínez, y Pérez, 2015).

mientras $\|B_k\Phi_\tau(y_k)\| < \varepsilon$ o $k < N$ **hacer**

si el sistema $B_k d_k = -\Phi_\tau(y_k)$ tiene solución **entonces**

 calcular d_k del sistema $B_k d_k = -\Phi_\tau(y_k)$

si no

$d_k \leftarrow B_k \Phi_\tau(y_k)$

fin si

mientras $\Psi_\tau(y_k + \alpha d_k) \leq \Psi_\tau(y_k) + \sigma \alpha \Phi_\tau(y_k)^T B_k^T d_k$ **hacer**

$\alpha \leftarrow \frac{1}{2} \alpha$

fin mientras

$y_k \leftarrow y_k + \alpha d_k$

$s_k \leftarrow \alpha d_k$

$z_k \leftarrow \Psi_\tau(y_{k+1}) - \Psi_\tau(y_k)$

$A_{k+1} \leftarrow Actualizar(A_k, y_k, s_k, z_k, op)$ mediante el **Algoritmo 2**.

$k \leftarrow k + 1$

fin mientras

devolver y_k

El **Algoritmo 1**, hace un llamado al **Algoritmo 2**, que selecciona la actualización secante, que actualizará la matriz B_k y que será usada en la siguiente iteración. Las actualizaciones que consideraremos son las siguientes: buena de *Broyden* (**Broyden**, 1965), mala de *Broyden* (**Brown y Saad**, 1994), *Schubert* (**Schubert**, 1970), *COLUM* (**Martínez**, 2000) e *ICUM* (**Martínez**, 1992).

Algoritmo 2 Función Actualizar

Entrada: $A_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$, vectores $\mathbf{x}_k, \mathbf{s}_k, \mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^{n+1}$, el método: *op*

Salida: $A_{k+1} \in \mathbb{R}^{n \times n}$,

si $op = 1$ **entonces**

Actualización buena de *Broyden* (**Broyden**, 1965)

$$\Delta \leftarrow \frac{(\mathbf{y}_k - A_k \mathbf{s}_k) \mathbf{s}_k^T}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{s}_k}$$

si no, **si** $op = 2$ **entonces**

Actualización mala de *Broyden* (**Brown y Saad**, 1994)

$$\Delta \leftarrow \frac{(\mathbf{y}_k - A_k \mathbf{s}_k) \mathbf{y}_k^T A_k}{\mathbf{y}_k^T A_k \mathbf{s}_k}$$

si no, **si** $op = 3$ **entonces**

Actualización de *Schubert* (**Schubert**, 1970)

$$\Delta \leftarrow \frac{F(\mathbf{x}_{k+1}) \mathbf{s}_k^T}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{s}_k}$$

si no, **si** $op = 4$ **entonces**

Actualización de *COLUM* (**Martínez**, 2000). Sea j tal que $\|\mathbf{s}_k\|_\infty = |[\mathbf{s}_k]_j|$

$$\Delta \leftarrow \frac{(\mathbf{y}_k - A_k \mathbf{s}_k) \mathbf{e}_{jk}^T}{\mathbf{e}_{jk}^T \mathbf{s}_k}$$

si no, **si** $op = 5$ **entonces**

Actualización de *ICUM* (**Martínez**, 1992). Sea j tal que $\|\mathbf{y}_k\|_\infty = |\mathbf{e}_{jk}^T \mathbf{y}_k|$

$$\Delta \leftarrow \frac{(\mathbf{y}_k - A_k \mathbf{s}_k) \mathbf{e}_{jk}^T A_k}{\mathbf{e}_{jk}^T A_k \mathbf{s}_k}$$

fin si

$A_{k+1} \leftarrow A_k + \Delta$

devolver A_k

Se consideró como algoritmo para hacer las comparaciones respectivas el método de *Newton* generalizado, el cual llamaremos **Algoritmo 3**, y lo incluimos a continuación para claridad en la lectura de la sección. Por supuesto, aprovechamos la estructura del jacobiano de F indicada en (9) ya que, no es muy costosa su evaluación, ni su implementación.

Algoritmo 3 *Newton* generalizado**Entrada:** vector inicial $y_0 \in \mathbb{R}^{n+1}$; ε : tolerancia; N : número máximo de iteraciones.**Salida:** vector solución $y^* \in \mathbb{R}^{n+1}$ o mensaje de error. $k \leftarrow 0$ Calcule $H_k \in \partial\Phi_\tau(y_k)$ como en (14) de (Arenas y cols., 2015).**mientras** $\|H_k\Phi_\tau(y_k)\| < \varepsilon$ o $k < N$ **hacer****si** el sistema $H_k d_k = -\Phi_\tau(y_k)$ tiene solución **entonces**calcular d_k del sistema $H_k d_k = -\Phi_\tau(y_k)$ **si no** $d_k \leftarrow H_k\Phi_\tau(y_k)$ **fin si****mientras** $\Psi_\tau(y_k + \alpha d_k) \leq \Psi_\tau(y_k) + \sigma\alpha\Phi_\tau(y_k)^T H_k^T d_k$ **hacer** $\alpha \leftarrow \frac{1}{2}\alpha$ **fin mientras** $y_k \leftarrow y_k + \alpha d_k$ $k \leftarrow k + 1$ Calcule $H_k \in \partial\Phi_\tau(y_k)$ como en (14) de (Arenas y cols., 2015).**fin mientras****devolver** y_k **Construcción de los problemas**

Para construir los problemas $VPC(A, B)$ usamos el lineamiento descrito en (Júdice y cols., 2007); es decir, dos categorías de problemas: simétricos y no simétricos; en todos, la matriz B es la identidad de tamaño $n \times n$. La matriz A se construye como se indica en la **Tabla 1**, donde *Escala* significa el valor más grande que puede tomar cada componente de A , $randn(n)$ es una matriz aleatoria de tamaño $n \times n$ y p está dado por (3), generando un total de ocho configuraciones de parámetros.

Tabla 1. Selección de las matrices A y B en la experimentación.

Tipo de problema	p	Escala	A	B
Simétrico	1 y 6	1 y 50	$V = Escala \times randn(n)$	I_n
			$U = triu(V)$	
			$A = U + U^T$	
No simétrico	1 y 6	1 y 50	$A = Escala \times randn(n)$	I_n

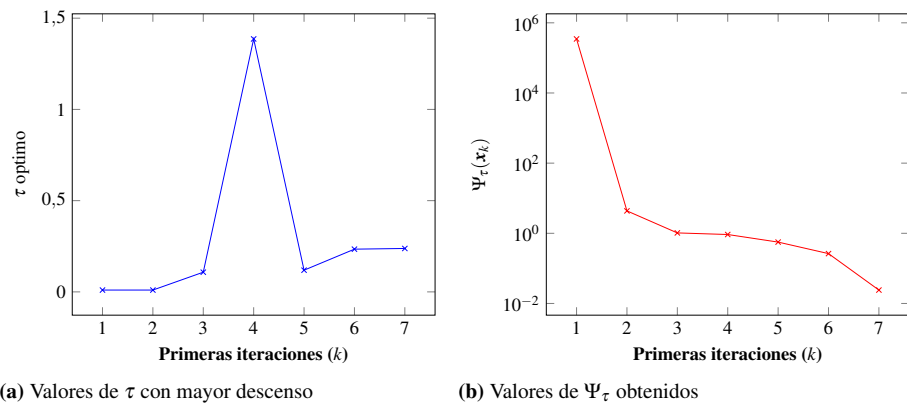
Para escribir los códigos de los algoritmos y de las funciones objetivo de cada problema usamos el software MATLAB[®]. Realizamos las pruebas numéricas en un computador Intel (R) Core (TM) i7-9700F CPU de 3.00 GHz.

Experimento preliminar

Uno de los interrogantes planteados antes de comenzar la experimentación fue el siguiente, ¿cuál es el valor de τ adecuado para la función φ_τ definida en (6)? En (Kanzow y Kleinmichel, 1998) se presentó un algoritmo dinámico para variar τ con buenos resultados, sin embargo, en el caso particular del problema $VPC(A, B)$, en pruebas preliminares no se obtuvo un decrecimiento eficaz, al compararlo con el valor de $\tau = 2$ estático, el cual es un valor muy utilizado en funciones de complementariedad, esto llevó a diseñar el siguiente experimento.

Encontrar en cada paso el valor de τ en el cual se pueda obtener el mayor decrecimiento de

la función objetivo Ψ_τ . Para ello, se utilizaron diferentes valores de τ desde 0.01 hasta 3.99 y se seleccionó para cada paso aquel valor de τ en que se obtuvo el máximo descenso de Ψ_τ utilizando el método de *Newton* generalizado. Luego se repitió esta experiencia 10000 veces, los promedios de los 9110 ejecuciones exitosas se muestran en la **Figura 1**.



(a) Valores de τ con mayor descenso **(b)** Valores de Ψ_τ obtenidos

Figura 1. Valores de τ que producen mayor decrecimiento y su respectivo $\Psi_\tau(x_k)$ en las primeras 7 iteraciones.

Podemos observar que el mayor decrecimiento se obtiene en las primeras 3 iteraciones, en los cuales λ toma valores muy pequeños, es por ello que hemos decidido realizar todos los experimentos con un valor de $\lambda = 10^{-2}$.

Experimento principal

Realizamos para cada valor de n , cada valor de *Escala* y cada valor de p , 1000 ejecuciones; en cada ejecución se generó aleatoriamente un problema. El punto inicial y_0 también se generó aleatoriamente con el comando *randn*($n + 1, 1$). Cada uno de estos problemas, se resolvió con los algoritmos 1 y 2 respectivamente.

Los resultados más relevantes obtenidos en esta experimentación, se presentan en las **Tablas 2 a 4**, donde n , es el tamaño de las matrices A y B , p , es el valor de la constante dada en (3); *escala*, es el valor más grande que puede tener cada componente de la matriz A ; en cada una de las actualizaciones **E**, indica el porcentaje de éxitos con cada una de las actualizaciones; es decir, el número de veces que se obtuvo convergencia entre 1000 expresado como porcentaje; **Iter**, indica el promedio de iteraciones redondeado a un entero de las ejecuciones que tuvieron éxito; finalmente, **tiempo** indica el promedio de tiempo CPU redondeado a cuatro decimales en las ejecuciones que tuvieron éxito.

Tabla 2. Caso asimétrico con $p = 1$ y $Escala = 1$.

		<i>Newton</i>			<i>Broyden B</i>			<i>Broyden M</i>		
n	p	E	Iter	tiempo	E	Iter	tiempo	E	Iter	tiempo
2	1	97.1	16	0.0012	85.1	23	0.0016	27.9	10	0.0003
3	1	99.1	14	0.0009	91.4	24	0.0017	28.1	12	0.0003
4	1	99.4	13	0.0008	91.1	22	0.0014	24.2	13	0.0004
5	1	99.5	12	0.0007	90.8	24	0.0016	24.9	14	0.0004
10	1	99.7	13	0.0009	92.1	34	0.0025	17.9	18	0.0006
20	1	99.7	16	0.0015	89.1	56	0.0063	9.9	22	0.0011
30	1	99.9	20	0.0026	85.6	70	0.0098	8.3	24	0.0016
50	1	98.1	23	0.0052	72.5	105	0.0246	5.1	27	0.0030
100	1	92.5	26	0.0297	47.3	123	0.1364	2.1	31	0.0207
		<i>Schubert</i>			COLUM			ICUM		
n	p	E	Iter	tiempo	E	Iter	tiempo	E	Iter	tiempo
2	1	35.7	13	0.0007	76.9	21	0.0017	34.7	9	0.0003
3	1	33.4	15	0.0008	80.3	19	0.0013	30.2	11	0.0004
4	1	33.8	16	0.0007	77.5	19	0.0012	28.8	11	0.0004
5	1	32.0	17	0.0007	74.7	22	0.0015	24.2	13	0.0004
10	1	17.9	26	0.0019	52.0	27	0.0018	13.1	15	0.0006
20	1	5.9	41	0.0043	21.0	30	0.0024	8.5	17	0.0010
30	1	2.5	47	0.0073	14.5	31	0.0033	7.1	18	0.0013
50	1	0.7	39	0.0068	7.4	33	0.0061	4.0	20	0.0024
100	1	0.1	27	0.0254	4.5	36	0.0418	2.5	19	0.0138

En los resultados presentados en la **Tabla 2** se destacan las actualizaciones *Broyden M*. e ICUM por su rapidez de convergencia, sin embargo, tienen poco éxito, por lo cual afirmamos que no son muy efectivas al tomar valores iniciales aleatorios, si el problema tuviese una forma de iniciar el algoritmo en una vecindad pequeña de la solución esta falencia pudiera ser superada. Por otro lado, los métodos de *Newton* generalizado y *Broyden B* son los métodos más eficaces para este caso no simétrico con valores pequeños de las entradas de la matriz *A*.

Tabla 3. Caso asimétrico con $p = 6$ y $Escala = 50$.

		<i>Newton</i>			<i>Broyden B</i>			<i>Broyden M</i>		
n	p	E	Iter	tiempo	E	Iter	tiempo	E	Iter	tiempo
2	6	77.4	14	0.0007	24.0	54	0.0030	0.8	18	0.0013
3	6	78.6	14	0.0006	10.0	59	0.0047	1.1	18	0.0012
4	6	80.6	14	0.0007	4.4	59	0.0050	0.6	35	0.0031
5	6	81.1	14	0.0007	2.7	42	0.0033	1.3	24	0.0024
10	6	82.4	14	0.0008	1.7	41	0.0035	0.8	54	0.0064
20	6	84.5	15	0.0012	0.5	81	0.0129	0.5	42	0.0067
30	6	82.9	16	0.0017	0.4	106	0.0246	0.2	51	0.0088
50	6	83.3	17	0.0030	0.5	107	0.0327	0.4	75	0.0293
100	6	86.9	19	0.0178	1.3	52	0.0793	0.3	101	0.1431
		<i>Schubert</i>			COLUM			ICUM		
n	p	E	Iter	tiempo	E	Iter	tiempo	E	Iter	tiempo
2	6	0.7	23	0.0021	34.9	49	0.0040	0.4	20	0.0012
3	6	0.0	-	-	15.4	66	0.0056	0.5	11	0.0004
4	6	0.2	50	0.0056	7.5	50	0.0037	0.4	12	0.0004
5	6	0.5	15	0.0004	3.3	56	0.0044	0.1	12	0.0004
10	6	0.1	17	0.0007	1.1	27	0.0015	0.2	18	0.0007
20	6	0.2	13	0.0006	0.7	29	0.0018	0.1	22	0.0011
30	6	0.0	-	-	0.3	13	0.0010	0.2	13	0.0009
50	6	0.4	25	0.0031	0.0	-	-	0.0	-	-
100	6	0.0	-	-	0.1	40	0.0361	0.0	-	-

Los resultados de la **Tabla 3** muestran que el método más eficiente en el caso no simétrico con entradas menores o iguales que 50, sigue siendo el método de *Newton* generalizado, seguido por la actualización de *Broyden B* también la actualización ICUM es la que converge más rápidamente, aunque tiene poco éxito.

Tabla 4. Caso simétrico con $p = 1$ y $Escala = 1$.

		Newton			Broyden B			Broyden M		
n	p	E	Iter	tiempo	E	Iter	tiempo	E	Iter	tiempo
2	1	100.0	13	0.0032	90.0	21	0.0017	50.0	10	0.0003
3	1	100.0	14	0.0009	90.0	17	0.0009	20.0	9	0.0002
4	1	100.0	10	0.0004	90.0	34	0.0035	0.0	-	-
5	1	100.0	10	0.0004	90.0	29	0.0018	20.0	14	0.0004
10	1	100.0	16	0.0010	100.0	44	0.0042	10.0	15	0.0005
20	1	100.0	40	0.0055	80.0	46	0.0047	0.0	-	-
30	1	100.0	32	0.0052	60.0	68	0.0091	0.0	-	-
50	1	90.0	42	0.0115	70.0	116	0.0302	20.0	28	0.0033
100	1	70.0	17	0.0109	30.0	160	0.1602	0.0	-	-
		Schubert			COLUM			ICUM		
n	p	E	Iter	tiempo	E	Iter	tiempo	E	Iter	tiempo
2	1	30.0	17	0.0017	70.0	23	0.0024	30.0	6	0.0014
3	1	10.0	7	0.0002	70.0	23	0.0017	70.0	11	0.0004
4	1	0.0	-	-	50.0	16	0.0006	30.0	14	0.0005
5	1	30.0	14	0.0004	60.0	27	0.0015	30.0	12	0.0004
10	1	10.0	16	0.0005	50.0	70	0.0114	10.0	23	0.0008
20	1	0.0	-	-	20.0	23	0.0018	0.0	-	-
30	1	0.0	-	-	10.0	18	0.0015	10.0	26	0.0022
50	1	0.0	-	-	10.0	21	0.0026	0.0	-	-
100	1	0.0	-	-	0.0	-	-	0.0	-	-

De la **Tabla 4** deducimos que para el caso simétrico, el método de *Newton* generalizado es el más indicado, por efectividad y eficiencia, en contraste, el método de *Shubert* no parece ser recomendable para problemas de tamaño mayor a 5. También llama la atención que en muchos casos no se alcanza la convergencia en algunos métodos cuasi-*Newton*, salvo el método *Broyden Bueno*, que es muy confiable.

Comentarios finales

En este artículo, utilizamos un método cuasi-*Newton* para resolver el problema de valores propios complementarios basado en su reformulación como un problema de complementariedad no lineal. Un método de este tipo es una buena alternativa cuando las derivadas del sistema son muy costosas o difíciles de obtener. Particularmente en este caso no es muy costoso su cómputo, aún así, por las valiosas aplicaciones que tiene el reducir el tiempo de ejecución es un incentivo para utilizar esta propuesta.

Como pudimos verificar en los resultados de las pruebas numéricas, la cantidad de experimentos numéricos que se hicieron fue bastante amplia, por lo cual podemos concluir que los métodos cuasi-*Newton* aplicados a este problema pueden ser competitivos frente al método de *Newton* generalizado, especialmente el método de *Broyden Bueno*. Por otro lado también observamos que al aumentar la dimensión del problema el número de éxito se reduce considerablemente, creemos que la razón de este fenómeno es que la norma del vector solución es igual a p y al ser muy pequeño (1 o 6) y la dimensión muy grande, obliga a que cada componente del vector solución sea casi cero, lo cual genera problemas de estabilidad en el algoritmo.

Por otro lado, en cuanto a la selección del “mejor” valor de τ en (6) todavía que da mucho por hacer. Dicho lo anterior concluimos que este algoritmo es una buena alternativa, pues el costo computacional es menor en comparación con el método de *Newton* generalizado.

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad del Cauca por brindar tiempo para este trabajo a través del proyecto de investigación VRI ID 5247 y a los árbitros anónimos por las sugerencias constructivas lo cual nos permitió mejorar la presentación de este artículo.

Contribución de los autores

FA: programación, diseño de experimentos, análisis de resultados, discusión y conclusiones; CA: Construcción y desarrollo de la propuesta de investigación, análisis de resultados; RP: Organización de la información, análisis de resultados, revisión de forma y contenido del documento, discusión y conclusiones.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses con respecto al contenido de este artículo.

Referencias

- Arenas, F., Martínez, H. J., y Pérez, R. (2014). Redefinición de la función de complementariedad de Kanzow. *Revista de Ciencias*, 18(2), 111-122. doi: 10.25100/rc.v18i2.6105
- Arenas, F., Martínez, H. J., y Pérez, R. (2015). Least change secant update methods for nonlinear complementarity problem. *Ingeniería y Ciencia*, 11(21), 11-36. doi: 10.17230/ingciencia.11.21.1
- Arenas, F., Martínez, H., y Pérez, R. (2020, May). A local jacobian smoothing method for solving nonlinear complementarity problems. *Universitas Scientiarum*, 25(1), 149-174. doi: 10.11144/Javeriana.SC25-1.aljs
- Arias, C., Martínez, H., y Pérez, R. (2017). A nonsmooth global cuasi-newton method for nonlinear complementarity problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 13(1), 1-15.
- Brown, P. N., y Saad, Y. (1994). Convergence theory of nonlinear Newton–Krylov algorithms. *SIAM Journal on Optimization*, 4(2), 297-330.
- Broyden, C. G. (1965). A Class of Methods for Solving Nonlinear Simultaneous Equations. *Mathematics of Computation*, 19(92), 577-593.
- Clarke, F. H. (1975). Generalized gradients and applications. *Transactions of the american society*, 205(1), 247-262.
- Dennis, J. E., y Schnabel, R. B. (1996). *Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Facchinei, F., y Pang, J. (2003). *Finite-dimensional variational inequalities and complementarity problems* (Vol. II; Springer, Ed.). Springer-Verlag. doi: 10.1007/b97544
- Ferris, M. C., y Pang, J. S. (1997). Engineering and economic applications of complementarity problems. *SIAM Review*, 39(1), 669-713.
- Iusem, A. N., Júdice, J. J., Sessa, V., y Sarabando, P. (2019). Splitting methods for the eigenvalue complementarity problem. *Optimization Methods and Software*, 34(6), 1184-1212. doi: 10.1080/10556788.2018.1479408
- Júdice, J. J., Sherali, H. D., y Ribeiro, I. (2007). The eigenvalue complementarity problem. *Computational Optimization and Applications*, 37(2), 139-156. doi: 10.1007/s10589-007-9017-0
- Kanzow, C., y Kleinmichel, H. (1998). A new class of semismooth Newton-type methods for nonlinear complementarity problems. *Computational Optimization and Applications*, 11(3), 227-251. doi: 10.1023/A:1026424918464
- Martínez, J. M. (1992). On the relation between two local convergence theories of least change secant update methods. *Mathematics of Computation*, 59(200), pp. 457-481.
- Martínez, J. M. (2000). Practical quasi-Newton methods for solving nonlinear systems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 124(1), 97-121. (Numerical Analysis 2000. Vol. IV: Optimization and Nonlinear Equations) doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-0427\(00\)00434-9](https://doi.org/10.1016/S0377-0427(00)00434-9)
- Pérez, R., Arenas, F., Martínez, H., y Arias, C. (2019). *El problema de complementariedad no lineal* (Vol. 1). Programa editorial Universidad del Valle.

- Pinto da Costa, A., Martins, J., Figueiredo, I. N., y Júdice, J.** (2004). The directional instability problem in systems with frictional contacts. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193(3), 357-384. doi: 10.1016/j.cma.2003.09.013
- Queiroz, M., Júdice, J., y Humes, C. J.** (2004). The symmetric eigenvalue complementarity problem. *Mathematics of Computation*, 73(248), 1849-1863.
- Schubert, L. K.** (1970). Modification of a quasi-Newton method for nonlinear equations with a sparse jacobian. *Mathematics of Computation*, 24, 27-30.
- Seeger, A.** (1999). Eigenvalue analysis of equilibrium processes defined by linear complementarity conditions. *Linear Algebra and its Applications*, 292(1), 1-14. doi: [https://doi.org/10.1016/S0024-3795\(99\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S0024-3795(99)00004-X)
- Sherali, H. D., y Tuncbilek, C. H.** (1992). A global optimization algorithm for polynomial programming problems using a reformulation-linearization technique. *Journal of Global Optimization*, 2, 101-112. doi: 10.1007/BF00121304
- Sánchez, W., Pérez, R., y Martínez, H.** (2021). Un algoritmo global con jacobiano suavizado para problemas de complementariedad no lineal. *Revista integración, temas de matemáticas*, 39(2), 191-215. doi: 10.18273/revint.v39n2-20210004
- Yong, L.** (2010). Nonlinear complementarity problem and solution methods. En *Proceedings of the 2010 international conference on artificial intelligence and computational intelligence: Part i* (p. 461-469). Springer-Verlag.

Original article

Multifunctional nanostructured platform for sequential release of therapeutic molecules

Plataforma multifuncional nanoestructurada para entrega secuencial de moléculas terapéuticas

Edgar E. González-Jiménez

Nanoscale Science and Technology Center “nanoCiTec”, Bogotá, Colombia

Inaugural article of possession as Number Member of the Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales

Abstract

From synthesized metallic double-walled single-pore nanoboxes (DWSPNb) by Kirkendall effect and galvanic replacement, a potential nanostructured multifunctional platform with the capacity for sequential release of molecular agents for therapeutic use is proposed. To evaluate the platform, numerical methods based on the dimensions, morphology, and composition of the synthesized nanoboxes were performed. For combinations of two pharmacological molecules of interest, the diffusion coefficients were determined as a function of the distance to the walls of the nanobox and the concentration. The simulation carried out for the release of these two molecules from the internal cavity and the nanochannel formed between the two walls of the nanobox showed the required sequential kinetics. This behavior allows to schedule controlled deliveries in time and place to reduce resistance to dual drugs and consequently optimize the necessary dose, as well as avoid any derived secondary effects. The metallic composition turned the nanobox into an opto-thermal nanoantenna enabling the control of cargo release and delivery through polymers sensitive to temperature and, additionally, its potential use for photodynamic treatment and diagnostic imaging.

Keywords: Nanoplatform; Sequential release; Nanoboxes; Drug delivery; Nanoantenna; Molecular diffusion.

Resumen

A partir de nanocajas metálicas de doble pared con un monoporos (DWSPNb) sintetizadas por efecto Kirkendall y reemplazo galvánico, se propone una plataforma multifuncional nanoestructurada con capacidad de liberación secuencial de agentes moleculares para uso terapéutico. La evaluación de la plataforma propuesta se hizo mediante cálculo numérico basado en las dimensiones, morfología y composición de las nanocajas sintetizadas. Para las combinaciones de dos moléculas farmacológicas de interés, se determinaron los coeficientes de difusión en función de la distancia a las paredes de la nanocaja y la concentración. La simulación realizada para la liberación de las dos moléculas de la cavidad interna a través del nanocanal formado entre las dos paredes de la nanocaja evidenció la cinética secuencial requerida. Este comportamiento permite programar entregas controladas en tiempo y lugar para reducir la resistencia a los fármacos duales y, consecuentemente, optimizar la dosis necesaria y evitar los efectos secundarios derivados. La composición metálica convirtió la nanocaja en una nanoantena optotérmica, lo que permite controlar la liberación y entrega de la carga molecular a través de polímeros sensibles a la temperatura, además de su uso potencial para tratamientos fotodinámicos y diagnósticos por imagen.

Palabras clave: Nanoplataforma; Entrega secuencial; Nanocajas; Liberación de medicamentos; Nanoantenas; Difusión molecular.

Citation: González-Jiménez EE. Multifunctional nanostructured platform for sequential release of therapeutic molecules. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):339-355, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1660>

Editor: Angela Stella Camacho Beltrán

Corresponding autor:
Edgar E González;
egonzalez@nanocitec.org

Received: March 29, 2022

Accepted: May 24, 2022

Published: June 28, 2022



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

Introduction

According to the World Health Organization (WHO), at the beginning of the second decade of this century, annual deaths from cancer reached 10 million with 400,000 diagnoses in the child population (WHO, 2022) and a 60% increase is expected for the next 20 years. This scenario implies an important challenge for science and technology in the fields of the prevention, early diagnosis, and treatment of the disease. In this sense, emerging nanoscale technologies can contribute to addressing this severe public health problem.

The development of new methods for nanoparticle synthesis that control their material, size, shape, and composition has opened the way for the fifth generation of nanomaterials (Parak, 2011; González *et al.*, 2011) enabling the search and consolidation of viable solutions. To reach a plateau in the adoption of these emerging alternatives, a sufficient level of control of the following aspects should be achieved: i) efficient transport and distribution of the nanoparticles in the biological medium of interest; ii) cellular internalization (if necessary), which implies understanding sufficiently the cell-nanoparticle interaction; iii) the transport capacity and pulsatile or sustained release of pharmacological agents including, in some cases, controlled sequential delivery of multiple drugs for co-administration; iv) in some situations, an effective thermal and optical response of the nanoparticle is necessary, and v) biocompatibility of the nanostructure material. Compliance with these aspects will allow for improving pharmacological options, reducing side effects, and reducing the doses required by modulating selective toxicity.

Besides considering the cell type, the internalization, toxicity, mobility, and distribution of nanoparticles in cells of interest will depend on factors such as size, shape, composition, aggregation, charge, and surface functionalization, factors that are determined by the synthesis method used. The many studies reporting on the correlations between these factors and the cellular response open a path to important findings and useful information to understand the underlying mechanisms in cell-nanoparticle interactions (Price *et al.*, 2019; Yue *et al.*, 2018; Niaz *et al.*, 2022; Augustine *et al.*, 2020), which will allow the identification of the criteria and conditions required in the design of highly efficient and functional nanoparticle-based systems for use in diagnostic and treatment tasks in the holistic context of theragnosis (Mitchell *et al.*, 2020).

Among the great variety of nanoparticles offered by the synthetic methods developed to date (Kim *et al.*, 2009), gold nanoparticles stand out for their outstanding physical and chemical properties. They have an optimal thermal response and optical cross-section, which is related to the area of the nanoparticle that can intercept the incident light flux producing absorption (quantified by the C_{ab} coefficient) and/or scattering (quantified by the C_{sc} coefficient). The optical cross-section depends on the size and geometry of the nanoparticle and can be tuned allowing defined displacements of the surface plasmon resonances. Additionally, gold nanoparticles have low reactivity and are favorable to surface modification and conjugation, an essential condition for programming and controlling functions. This positions such nanostructures as strategic for research in thermotherapy (Vines *et al.*, 2019), pharmacokinetics, and pharmacodynamics, specifically in transport, controlled drug release, and diagnostics (Carnova *et al.*, 2016). Regarding health risk, there is still not enough information and understanding of the processes and causal factors to allow for a conclusive and consensual assessment.

From research carried out with hollow and porous gold nanoparticles, the use of these entities is valued for the design of devices and multifunction systems for medical applications that comply with the previously mentioned requirements (Qui *et al.*, 2020; Qui *et al.*, 2021). On the other hand, using the external surface of the nanoparticle within the scope of volume and surface control and programming (González, 2016) it is possible to develop complex multifunctional platforms that allow, among other options, drug delivery with a controlled sequential release where a first drug sensitizes the tumor environment (e.g., tumor priming) while the second one achieves therapeutic success. Combinatorial sequential therapy is, without a doubt, one of the promising options to improve the quality of life and treatment of cancer patients.

Faced with the difficulties of pharmacological treatments due to the resistance of cancer to multidrug therapy and the barriers imposed by the tumor environment, methodologies for sequential delivery with synergistic effects using the advances in nanomaterials science and engineering have aroused a growing interest in alternatives to face this challenge (**Xu et al.**, 2015; **Morton et al.**, 2014; **Yao et al.**, 2020). Interesting proposals have already been investigated for particulate systems with the sequential capacity to release molecular agents involving the volume of the particle, the surface, or a molecular matrix, generally polymeric. **Zhao et al.** (2020) have reported the release by diffusion of the antibacterial agent methylisothiazolinone from titanium dioxide microspheres as a molecular model taking advantage of the hydrogen bonding capabilities with titanium dioxide and the π - π arrangements between the molecules used. The sequential release of molecular agents from the surface of hollow silica nanoparticles has also been reported and photothermally activated cRGD peptide-modified nanocarriers for dual drug delivery with gold nanorods have been designed (**Zhu et al.**, 2019).

Taking advantage of the morphology of double-walled nanoboxes that configure a nanochannel and a central cavity, a multifunctional platform for sequential delivery of molecular agents is proposed. This nanostructure is also used as a carrier and optothermal nanoantenna. The surface was programmed with molecular agents allowing for the recognition of the target of interest, the internalization, and the control of cargo release, among other features. For the dimensions, shape, and composition of the nanoparticles obtained, the sequential release kinetic response of two molecules of interest was evaluated through a computational simulation. The results derived from this research aim at evaluating the diffusive dynamics of molecular agents at a nanoscale level within a pharmacological context acknowledging the limitations that its implementation implies, as there are still some issues to be addressed.

Materials and methods

For the nanobox synthesis, the following reagents were used: silver nitrate >99%, gold hydrochloride 99.99%, polyvinylpyrrolidone with a molecular weight of 55K, cetyltrimethylammonium bromide (CTAB), ascorbic acid 99%, ethylene glycol 99.8%, and sodium sulfide nonahydrate 99.9%. All reagents were purchased from Sigma Aldrich and used as received. The synthesis was performed following the method developed to control size, shape, and composition reported in **González et al.** (2011). For the synthesis of double-walled nanoboxes at room temperature, we started with the dispersion of completely washed silver nanocubes in milli-Q water at a 10^{-3} nM concentration synthesized following the method proposed in **Fievet et al.** (1989). At room temperature and permanent stirring at ~ 200 rpm, CTAB was added to this colloid at 1.4×10^{-2} M followed by ascorbic acid at 1.4×10^{-4} M and gold hydrochloride 5.5×10^{-5} M with a flow (Q) determined as follows:

$$Q = V \times 0.075 \mu\text{Lmin}^{-1}, \quad (1)$$

where V is the volume of gold hydrochloride loaded in the micropump in μL . The width of the wall was controlled by modifying the CTAB and ascorbic acid concentrations and the reaction time. The size of the nanoboxes was determined by the size of the silver templates used, which can be controlled during their synthesis.

Results and discussion

DWSPNb structure and composition of

As a result of the structural, geometric, and compositional control of the nanoparticles obtained by galvanic replacement and the Kirkendall effect, we obtained the colloidal dispersion of double-walled hollow cubic complex nanoparticles (**Figure 1A**). The edge length of the nanoboxes obtained for the design of this platform was 49 ± 5 nm with a monodispersity close to 90% (**Figure 1B**).

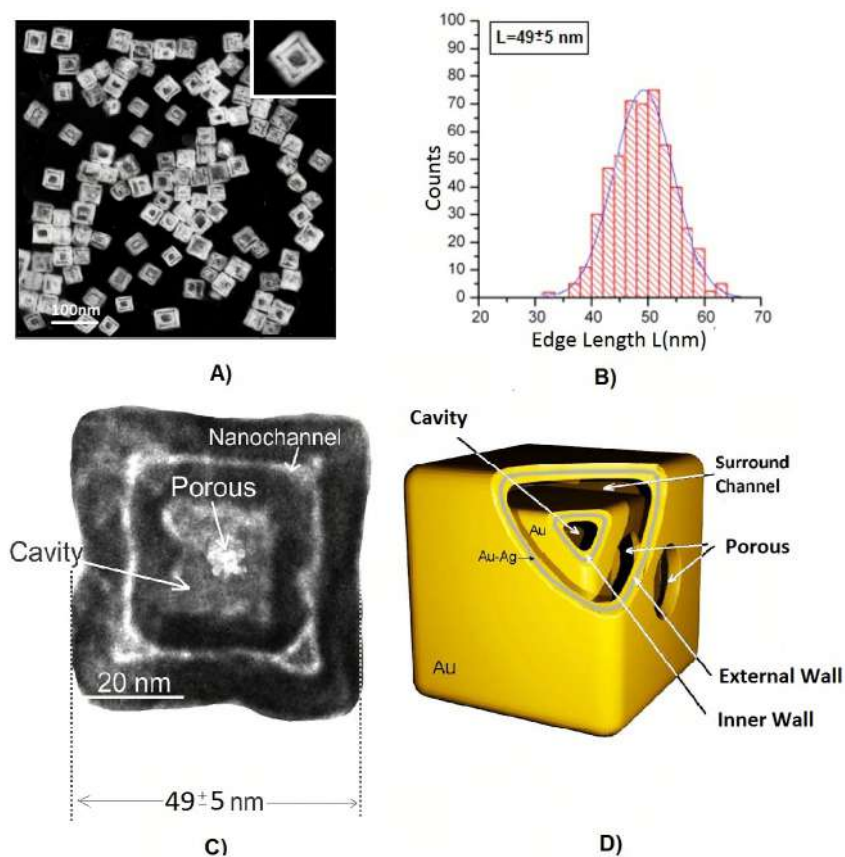


Figure 1. **A)** Image taken with transmission electron microscope of synthesized nanoboxes. **B)** Size distribution of the nanoboxes. **C)** Transmission electron microscope photograph of a DWSPNb, in which the main dimensions and structure are indicated. **D)** Three-dimensional geo-metric representation of the nanobox

The nanoparticle was formed by the following structures: i) A cubic nanochannel formed by the walls of the nanobox. The average distance between the walls was approximately 2.5 ± 0.4 nm. This distance can be increased by modifying times and reagent concentration in the synthesis process and boxes with 5 nm distances can be obtained; ii) a cavity in the center of the nanobox, and iii) an entrance pore to the nanochannel and the cavity of 7 ± 2 nm in diameter. The dimensions of the nanochannel and the entrance pore can be controlled during the nanoparticle formation process. The surfaces of the walls were made of 100% gold while their inside is a gold-silver alloy with proportions that can be controlled during the synthesis process (**Figure 1C-D**).

One of the main advantages of DWSPNb made with gold compared to non-metallic nanoparticles is their optical and thermal properties. The fact that they are made of gold makes them useful as a thermo-optical nanoantenna for phototherapy and diagnosis, as well as for the activation of polymers and the mobility of molecular agents contained in the nanoparticle. The therapeutic uses of laser radiation for thermal and optical excitation require the nanoparticle to have the surface plasmon resonance peak within the wavelength range belonging to the first water window. For this 650 nm to 900 nm interval, the biological environment is transparent to radiation but not for nanoparticles, which absorb with maximum efficiency in this region. **Figure 2A** shows the absorption spectrum as a function of wavelength for the nanoboxes with a plasmon resonance peak at 680 nm. As can be seen, the resonance peak belongs to the bandwidth of the first water window, which makes these nanoparticles an exceptional option for multifunctional platform design.

Depending on the chemical agents used in the nanoboxes synthesis, the surfaces are characterized by a positive Z-potential with values that can be tuned as a function of surfactant concentration. The graph in **figure 2B** shows the Z-potential value for the nanoboxes synthesized in this study, which corresponds to +23.5 mV.

The platform for controlled release

The general scheme of the multifunctional platform for the sequential space-time release of therapeutic molecules proposed in this study is shown in **figure 3**. The core of the system consisted of the double-walled hollow cubic gold nanoparticle. Since the nanobox had pores crossing both walls whose diameter can be controlled during the synthesis process, the therapeutic molecules TM1 and TM2 chosen for the computational evaluation of the platform will be confined in the central cavity and the two-dimensional cavity or nanochannel that forms the two walls of the nanobox, before their release. Most drugs used for pharmacological treatment in cancer classified as “small drugs” have a 0.4 to 2 nm diameter.

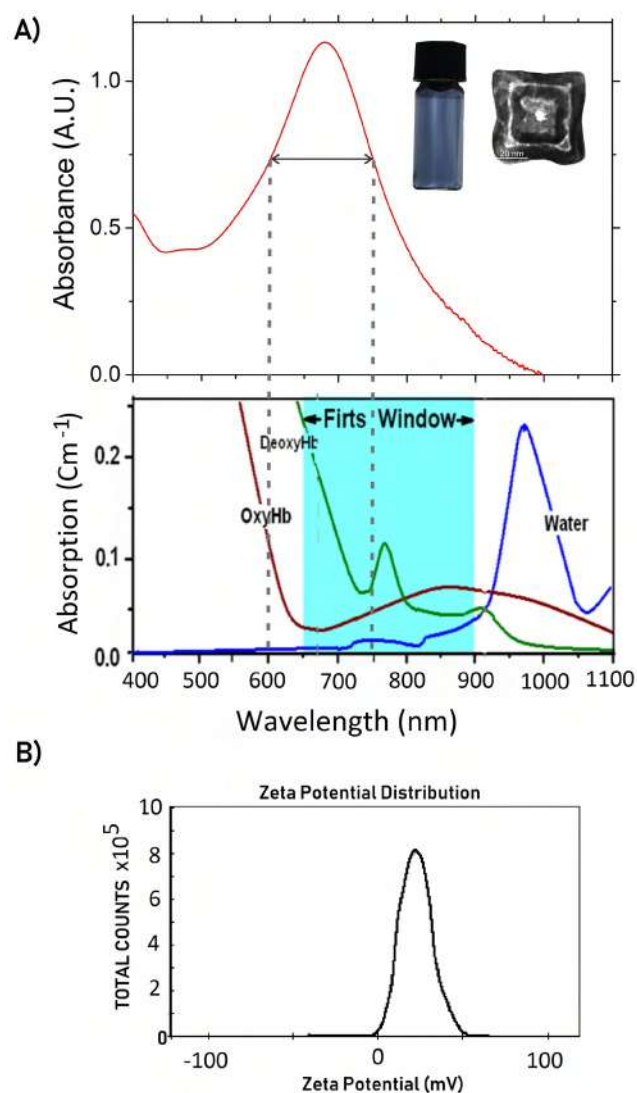


Figure 2. **A)** Absorption spectrum for the DWSPNb. As can be seen, the surface plasmon resonance peak belongs to the first water window for wavelengths between 650-900 nm. The blue color exhibited by the colloidal dispersion of the DWSPNb is shown. **B)** Z-potential for the synthesized nanoboxes. A value of +23.5 mV is recorded

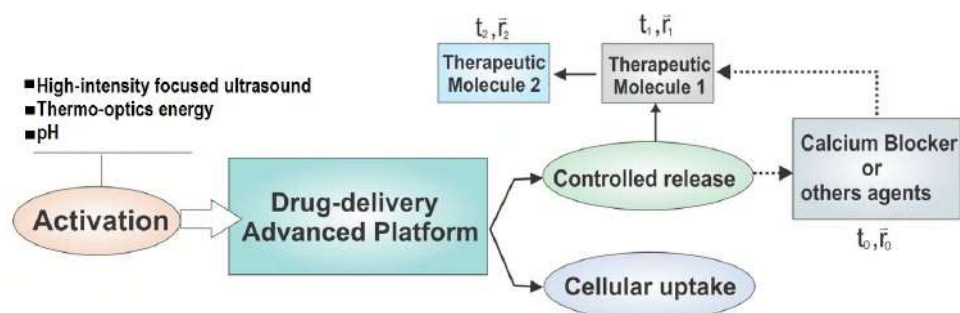


Figure 3. General scheme of the platform for sequential release controlled in time and place of therapeutic molecules.

The exit door for the molecules of interest was covered by a polymer (goalkeeper) that can be activated by near-infrared (NIR) light, high-intensity focused ultrasound (HIFU), or by changes in the environment pH intended to prevent or allow, as required, the release of the molecules through the nanobox pore. When the pore opened due to the activation of the polymer used, it was clear that the release of the molecules was sequential.

HIFU is a therapeutic technique for cancer treatment that uses the energy of focused ultrasound. It is minimally invasive and given that ultrasound is non-ionizing, it can be performed several times without significant side effects on the tissues. As has been reported (Sadeghi *et al.*, 2019), the absorption rate of acoustic energy is optimized with the use of gold nanoparticles and part of this energy heats the nanoparticles. For gold nanocages, controlled drug delivery using HIFU for activation of thermally responsive polymers has already been tested (Li *et al.*, 2011).

Here the nanobox surface was functionalized with the corresponding antigen for the recognition of the target, in this case, the tumor cell. Besides, calcium blockers or other molecules with the ability to improve cell internalization and other functions determined by the type of cell and biological environment for which the platform is configured can be attached.

The following advantages of this nanoplatform stand out: It provides an interesting option for a sequential and controlled delivery using nanochannels and pores. It can be programmed in dispersion mode for use in medical imaging or as a thermotherapeutic agent and activator of thermosensitive polymers. During the DWNBx synthesis process, it is possible to program the pore size, the channel width, and the wall thickness to modulate the thermal, optical, and drug delivery properties. Among the different structures offering sequential release alternatives, nanoboxes structural morphology allows for the implementation of nanofluidics, which is not an option with most carriers for sequential delivery and is one of the main differentiating factors of these nanoparticles. Besides, the volume of the nanochannel, the nanopores, and the cavity, and their structural distribution, turn the nanostructure into a nanoreactor for chemical reactions controlled at the nanoscale offering an interesting field of research for other types of functions besides those proposed here.

Nanochannel and nanopores

Nanoflows are usually defined as fluid flows at the nanometer scale. The devices in which they generally transit are nanochannels and nanopores, which have been widely studied for their potential applications in catalysis, sensing, drug delivery, molecular transport, selective molecular separation, molecular gates, nanofiltration, and DNA sequencing, among others (Thomas *et al.*, 2001; Han *et al.*, 2008). They exist in biological systems or can be artificially manufactured with diameters ranging from the Armstrong scale to the nanometer scale (Karniadakis *et al.*, 2005). Fluidic nanochannels 1-2 nm in diameter have been used to investigate molecular and ionic transport in confined liquids. Holt *et*

al. (2006) reported the fabrication of aligned carbon nanotubes with diameters of less than 2 nanometers for water flow measurements (**Holt et al.**, 2006). On the other hand, using electroless deposition, nanochannels with gold-polymer composites and diameters less than 5 nm that allow functional modification of the gold inner surface have been manufactured (**Harrell et al.**, 2004).

As reported in **Ahuja et al.** (2009), the porosity for drug delivery can be classified depending on the size as microporosity when the width is less than 2 nm, mesoporosity for a 2 to 50 nm width (according to the IUPAC definition, these pores give rise to capillary condensation phenomena), and macroporosity for width over 50 nm. When the pore connects different parts of the interior with the surroundings of the structure, it is often referred to as a transport pore. According to this classification, the DWNBx connects the cavity, the nanochannel, and the outside through transport pores. For pores with dimensions comparable to the molecules passing through them, the diffusion coefficient is lower than in bulk. For cylindrical pores, hindered diffusion models have already been developed for the study of these transport processes (**Malone et al.**, 1978).

The Péclet number of nanofluidic systems, defined as the ratio of the rate of advective transport to the mass rate of diffusion, ranges from 10^{-6} to 1 suggesting an important role of molecular diffusion with an important mark of anisotropy. Diffusion in nanochannels and nanopores does not strictly obey Fick's law due to the spatial confinement that accentuates the interaction of the flow with the walls.

The DWNBx proposed here as a potential sequential delivery nanoplatform are nanoparticles that morphologically exhibit transport pores and structures that can be considered as nanochannels. The pores can be of cylindrical geometry. The diameter of the pores plays a very important role in the loading and unloading of the molecular agents of interest. If it is assumed that TM1 is stored in the cavity and TM2 in the nanochannel, and these two molecular entities are of similar sizes, the protocol in the process of loading is much more complex than that required with TM1 larger than TM2 because the diameter of the entrance pores to the cavity is greater than the entrance width to the nanochannel, which facilitates selective loading by size.

Molecular diffusion in the nanoboxes

The molecular agent transiting the nanochannel is drastically confined to a scale that produces transport behaviors subject to loss of homogeneity and fluctuations in the density and viscosity of the solvent (**Thomas et al.**, 2009). The experimental results reported for molecular diffusion in channels with nanoscale confinement have enabled the evaluation of the existing theoretical models, which are insufficient to explain transport at these scales, an aspect that corroborates the great limitations of our knowledge of the diffusive theory at the nanoscale (**Bruno et al.**, 2018).

Once synthesized, the nanoparticle surfaces preserve the distribution of electrical charge and potential gradients caused, among other factors, by the ionization of surface groups, the substitution of surface ions, and the specific absorption of ions. Consequently, an electric field must be produced on the surface, which, although weakened with distance, generates a layer of counterions called the Stern layer. As the distance from the surface increases, the ionic concentration decreases, producing a second layer that is called diffuse. The model incorporating these two layers is called the double electrical layer. The potential ψ produced by the ionic charge density can be calculated from the Poisson and the Boltzmann equations known as the Poisson-Boltzmann approach (**González et al.**, 2015):

$$-\varepsilon \nabla^2 \psi = \rho e^{-\frac{z_i e \psi}{KT}}, \quad (2)$$

where ρ corresponds to the ionic charge density, ε is the dielectric constant of the solution, e the elementary electric charge, z_i the charge number of the i th ion, K the Boltzmann constant, and T the absolute temperature. Equation (3) can be approximated to a linear equation for low-intensity potentials, below 25 mV, which holds for the synthesized nanoboxes:

$$\nabla^2 \psi = \kappa^2 \psi \quad (3)$$

with a solution of the form:

$$\psi = \frac{z_i e^{-\kappa r}}{\epsilon r}, \quad (4)$$

where κ corresponds to the inverse of the diffuse layer distance known as the Debye length.

If the Debye length is greater than 1/10 of the channel width, as is the case for the nanochannel under consideration, the overlapping of the electrical double layer occurs leading to electrostatic confinement for the solute transiting the channel. Since the width of the double layer is inversely proportional to the ion concentration, the Debye length decreases with increasing ion concentration. If the solute is neutral, this contribution can be considered negligible and a rigid sphere model and hydrodynamic interactions with the channel walls can be used (Bruno *et al.*, 2018).

For modeling the release of the molecular agents TM1 and TM2, the structural morphology of the nanoboxes and the nanometer-scale spatial confinement for the mobility of molecular entities must be considered. Due to the interactions by proximity between the molecular agents and the walls of the nanochannel or nanopore, the correction of the approximations usually used for continuous homogeneous media is required. Molecular dynamics provides useful information to scale and refine the macroscopic models commonly using the finite element method. This approach is known as hierarchical multiscale modeling (Ziemys *et al.*, 2011), which is an interesting option to develop the predictive model for the release of molecular agents TM1 and TM2 from the nanoboxes.

In molecular dynamics, the motion of particles is determined by the second law of mechanics. Interactions include bonded, electrostatic, and van der Waals forces (VDW). The forces are calculated from the intramolecular and intermolecular potential energy function $E = E_{\text{intra}} + E_{\text{inter}}$ (Kojic *et al.*, 2011):

$$E_{\text{intra}} = \sum_{\text{bonds}} K_b (b - b_0)^2 + \sum_{\text{angles}} K_\theta (\theta - \theta_0)^2 + \sum_{\text{torsions}} K_\phi (1 + \cos(n\phi + \delta))$$

$$E_{\text{inter}} = \sum_{\text{electrostatics}} \frac{q_i q_j}{r_{ij}} + \sum_{VDW} \epsilon_{ij} \left[\left(\frac{R_{\text{min},ij}}{r_{ij}} \right)^{12} + 2 \left(\frac{R_{\text{min},ij}}{r_{ij}} \right)^6 \right] \quad (5),$$

where K_b , K_θ , K_ϕ are the force constants, b_0 the equilibrium values of bonds, δ the dihedral phase, n the dihedral multiplicity, ϵ_{ij} the van der Waals potential depth, R_{min} the atom radius, and q_i , q_j the partial atomic charge.

To calculate the diffusivity, the mean square displacement (MSD) obtained from the Einstein relation is used:

$$\langle r^2(t) \rangle = 4Dt, \quad (6)$$

where $\langle r^2(t) \rangle$ is the MSD, D the diffusion coefficient, and t the duration.

MDS can be computed from the following expression:

$$MSD(r_d) = \left\langle \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |r_d - r(t_0)|^2 \right\rangle, \quad (7)$$

where N is the number of equivalent particles and d the dimensionality of the MSD. In Maginn *et al.* (2019) details of the MSD calculation are reported.

If a two-dimensional section of one of the faces of the nanochannel is taken, from a calculation made for 20 trajectories, using a 10 ps time window, the diffusion coefficient is obtained as a function of the distance to the wall of the nanochannel for a given concentration (Ziemys *et al.*, 2010). Here, the MDAnalysis MSD module corresponding to an object-oriented python toolkit was used (Calandrini *et al.*, 2011; Buyl *et al.*, 2018) and the results obtained for the doxorubicin molecule at a concentration of 1M are shown in figure 4. With this approach, the molecules would present zero diffusion for distances

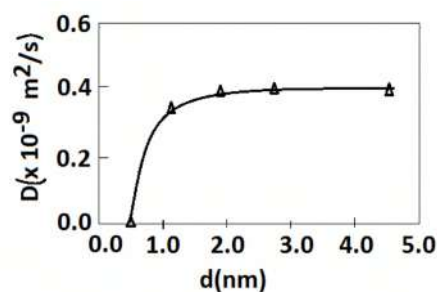


Figure 4. Diffusion through the nanochannel as a function of the distance to the wall.

less than 0.4 nm from the wall. Since the channel has a 2 nm separation between the walls, the diffusion that should be taken to model the release would be approximately equal to $0.36 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ if transit through the middle of the channel is assumed.

Thermo-optical response of the DWSPNb

Due to the composition of the DWSPNb: gold on the outer walls and gold/silver alloy on the inside, its opto-thermal response is of great interest for controlled activation of the molecular agents contained, as well as for its complementary thermost-therapeutic action. As has already been reported for hollow gold nanoparticles with a gold-silver alloy inside (González, 2016), the thickness of the wall drastically determines the plasmon resonance peak. As the wall thickness increases, the surface plasmon peak experiences a blue shift. The relationship between absorption and scattering is determined by the length of the edge so that by decreasing length, absorption increases over scattering.

On the other hand, the laser energy excites the electrons and produces a hot electron distribution. The increase in the electronic temperature modifies the occupation of the electronic states close to the Fermi level and produces a broadening of the plasmonic band. This behavior depends on the laser intensity, wavelength, and gold absorption. The electrons reach equilibrium with the lattice through electron-phonon couplings. In time scales close to 100 ps, the heat is dissipated until thermal equilibrium with the surroundings is reached (Mahmoud *et al.*, 2010).

For the DWSPNb, the modeling was performed by the finite element method (Cao *et al.*, 2019) for a wavelength equal to 650 nm, which corresponds to that in the surface plasmon resonance bandwidth for the nanoboxes and belongs to the first water window as indicated in **figure 2A** where the laser radiation used for thermotherapy or goalkeeper polymer activation, makes its attenuation by the biological environment much lower than that of the boxes and, consequently, the absorption there allows for its thermal action.

According to the results reported here (**Figure 5**), the distribution of the electric field shows hot zones in the cavities whose intensity in the central cavity is greater than the nanochannel by approximately a factor of 2.3. This behavior is explained by the type of geometry offered by cubic cages where plasmonic couplings production depends on the distance between the faces, as reported for hollow gold nanoparticles (Mahmoud *et al.*, 2010; Azis *et al.*, 2016; González, 2016). On the other hand, the thickness of the wall was decisive in the interwall coupling between the surface plasmon fields of the internal and external surfaces, respectively.

The distribution control of the electric field and, consequently, the thermal response of the nanoboxes enabled the introduction of an input variable to activate and tune the release of the two molecular entities loaded in the cavity and the nanochannel. A thermosensitive polymer can be thermally excited to open or close the nanopore according to time and place requirements. On the other hand, the photothermal effect is related to the ability to transduce optical energy into thermal energy. When exposed to optical radiation, the DWSPNb converts the absorbed photons into phonons and produces an increase in the

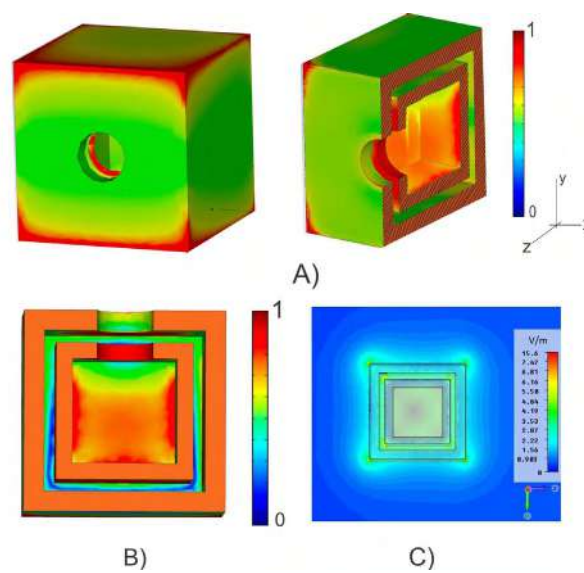


Figure 5. A-B) Distribution of the electric field for an electromagnetic wave with a wavelength of 650 nm incident in the z-direction. The box is shown in 3D, as well as a cross-section and projection in the z-y plane. **C)** Contour map of the electric field of a wave incident in the z-direction, which coincides with the orientation of the nanopore. The cross-section corresponding to the x-y plane is shown.

temperature of the crystalline structure that makes up the nanoparticle. The dissipated heat can be used to damage tumor cells if hyperthermic temperatures above 42°C are reached. The capacity of DWSPNb for sequential drug delivery, the opto-thermal transduction for diagnostic imaging, and thermotherapy represent a portfolio of the options offered by this multifunctional platform configured to facilitate theragnosis viability.

Combinatorial for sequential release

One of the first-line combinations given its high efficacy has been the sequential administration of paclitaxel (PTX) and doxorubicin (DOX) (**Xu et al.**, 2015). Pretreatment with the first drug lowers interstitial fluid pressure, improves oxygenation, and increases interstitial space, which prepares the tumor for the release and greater efficacy of the second drug (**Cho et al.**, 2011). PTX is classified as one of the most effective antimicrotubular therapeutic agents for the treatment of different types of cancer. It has a highly complex chemical structure made up of eleven stereocenters but one of its limitations is the low solubility in water ($\sim 0.4 \times 10^{-6}$ g/mL) demanding the use of a mixture of dehydrated ethanol with Cremophor® (Taxol) that produces significant side effects. To improve the water solubility of PTX, numerous strategies have already been reported, among which the use of amphiphilic solubilizing polymers such as 2-methacryloxyethyl phosphorylcholine (MPC) stands out as it improves water solubility with no adverse effects (**Konno et al.**, 2003). On the other hand, cyclodextrins increase the solubility of PTX, as well as its bioactivity (**Hamada et al.**, 2006), while the use of polypeptides (Poly-L-lysine, Poly- γ -glutamic acid, or collagen) increases the solubilization and stability of PTX in water 2700 times more than the use of Dextran-PTX conjugates (solubility ~ 80 mg/ml) and 14 times more than Taxol (**Nakamura et al.**, 2010). It is also possible to increase the solubility of PTX in water with phosphate esters, thus improving antitumor activity and reducing cytotoxicity. For loading the drugs in the DWSPNb, specifically the PTX, its solubility in water may be required, which can be solved with the appropriate conjugation.

Gold nanoparticles have already been used in the transport and delivery of PTX by binding the PTX to functionalized phenolic terminations on the nanoparticle surfaces using hexamethylene glycol as a ligand. For a single 4 nm diameter particle, an approximate

binding number of 70 paclitaxel molecules has been determined (**Gibson et al.**, 2007). In the case of a DWSPNb, the internal cavity would be able to house at least 1.132 PTX molecules.

In the loading process, the PTX (in a soluble solvent) penetrates the central cavity of the box through the 7 nm diameter pore. Since the diameter of the PTX+ solubilizer polymer is greater than 2 nm, there is no limitation for this input. However, it cannot enter the surrounding channel whose distance for entry is close to 2 nm, which is satisfied for cisplatin, whose required value for entry is 0.4 nm, or for a DOX molecule, with a required value of at least 1.5 nm.

DOX is an anticancer therapeutic molecule used to treat solid tumors, lymphomas, and leukemias. The use of this drug is restricted by its potential cardiotoxic effects and limited distribution in solid tumors, aspects that require drastic improvement in dose optimization and administration site precision. Unlike DOX, which is hydrophobic and insoluble in water, the molecule doxorubicin hydrochloride (DOX-HCl) is a hydrophilic molecule with high solubility in water, close to 50 mg/ml, and a size of around 1.4 nm. Due to its size, this molecule can enter the surrounding channel of the QWSPNb and achieve a controlled release in time and place favoring precision in the applied dose.

The calcium channel blocker VER-HCl is one of the first calcium channel antagonists introduced for therapeutic use. It presents a polar topological surface area of 64 Å² that favors cell membrane permeability and has a high solubility in water. Its molecular size allows it to enter the central cavity through the nanobox pore for its subsequent release. One of the strategic combinations is VER-HCl and DOX-HCl whose sequential application facilitates reversing multidrug resistance from the inhibition of P-glycoprotein expression and contributes to enhance doxorubicin action (**Li et al.**, 2015).

Other combinatorials that can be implemented to configure delivery systems are PTX and curcumin (CUR), a phenolic compound that reduces the expression of P-gp according to reported studies (**Punfa et al.**, 2014); DT-diaphorase and methotrexate (MTX), a combination that has been reported for sequential enzyme-activated and light-triggered cancer detection and therapy (**Chen et al.**, 2018); bio enzymes as alternative therapeutic agents, and the joint delivery of RNase A and DOX.

Sequential release of therapeutic molecular agents

To model the sequential release of the two molecular agents TM1 and TM2, the combination VER-HCl/DOX-HCl was chosen. VER-HCl was loaded into the cavity of the nanoparticle and DOX-HCl into the nanochannel. The diffusion coefficients chosen for the simulation and determined from the previously established criteria were $D_{\text{DOX}} = 0.36 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ and $D_{\text{VAR}} = 0.55 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. The initial concentrations of the charge both in the cavity and in the nanochannel were selected according to the maximum charge capacity of the molecular agents obtained from the average dimensions of the nanoboxes. For a nanobox, the theoretical maximum capacity calculated for the DOX molecule corresponds approximately to $2 \times 10^{-20} \text{ mol}$, which is equivalent to a concentration of 1.15 M. In the simulation, an initial concentration of 1M was assumed for both the cavity and the nanochannel. The dimensions of the nanobox were indicated above.

Figure 6 A-B shows the release profiles of the two molecular agents for a cross-section of the box under the conditions imposed by the model. As can be seen, the molecular agent in the cavity was released with a shorter half-life than that of the nanochannel. These times correspond to the case where the nanobox has not been functionalized yet with molecular agents sensitive to pH and/or temperature. The methodology and experimental development in a biological environment would allow for the evaluation of these theoretical results.

In general, hydrophilic drugs can be loaded into the cavity and the nanochannel while hydrophobic drugs can be bound to the outer surface of the nanobox whose area is around 15,000 nm², enough to accommodate a significant molecular cargo. On the surface, it is also possible to fix “porter polymers” to control the release of cargo through the nanopore by physical, chemical, and biological excitations, among which the following stand out:

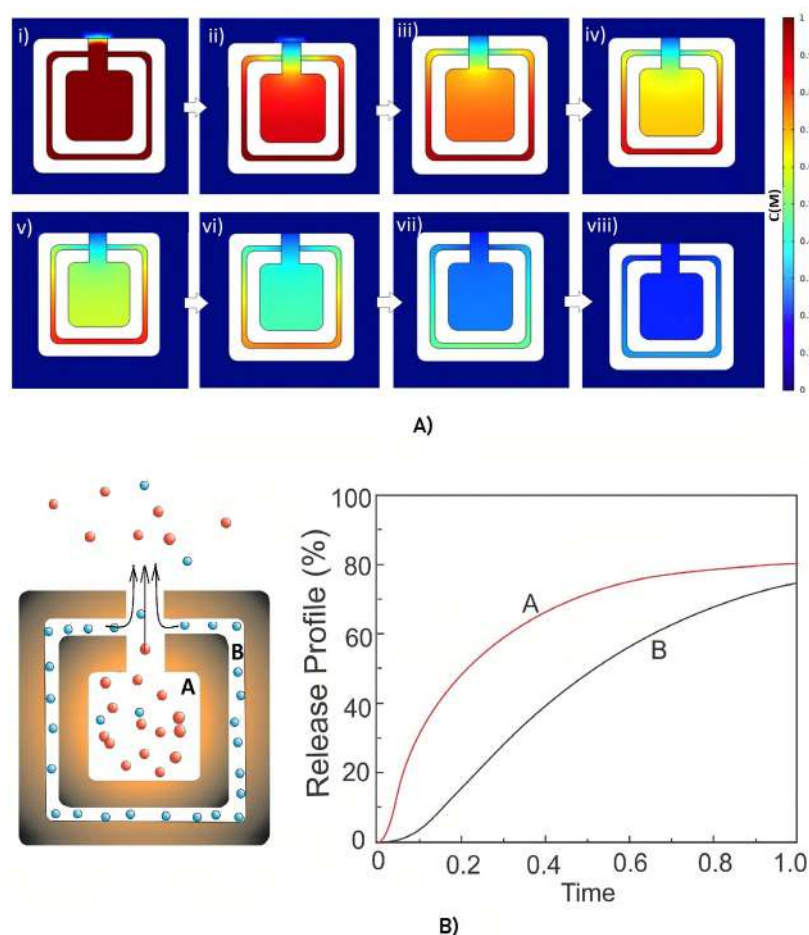


Figure 6. A) Instantaneous concentration distribution for a transverse section of the nanobox for the values: i) 0; ii) 0.08; iii) 0.16; iv) 0.25; v) 0.33; vi) 0.41; vii) 0.66; viii) 1.0. It corresponds to the combinatorial AR-HCl and DOX-HCl. B) Release profile of the selected molecular agents, VAR-HCl and DOX-HCl. A corresponds to the curve from the cavity while the curve noted as B, from the nanochannel

pH, temperature, light, electric fields, magnetic, among others. The abundant supply of polymers with these capabilities facilitates the design of controlled release functions for the multifunctional platform proposed here.

Polymers sensitive to pH variations contain acidic or basic groups with the ability to accept or donate protons that consequently produce changes in their structure, solubility, conformation, or surface activity (Ofridam *et al.*, 2021). These changes can be used to open or close the exit of the nanopore. Cationic polymers subjected to pH decrease change from a hydrophobic to a positively charged hydrophilic configuration. On the other hand, anionic polymers affected by pH reductions transit from a negatively charged hydrophilic configuration to a hydrophobic one. These polymers are made up of amino groups that accept protons and make them evolve towards hydrophilic configurations when the environment pH is reduced below the pKa (Deirram *et al.*, 2019). 2-(N,N-Diisopropylamino)ethyl methacrylate (PDPAEMA) is one of the most widely used amines for configurations sensitive to pH changes. It has a pKa acidity of 6.85 that allows for its transition towards hydrophilic with pH values below this value. For the physiological environment (e.g. blood plasma) with pH values between 7.37 and 7.43, this amino is hydrophobic. In the endosomal compartment, with pH \sim 6.5, and tumor environments with pH between 6.4 and 6.8, the polymer exhibits hydrophilic behavior.

Palanikumar *et al.* (2017) reported the use of the copolymer pyridine disulfide, 2-(diisopropylamine) ethyl methacrylate, and polyethylene glycol to control sequential delivery from a core-shell structure of hollow silica nanoparticles. Following a similar strategy but using DWSPNb with the PDPAEMA polymer as a gatekeeper at the pore exit and fixed on the surface by methods such as the one indicated in **Mohammadi *et al.* (2017)**, a route for sequential and synergist treatment was drawn, as illustrated in **figure 7A**.

The PDPAEMA on the surface of the DWSPNb in an environment with physiological pH presents hydrophobic behavior that allows fixing some hydrophobic drugs, for example, calcium blockers such as nimodipine (NIDIP) or VER. If the surface carries a calcium blocker, the therapeutic molecules MT1 and MT2 could be released from inside the box. In this case, there would be three molecular agents delivered sequentially. In the case of two drugs, a blocker MT1, for example, VER-HCl, and the therapeutic agent MT2, DOX-HCl, for example, the first would be loaded in the cavity and the second in the nanochannel. The PDPAEMA polymer in a tumor environment with a 6.4-6.8 pH changes towards a hydrophilic configuration producing protonation with a positive charge on the surface that favors cell internalization. Within the highly acidic endosomal environment, the polymer swells and allows the opening of the pore through which the MT1 blocker is released and the endosomal membrane is disrupted with the subsequent escape of DWSPNb. The delivery of the molecular agent MT1 blocks the P-glycoprotein responsible for the resistance to the MT2 drug. Since the pore is open, the MT2 drug is sequentially released to act efficiently thanks to the blockage of the aforementioned protein.

A second route for sequential drug delivery can be configured with the use of a thermosensitive polymer affixed to the surface of the box. This type of polymer is sensitive to temperature changes with ranges that can be programmed according to specific requirements. Those known as negative temperature-sensitive polymers are insoluble

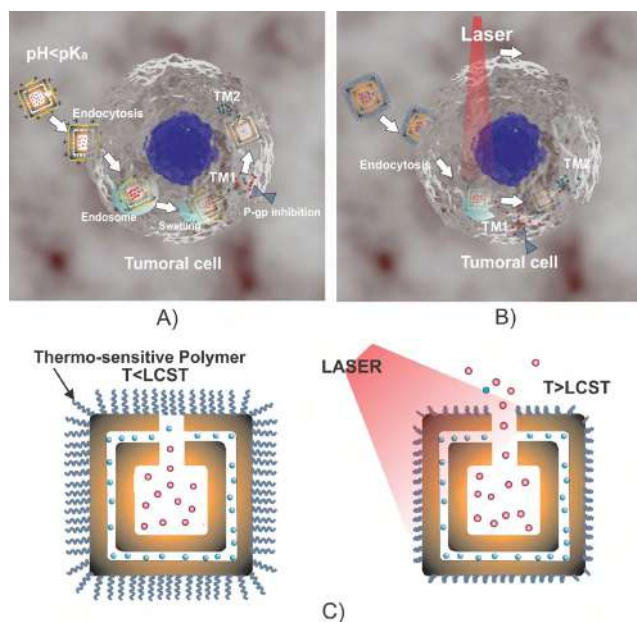


Figure 7. A) Route for sequential release of two drugs with the use of DWSPNb loaded with an MT1 blocker in the cavity and an MT2 pharmacological agent in the nanochannel. In this case, a pH-sensitive polymer is used as a gatekeeper to control the exit of molecular agents through the nanopore. B) Route for sequential release of two drugs with the use of DWSPNb loaded with an MT1 blocker in the cavity and an MT2 pharmacological agent in the nanochannel. In this case, a thermosensitive polymer is used to control the exit of molecular agents through the nanopore. C) The change in PIPAAm under the action of optical radiation which allows the controlled release of the charge is illustrated

above a certain critical temperature, the lower critical solution temperature (LCST). They are soluble in water at normal temperatures (below the LCST) and their solubility decreases as temperature increases until a phase separation above the LCST value is reached.

Poly(N-isopropylacrylamide) (PIPAAm) exhibits these properties. It is classified as a smart hydrogel since it offers a wide range of applications including soft robotics, drug delivery, and tissue engineering, among others (Sanzari *et al.*, 2020). The critical LCST value for this polymer is in the 32 to 35°C range, ideal for applications in human biological environments. At a temperature of 37°C, PIPAAm surfaces are hydrophobic favoring cell growth on them. On the contrary, at temperatures below 32°C it becomes hydrophilic. PIPAAm-coated gold nanoparticles have been widely studied due to the potential applications of this type of configuration, among which the design of nanosensors (Maji *et al.*, 2016) and the transport and release of drugs (Esquivel, *et al.*, 2017) have been the most researched.

DWSPNb can be targeted to the site of interest by two mechanisms: i) passive-type enhanced permeability and retention (EPR), a widely debated model that is characterized by an increased accumulation relative to normal tissue of micro and nanometric entities, such as nanoparticles or macromolecules in tumors. Presumably, this behavior is caused by the texture of abnormal vascularization within the tumor region, which promotes the translocation of nanoparticles. It has been found that this effect can be improved with the conjugation of the nanoparticles with poly (ethylene glycol). ii) The second mechanism, classified as active, takes advantage of the over-expression of tumor cell receptors that can be recognized by ligands attached to the nanoparticles allowing for vectorized accumulation at the treatment site.

As shown in **figure 7B**, once DWSPNb reaches the tumor cell, it is internalized by endocytosis. Inside the cell, the two molecular agents are still confined. The possibility of controlling the position of the nanoparticle in the intracellular region is being investigated. When laser light is irradiated at a wavelength belonging to the water window and the surface plasmon resonance range, the PIPAAm polymer collapses enabling the sequential release of the two therapeutic molecules (**Figure 7C**). The simulation of the electric field distribution and the heating of the box, as well as the control in drug delivery, act as a thermotherapeutic agent if the appropriate temperature is reached.

Conclusions

Double-walled single-pore nanoboxes (DWSPNb) synthesized by the Kirkendall effect and galvanic replacement have a structural hierarchy made up of three nanostructures: a cavity, a nanochannel, and a nanopore. According to the theoretical and computational study carried out by this research, this novel architecture allows the programming of the nanoparticle to release two molecular agents sequentially. However, taking advantage of the outer surface of the nanobox, it can also be used for the sequential transport and delivery of three molecular agents in the benefit of cancer treatment. Using polymers sensitive to variations in pH or temperature as gatekeepers in the nanopore, it is possible to configure different routes of activation and delivery of the target drugs. Besides the thermal and optical capabilities in the water window range offered by the nanoboxes, they can also become powerful nano-antennas for thermotherapy and support in diagnostic imaging tasks.

The multifunctional platform proposed here contributes from the supply of nanotechnology to the investigation of potential tools to face the challenges imposed for diseases such as cancer. The option offered by these alternatives for localized and sequential delivery drastically reduces the secondary pharmacological effects, as well as the dose required to achieve the expected results. This route tracing the use of nanoparticles to transport and release drugs in a controlled manner is promising for improving the well-being of patients affected by cancer.

Acknowledgements

The author would like to express his gratitude to Oscar Robayo Amado for his contribution to the review of the manuscript.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest

The author declares no conflicts of interest regarding the present paper.

References

- Ahyja, G., Pathak, K. (2009). Porous Carriers for Controlled/Modulated Drug Delivery. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2, 599-607. DOI: 10.4103/0250-474X.59540
- Augustine, R., Hasan, A., Primavera, R., Wilson, R., Thakor, A., Kevadiya, D. (2020). Cellular uptake and retention of nanoparticles: Insights on particle properties and interaction with cellular components. *Materialstoday Communications*, 25, 101692. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101692>
- Aziz, G., Patarroyo, J., Parramon, S., Arenal, Raul., Duchamp, M., González, E., Henrard, L., Bastús, N., Dunin, R., Puentes, V., Arbio, J. (2016). Tuning the plasmonic response up: Hollow cuboid metal nanostructures. *ACS Photonics*, 3 (5), 770-779. <http://dx.doi.org/10.1021/acsp Photonics.5b00667>
- Bruno, G., Trani, N., Hood, R., Zabre, (2018). Unexpected behaviors in molecular transport through size-controlled nanochannels down to the ultra-nanoscale. *Nature Communications*, 9, 1682. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04133-8>
- Buyl, P. (2018). Tidynamics: A tiny package to compute the dynamics of stochastic and molecular simulations. *Journal of Open-Source Software*, 3 (28), 877.
- Cao, M., Wang, M., Gu, N. (2009). Optimized surface plasmon resonance sensitivity of gold nanoboxes for sensing applications. *Journal Physics Chemical C*, 113(4), 1217-1221. <https://doi.org/10.1021/jp808000x>
- Carnovale, C., Bryant, G., Shukla, R., Bansal, V. (2016). Size, shape and surface chemistry of nano-gold dictate its cellular interactions, uptake and toxicity. *Progress in Materials Science*, 83, 152-190. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.04.003>
- Calandrini, V., Pellegrini, E., Calligari, P., Hinsén, K., Kneller, G. R. (2011). NMDyn-Interfacing Spectroscopic Experiments, Molecular Dynamics Simulations and Models for Time Correlation Functions. *Collection SFN*, 12, 201-232. DOI:10.1051/sfn/201112010
- Chen, Z., Li, B., Xie, X., Zeng, F., Wu, S. (2018). A sequential enzyme-activated and light-triggered pro-prodrug nanosystem for cancer detection and therapy. *Journal of Materials Chemistry B*, 6, 2547-2556. <https://doi.org/10.1039/C7TB01989K>
- Cho, H., Kwon, G. (2011). Polymeric Micelles for Neoadjuvant Cancer Therapy and Tumor-Primed Optical Imaging. *ACS Nano*, 5, 8721-8729. <https://doi.org/10.1021/nn202676u>
- Deirram, N., Zhang, Ch., Kermaniyan, S., Johnston, A., Such, G. (2019). pH-Responsive Polymer Nanoparticles for Drug Delivery. *Macromolecular Rapid Communicatios*, 40, 1-23. <https://doi.org/10.1002/marc.201800917>
- Esquivel, R., Canale, I., Ramirez, M., Hernández, P., Zavala, P., Álvarez, E., Acuña, A. (2017). Nanobarras de oro recubiertas de poli(N-isopropilacrilamida) mediadas por una capa de quitosano tiolado: sensibilidad al pH térmico y propiedades ópticas. *e-Polymers*, 18, 163-174. <https://doi.org/10.1515/epoly-2017-0135>
- Fievet, F., Langier, J., Blim, B., Beaudoin, B., Figlarz. (1989). Homogeneous and heterogeneous nucleations in the polyol process for the preparation of micron and submicron size metal particles. *Solid State Ionics*, 32, 198-205.
- Gibson, J., Khanal, B., Zubarev, R. (2007). Paclitaxel-Functionalized Gold Nanoparticles. *Journal of the American Chemistry Society*, 129, 11653.
- Gonzalez, E., Arbiol, J., Puentes, V. (2011). Carving at the nanoscale: Sequential galvanic exchange and Kirkendall growth at room temperature. *Science*, 334, 1377-1380. DOI: 10.1126/science.1212822
- Gonzalez, E., Puentes, V. Casals, E. (2015). Nanomateriales: Nanopartículas Coloidales. Nanocitec, Bogotá.
- Gonzalez, E. (2016). Control de la superficie y el volumen en la nanoescala para la configuración y el diseño de nanodispositivos. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 40 (157), 590-599. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.398>

- Gonzalez, E., Gil, E., Castro, C., Téllez, N., Riberos, T., González, F.** (2008). Citotoxicidad in vitro de células tumorales con nanotubos de carbono de pared simple funcionalizados con polisulfónico M-aminobenceno y con polietilenglicol. *Universitas Medica*, 49, 317-327.
- Hamada, H., Ishihara, K., Masuoka, N., Mikuni, K., Nakajima, N.** (2006). Enhancement of water-solubility and bioactivity of paclitaxel using modified cyclodextrins. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 102, 369-371.
- Han, J., Fu, J., Schoch, R.** (2008). Molecular sieving using nanofilters: past, present and future. *Lab on a Chip*, 8(1), 23. <https://doi.org/10.1039/B714128A>
- Harrell, C., Kohli, P., Siwy, Z., Marti, n C.** (2004). DNA-Nanotube artificial ion channels. *Journal of the American Chemistry Society*, 126(48), 15646-15647.
- Holt, J. K., Park, H., Wang, Y., Stadermann, M., Artyukhin, A., Grigoropoulos, C., Noy, A., Bakajin, O.** (2006). Fast mass transport through sub-2-nanometer carbon nanotubes. *Science*, 312, 1034-1037.
- Karniadakis, G., Beskok, A., Aluru, N.** (2005). *Microflows and Nanoflows: Fundamentals and Simulation*, Springer, New York.
- Kim, J., Piao, Y., Hyeon, T.** (2009). Multifunctional nanostructured materials for multimodal imaging, and simultaneous imaging and therapy. *Chemical Society Reviews Journal*, 38, 372-390. DOI <https://doi.org/10.1039/B709883A>
- Kojic, M., Milosevic, M., Kojic, N., Ferrari, M., Ziemys, A.** (2011). On diffusion in nanospace. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, 5(1), 104-118.
- Konno, T., Watanabe, J., Ishiara, K.** (2003). Enhanced solubility of paclitaxel using water-soluble and biocompatible 2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine polymers. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 65, 209-214. DOI:10.1002/jbm.a.10481
- Li, N., Zhang, P., Huang, C., Song, Y., Garg, S., Luan, Y.** (2015). Co-delivery of doxorubicin hydrochloride and verapamil hydrochloride by pH-sensitive polymersomes for the reversal of multidrug resistance. *RCS Advances*, 5, 77986-77995. <https://doi.org/10.1039/C5RA15313A>
- Li, W., Cai, X., Kim, C., Sun, G., Zhang, Y., Deng, R., Yang, M., Chen, J., Achilefu, S., Wang, L., Xia, Y.** (2011). Gold nanocages covered with thermally-responsive polymers for controlled release by high-intensity focused ultrasound. *Nanoscale*, 3(4), 1724-1730. <https://doi.org/10.1039/C0NR00932F>
- Mahmound, M., Snyder, B., ANDEL-Sayed, M.** (2010). Surface Plasmon Fields and Coupling in the Hollow Gold Nanoparticles and Surface-Enhanced Raman Spectroscopy. Theory and Experiment. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114, 7436-7443. <https://doi.org/10.1021/jp9109018>
- Maginn, E. J., Messerly, R. A., Carlson, D. J.; Roe, D. R., Elliott, J. R.** (2019). Best Practices for Computing Transport Properties 1. Self-Diffusivity and Viscosity from Equilibrium Molecular Dynamics. *Living Journal of Computational Molecular Science*, 1(1), 6324. DOI: <https://doi.org/10.33011/livecoms.1.1.6324>
- Malone, D., Anderson, J.** (1978). Hindered diffusion of particles through small pores. *Chemical Engineering Science*, 33, 1429-1440. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(78\)85192-6](https://doi.org/10.1016/0009-2509(78)85192-6)
- Maji, S., Cesur, B., Zhang, Z., De Geest, B., Hoogenboom, R.** (2016). Poly(N-isopropylacrylamide) coated gold nanoparticles as colourimetric temperature and salt sensors. *Polymer Chemistry*, 7, 1705-1710. <https://doi.org/10.1039/C5PY01959A>
- Mitchell, M., Billingsley, M., Haley, R., Wechsler, M., Peppas, N., Langer, R.** (2020). Engineering precision nanoparticles for drug delivery. *Nature Reviews Drug Discovery*, 20, 101-124. DOI: 10.1038/s41573-020-0090-8
- Mohammadi, M., Salami, M., Mamaqani, H., Golshan, M.** (2017). Synthesis and investigation of dual pH- and temperature-responsive behaviour of poly[2-(dimethylamino)ethyl methacrylate]-grafted gold nanoparticles. *Applied Organometallic Chemistry*, 31, e3702. <https://doi.org/10.1002/aoc.3702>
- Morton, S., Lee, M., Dend, A., Dreaden, E., Siouve, E., Shopsowitz, K., Shah, N., Yaffe, M., Hammoun, P.** (2014). A Nanoparticle-Based Combination Chemotherapy Delivery System for Enhanced Tumor Killing by Dynamic Rewiring of Signaling Pathways. *Science Signaling*, 7 (325), 44. Doi: 10.1126/scisignal.2005261
- Nakamura, J., Nakajima, N., Matsumura, K and Hyo, S-H.** (2010). Water-soluble Taxol Conjugates with Dextran and Targets Tumor Cells by Folic Acid Immobilization. *Anticancer Research*, 30, 903-909.
- Niaz, S., Forbes, B. And Raimi-Abraham, T.** (2022). Exploiting Endocytosis for Non-Spherical Nanoparticle Cellular Uptake. *Nanomanufacturing*, 2, 1-16. <https://doi.org/10.3390/nanomanufacturing2010001>

- Ofridam, F., Tarhini, M., Lebaz, N., Gagnière, É., Mangin, D., Elaissari, A.** (2021). pH-sensitive polymers: Classification and some fine potential applications. *Polymers for Advanced Technologies*, 32, 1455-1484. DOI:10.1002/pat.5230
- Palanikumar, L., Jeena, M., Kim, K., Oh, J., Kin, C., Park., Ryu, J.H.** (2017). Spatiotemporally and Sequentially Controlled Drug Release from Polymer Gatekeeper–Hollow Silica Nanoparticles. *Scientific Reports*, 7, 46540. <https://doi.org/10.1038/srep46540>
- Parak, J. W.** (2011). Complex colloidal assembly. *Science*, 334, 1359-1360. DOI: 10.1126/science.1215080
- Price, E., Gesquiere, A.** (2019). An in vitro assay and artificial intelligence approach to determine rate constants of nanomaterial-cell interactions. *Scientific Reports*, 9, 13943. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50208-x>
- Punfa, W., Suzuki, S., Pitchakarn, P., Yodkeeree, S., Naiki, T., Takahashi, S., Limtrakul, P.** (2014). Curcumin-loaded PLGA Nanoparticles Conjugated with Anti- P-glycoprotein Antibody to Overcome Multidrug Resistance. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 15, 9249-9258. DOI: 10.7314/apjcp.2014.15.21.9249
- Qiu, J., Liu, Y., Xia, Y.** (2021). Radiolabeling of Gold Nanocages for Potential Applications in Tracking, Diagnosis, and Image-Guided Therapy. *Advanced Healthcare Materials*, 10, 1-11.
- Qui, J., Xie, M., Wu, T., Qin, D., Xia, Y.** (2020). Gold nanocages for effective photothermal conversion and related applications. *Chemical Science*, 11, 12955-12973.
- Sadeghi, M., Jeon, S., Kwon, H-J.** (2019). Enhancing Thermal Effect of Focused Ultrasound Therapy Using Gold Nanoparticles. *IEEE Transaction NanoBioscience*. DOI 10.1109/TNB.2019.2937327
- Sanzari, I., Buratti, E., Huang, R., Tusan, C., Dinelli, F., Evans, N., Prodromakis, T., Bertoldo, M.** (2020). Poly(N-isopropylacrylamide) based thin microgel films for use in cell culture applications. *Scientific Reports*, 10, 6126. DOI: 10.1038/s41598-020-63228-9
- Thomas, J. and McGaughey, A.** (2009). Water flow in carbon nanotubes: transition to subcontinuum transport. *Physics Review Letters*, 102, 184502.
- Thomas, J., Rja, R.** (2012). Nanopore and nanoparticle catalysts. *Chemical Records*, 1(6), 448-466.
- Vines, J., Yoon, J-H., Ryu, N-E., Lim, D.J., Park, H.** (2019). Gold nanoparticles for photothermal cancer therapy. *Frontiers in Chemistry*, 7, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00167>
- WHO.** (2022) Cancer, <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cancer>, consulted 10 February 2022.
- Xu, W., Thapa, R., Liu, D., Nissen, T., Granroth, T., Narvanen, A., Suvanto, M., Santos, H., Lehto, V.** (2015). Smart porous silicon nanoparticles with polymeric coatings for sequential combination therapy. *Molecular Pharmaceutics*, 12, 4038-4047. <https://doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.5b00473>
- Yao, Y., Zhou, Y., Liu, L., Xu, Y., Chen, Q., Wnag, Y., Wu, S., Deng, Y., Zhang, J., Shao, A.** (2020). Nanoparticle-Based Drug Delivery in Cancer Therapy and Its Role in Overcoming Drug Resistance. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 7, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2020.00193>
- Yu, j., Feliciano, T., Li, W., Lee, A., Odom, T.** (2018). Gold nanoparticle size and shape effects on cellular uptake and intracellular distribution of siRNA nanoconstruct. *Bioconjugate Chemistry*, 28(6), 1791-1800. Doi: 10.1021/acs.bioconjchem.7b00252
- Zhao, D., Yang, N., Wei, Y., Jin, Q., Want, Y., He, Y., Yang, Y., Han, B., Zhang, S., Wnag, D.** (2020). Sequential drug release via chemical diffusion and physical barriers enabled by hollow multishelled structures. *Nature Communication*, 11, 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18177-2>
- Zhu, F., Tan, G., Zhong, Y., Jian, Y., Cai, L., Yu, Z., Liu, S., Ren, F.** (2019). Smart nanoplatform for sequential drug release and enhanced chemo-thermal effect of dual drug loaded gold nanorod vesicles for cancer therapy. *Journal of Nanobiotechnology*, 17, 44. <https://doi.org/10.1186/s12951-019-0473-3>
- Ziemys, A., Grattoni, A., Fine, D., Hussain, F., Ferrari, M.** (2010). Confinement Effects on Monosaccharide Transport in Nanochannels. *The Journal of Physical Chemistry B* 114, 11117-11126. <https://doi.org/10.1021/jp103519d>
- Ziemys, A., Kojic, M., Milosevic, M., Kojic, N., Hussain, F., Ferrari, M., Grattoni, A.** (2011). Hierarchical modeling of diffusive transport through nanochannels by coupling molecular dynamics with finite element method. *Journal of Computational Physics*, 230, 5722-5731. DOI: 10.1016/j.jcp.2011.03.054

Artículo original

Uso de refugios artificiales como estrategia para la conservación de murciélagos

Use of artificial refuges as a strategy for the conservation of bats

✉ Juan Camilo Vieda-Ortega^{1,*}, ✉ Yaneth Del Socorro Muñoz-Saba¹,
✉ Marie Jöelle Giraud-López¹, ✉ Jaime Aguirre-Ceballos², ✉ Daniel Felipe Chauz-Rojas³

¹ Grupo de Investigación Evolución y Ecología de Fauna Neotropical (EEFN), Facultad de Ciencias, Bogotá, Colombia

² Grupo de Investigación Biología de las Criptógamas de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

³ Estudios Interdisciplinarios sobre Desarrollo - CIDER, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia

Resumen

Uno de los principales problemas para la conservación de los murciélagos en Colombia es el desconocimiento que hay sobre ellos y sus servicios ecosistémicos. El objetivo de este estudio fue contribuir al entendimiento de la quiroptero fauna de la región de Pasuncha (Pacho, Cundinamarca, Colombia) mediante un inventario de especies, la instalación de refugios artificiales como estrategia de conservación y la implementación de programas de educación ambiental enfocados en el contacto entre humanos y murciélagos. Se registraron ocho especies para la región: *Artibeus lituratus*, *Carollia brevicaudum*, *Carollia castanea*, *Carollia perspicillata*, *Sturnira erythromos* (consumidoras de frutas); *Glossophaga soricina* (nectarívora-polinívora); *Eptesicus brasiliensis* (insectívora), y *Desmodus rotundus* (hematófaga). Se registró la presencia de las especies *C. brevicaudum*, *C. perspicillata* y *G. soricina* dentro de casas abandonadas, y se midieron las características poblacionales básicas de las especies presentes en la casa refugio de la Reserva Roble & Nogal. Con base en la información biótica y abiótica, se diseñó, construyó e instaló un refugio artificial dirigido (“bat box”) para especies de murciélagos consumidores de frutas, néctar y polen. Se llevó a cabo un proyecto de educación ambiental con enfoque de ciencia ciudadana para promover un cambio de percepción con relación a los murciélagos, cuyo resultado se vio reflejado en una serie de folletos ilustrativos elaborados en conjunto con la comunidad.

Palabras clave: Refugios artificiales para murciélagos (“bat boxes”); Casas refugio; Murciélagos frugívoros-nectarívoros; Corregimiento de Pasuncha; Educación ambiental; Ciencia ciudadana.

Abstract

One of the main problems for the conservation of bats in Colombia is ignorance about them and their ecosystem services. In this study, we aimed to contribute to the understanding and conservation of the bat fauna of the Pasuncha region (Pacho, Cundinamarca, Colombia) by making a species inventory, installing artificial shelters as a conservation strategy, and implementing education programs addressing human-bat interaction. We recorded eight species for the region: *Artibeus lituratus*, *Carollia brevicaudum*, *Carollia castanea*, *Carollia perspicillata*, *Sturnira erythromos* (fruit eaters); *Glossophaga soricina* (nectarivorous-polynivorous); *Eptesicus brasiliensis* (insectivore), and *Desmodus rotundus* (sanguinivorous). We found *C. brevicaudum*, *C. perspicillata*, and *G. soricina* using abandoned houses as refuges and measured the basic population characteristics of the species at the Roble & Nogal reserve. Based on the biotic and abiotic information, we designed, built, and installed a bat box for fruit eaters and nectarivorous-polynivorous species. We also implemented an environmental education project focused on citizen science to encourage changes in the community’s perceptions and behavior toward bats whose results were reflected in a series of illustrative brochures produced jointly with the community.

Keywords: Directed artificial refuges (bat boxes); House-refuges; Nectarivorous-polynivorous bats; Corregimiento of Pasuncha; Environmental education; Citizen science.

Citación: Vieda-Ortega JC, Muñoz-Saba Y del S, Giraud-López MJ, et al. Uso de refugios artificiales como estrategia para la conservación de murciélagos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):356-371, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1603>

Editor: Martha Patricia Ramírez Pinilla

***Correspondencia:**

Juan Camilo Vieda-Ortega;
jcviedao@una.edu.co

Recibido: 12 de noviembre de 2021

Aceptado: 9 de marzo de 2022

Publicado en línea: 12 de abril de 2022



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

Introducción

En Colombia, Chiroptera es el orden de mamíferos con el mayor número de especies (217) registradas (**Ramírez-Chávez et al.**, 2021). Los murciélagos son mamíferos voladores que contribuyen al mantenimiento de los ecosistemas a partir de la dispersión de semillas, la polinización de las plantas y el control biológico de insectos y vertebrados; además, son indicadores biológicos de la calidad del hábitat y ofrecen diversos servicios ecosistémicos que benefician directa e indirectamente a los humanos (**Fenton et al.**, 1992; **Medellín et al.**, 2000). Los puntos de percha y refugio naturales usados por los murciélagos pueden ser permanentes, como las cuevas, las grietas y los troncos huecos, o temporales, como el follaje, los nidos abandonados y los termiteros. También pueden usar refugios artificiales de forma temporal o permanente, por ejemplo, minas, alcantarillas, casas, edificios, o puentes, entre otros, que utilizan para el descanso o exclusivamente para la alimentación o reproducción (**Tirira**, 2007; **Vargas-Contreras et al.**, 2012; **Muñoz-Saba et al.**, 2019).

Factores antrópicos como la expansión agropecuaria y urbana y el desconocimiento general que se tiene sobre este grupo biológico (asociado con diferentes enfermedades emergentes, mitos y concepciones erradas), exacerbaban los conflictos entre humanos y murciélagos, favoreciendo su quema y la de sus refugios (**Romero-Ruiz et al.**, 2012; **Casallas-Pabón et al.**, 2019; **Muñoz-Saba et al.**, 2019; **Andersen et al.**, 2020; **Ali et al.**, 2020; **Irving et al.**, 2020; **Jin et al.**, 2020; **Latinne et al.**, 2020; **Hu et al.**, 2021). El problema se acentúa por la creencia generalizada de que todas las especies son hematófagas y atacan el ganado (**Segura-Trujillo & Navarro-Pérez**, 2010; **Cajas-Castillo et al.**, 2013). La eliminación de los murciélagos ha disminuido las poblaciones y, en algunos casos, ha llevado a la extinción local de algunas especies (**Saunders et al.**, 1991; **Atagana et al.**, 2021; **Cabrera et al.**, 2016). Estos factores constituyen problemas de conservación que se ven reflejados en la pérdida y degradación de los hábitats y la reducción de la oferta alimenticia y los refugios para especies nativas y migratorias y, por ende, en la disminución de la biodiversidad (**Wilkinson & Fleming**, 1996; **González**, 2013).

Una alternativa de manejo y conservación consiste en el uso de refugios artificiales dirigidos, conocidos como cajas para murciélagos (*bat boxes*), efectivos para especies de regiones templadas de Europa y Estados Unidos, pero cuyo éxito es aún limitado en condiciones tropicales (**Alberico et al.**, 2004; **Ciechanowski**, 2005; **Kelm**, 2008; **Leighton & Casallas-Pabón**, 2012; **Schöner**, 2012; **Dodds & Bilston**, 2013; **Rodríguez et al.**, 2015; **Ruegger**, 2016). Otros esfuerzos de conservación, promovidos en gran medida por las ONG, se han enfocado en el trabajo de divulgación y educación en comunidades humanas (**Kingston et al.**, 2006), con lo que se han obtenido importantes avances en el reconocimiento de los murciélagos como un grupo de importancia económica y de conservación.

En el corregimiento de Pasuncha (municipio de Pacho, Cundinamarca, Colombia), hay casas abandonadas y en construcción que los murciélagos utilizan como refugios. No obstante, debido al desconocimiento de su importancia por parte de los pobladores locales, están en riesgo de ser demolidas, lo que afectaría a los murciélagos allí establecidos. El objetivo de este estudio, adelantado en el marco del macroproyecto “El conocimiento de la diversidad biológica al servicio de las comunidades regionales”, fue contribuir a la comprensión de la quiropterofauna del área a partir del conocimiento del ensamblaje de las especies; la propuesta de un nuevo modelo de caja para murciélagos de especies tropicales como posible estrategia de mitigación de los conflictos entre humanos y murciélagos, y el reconocimiento de la comunidad del rol que cumplen los murciélagos en la conservación de los ecosistemas mediante la educación ambiental basada en la ciencia ciudadana.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el corregimiento de Pasuncha (05°20'00,0" N, 74°15'00,0" W), en el municipio de Pacho, provincia de Río Negro, departamento de Cundinamarca, Colombia). El corregimiento tiene un área aproximada de 43 km² y se localiza en el

flanco oriental de la cordillera Oriental, entre los 1.000 y los 2.000 m s.n.m., y su clima es cálido húmedo y cálido seco. El corregimiento lo conforman 15 veredas: Aguachentales, Alto Yasal, Bajo Pasuncha, Bajo Yasal, Cerrezuela, El Fical, El Palmar, El Pensil, La Mona, Palancana, Quebrada Honda, San José, San José de la Gaita, Santa Rosa y Venadillo (Prieto *et al.*, 2003; Bello & Páez, 2018). Se establecieron tres sitios de muestreo: la Reserva Roble & Nogal (vereda Santa Rosa, 05°17'08,70" N, 74°13'21,61" W), y las fincas Patio Bonito (05°16'49,98" N, 74°14'23,78" W) y San Martín (05°17'22,81" N, 74°14'05,99" W) en la vereda El Pensil, donde se habían detectado casas refugio, es decir, casas abandonadas con ocupación de murciélagos (Figura 1). Durante el muestreo hubo un periodo de sequía, con una temperatura media entre los 20 y los 21 °C, humedad relativa de 70 a 80 %, precipitaciones bajas y escasa nubosidad (Meteoblue, 2020).

En cuanto al componente biótico, la zona se caracteriza por agroecosistemas donde dominan los parches de áreas agrícolas heterogéneas con cultivos, pastizales, y parches de fragmentos y corredores de vegetación natural, principalmente secundaria, en forma de relictos de bosques subandinos, húmedos premontanos, y vegetación arbustiva y herbácea que forma rastrojos; son relevantes también los bosques de galería asociados con la gran cantidad de nacimientos de agua que tiene el corregimiento (aprox. 210) y las condiciones de humedad de la región.

Ensamblaje de murciélagos

Con el fin de establecer las especies de murciélagos y su organización trófica, se hicieron muestreos entre el 2 y el 4 de septiembre de 2019 en los hábitats asociados con las casas refugio utilizando redes de niebla según la metodología de Muñoz-Saba *et al.* (2019). En cada sitio de muestreo se dispusieron tres redes de 9 x 2,5 m entre las 18:00 y las 06:00 h.; el esfuerzo de muestreo fue de 761,85 m²/h en la Reserva Roble & Nogal, 613,575 m²/h en Patio Bonito, y 819,675 m²/h en San Martín.

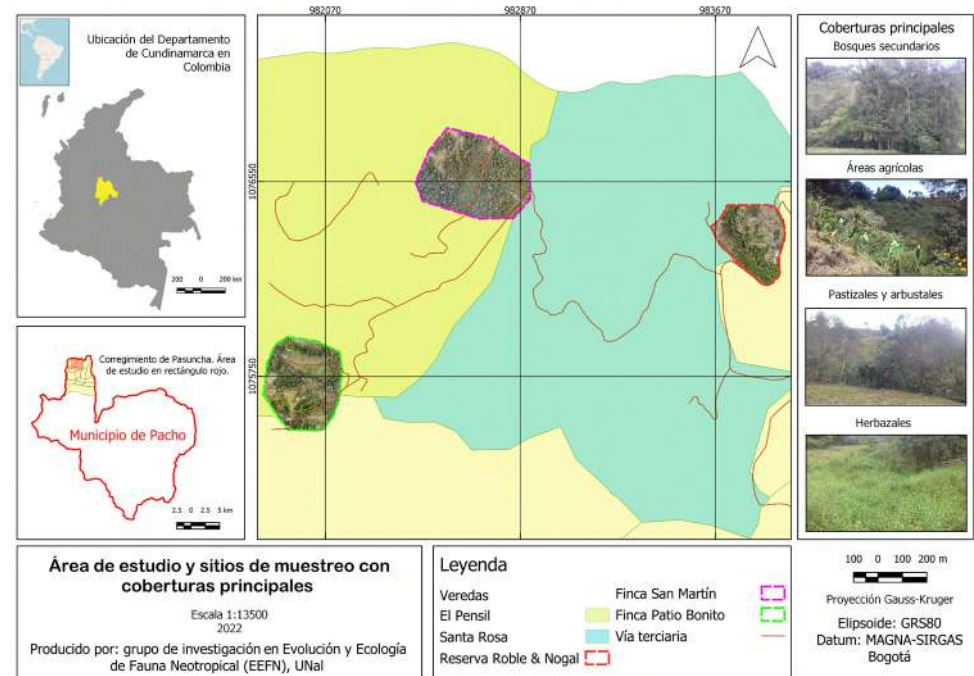


Figura 1. Ubicación del área de estudio y sitios de muestreo con los principales tipos de cobertura vegetal. Corregimiento de Pasuncha, municipio de Pacho, Cundinamarca. Elaboró: Grupo de Investigación Evolución y Ecología de Fauna Neotropical (EEFN), julio 2021

Se tomaron las medidas morfométricas y la información de campo de los individuos capturados con red en cada muestreo (ver siguientes secciones) según **Muñoz-Saba et al.** (2019). Se registró la longitud total (LT), la longitud de la cola (LC), la de la oreja (LO), la de la pata (LP), las del antebrazo y la tibia (en caso de pertenecer al género *Carollia*), y la del calcáneo, así como el peso, usando una regleta metálica y un calibrador digital con resolución de $\pm 0,5$ mm y $\pm 0,2$ mm, y una balanza de resorte de ± 1 g. Siguiendo los lineamientos establecidos por **Muñoz-Saba et al.** (2019), también se registraron en formatos de campo la categoría de edad, el sexo y el estado reproductivo, especificaciones del muestreo y la captura, la identificación preliminar y, en caso de recolección, el tipo de preservación y la especificación de las colecciones asociadas. La identificación de los ejemplares recolectados fue corroborada en laboratorio siguiendo las claves taxonómicas de **Díaz et al.** (2011).

Los seis ejemplares recolectados (Roble & Nogal: número de colección TRP001, TRP002; San Martín: TRP004, TRP005, TRP007; Patio Bonito: TRP006), más tres adicionales de un muestreo complementario (municipio de Topaipí, vereda Mamerta, quebrada El Infierno: TRP008-TRP010), fueron sacrificados siguiendo los principios éticos sugeridos en **Muñoz-Saba et al.** (2019) y se depositaron en la Colección de Mamíferos Alberto Cadena-García del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia (ICN-MHN-Ma 24769-24777; proyecto de investigación, código Hermes: 46961).

Casas refugio: caracterización y especies encontradas

En cada casa refugio se caracterizaron la riqueza y el ensamblaje de especies, así como las condiciones físico-estructurales (Figura 1S), según lo propuesto por **Muñoz-Saba et al.** (2019). El muestreo, a cargo de dos personas, no duró más de 30 minutos y se evitaron el ruido y los movimientos fuertes para no perturbar a los murciélagos.

En cuanto a las casas refugio, se tuvieron en cuenta las siguientes categorías y variables (Tabla 1S): 1) la localización, registrando la ubicación geográfica, la distancia a la vegetación arbustiva-arbórea, y la orientación cardinal; 2) las características estructurales, es decir, las dimensiones externas e internas (longitud, ancho, alto), los posibles puntos de entrada y salida de los murciélagos (aleros del techo, huecos, puertas, ventanas), y las características de los materiales, su textura y estructura (por ejemplo, niveles de la construcción, ubicación de paredes, vigas, vetas), y 3) las condiciones medioambientales (analizadas a la luz del día entre las 08:00 y las 15:00 h) de luz (oscuridad: ausencia de luz, penumbra: escaso ingreso de luz, luz: presencia de luz) y de ruido (ausencia, presencia).

En cuanto a los murciélagos, se tuvieron en cuenta (Tabla 1S): 1) las características de percha: ubicación espacial de los murciélagos dentro de la casa refugio, tipo de estructura usada para percha, y material de la percha; 2) la agregación (forma de distribución de los individuos): solitarios, aglomerados (contacto en sentido horizontal), racimos (contacto en sentido vertical), el número de individuos por manada registrado con un contador manual, y el número total de individuos a partir de la suma de individuos de cada una de las manadas; 3) el tipo de colonia: monoespecífica (una sola especie), monogénica (varias especies de un solo género), intergenérica (varias especies de diferentes géneros), y el número de especies y gremios tróficos, y 4) el uso de las casas refugio (inferido a partir de la presencia, ubicación y cantidad del guano formado por la mezcla de los excrementos de murciélago y otros vertebrados, cadáveres y material regurgitado): fijo u ocasional, la abundancia del guano: ausente, raro (pocas excretas: 1-3 registros), común (montículos pequeños: 4-20 registros), muy común (montículos grandes: > 21 registros), y, por último, la distribución del guano.

Posteriormente, se capturaron manualmente algunos ejemplares usando guantes de protección y redes, con el fin de verificar su taxonomía. Todas las actividades con el equipo de protección individual para minimizar los riesgos asociados al contacto con el guano, el daño a los murciélagos e investigadores, y el estado de deterioro de las casas (guantes de látex y de tela, protección ocular y respiratoria, botas de campo y chaleco).

Estructura poblacional de las especies en la comunidad de murciélagos

Debido al proceso de demolición de la casa y a la inminente pérdida del refugio, se definió la estructura poblacional de las especies presentes en la casa de la Reserva Roble & Nogal, la cual se bordeó con redes de niebla para evitar que los murciélagos escaparan, mientras que dos personas en el interior los recolectaban de forma manual y con jamas.

Los individuos capturados se colocaron en bolsas de tela separadas, en las cuales no duraron más de 30 minutos, y se registró la información de campo de cada uno. Después, se marcaron con un perforador en el plagiopatagio del ala derecha, se liberaron y se ubicaron manualmente dentro de las cajas para murciélagos; las redes instaladas sirvieron para excluir a los liberados y evitar su retorno a la casa refugio.

Diseño e instalación de la caja para murciélagos

Se construyó una única caja para murciélagos con un diseño ajustado a las variables bióticas y abióticas registradas en la casa refugio de la Reserva Roble & Nogal. Con base en la literatura sobre el tema de refugios y la consulta con expertos en murciélagos y arquitectura, se definieron los criterios para el diseño y la construcción de la caja (**Figura 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1603/3217>, **Tablas 1S, 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1603/3217>). La estructura primaria se hizo en Bogotá y se finalizó en el corregimiento de Pasuncha con el apoyo de algunos de los habitantes.

Trabajo de educación ambiental y ciencia ciudadana

Los aspectos de la biología, la ecología y la importancia de la quiropterofauna, especialmente con relación a las especies identificadas en el área de estudio y los fundamentos del uso de los refugios artificiales dirigidos (*bat boxes*) como propuesta de manejo y conservación, se integraron a las actividades de educación y participación basadas en la ciencia ciudadana como una estrategia de enfoque múltiple en la mitigación de los conflictos entre humanos y murciélago. El trabajo con la comunidad se hizo con la colaboración de las autoridades locales (el personero, el párroco y el presidente de la junta de acción comunal), y las jornadas educativas se llevaron a cabo entre las 10:00 y 12:00 h en el polideportivo del corregimiento, presentando las actividades con ilustraciones, grabaciones, fotografías y videos.

Las jornadas (Caja 1S) se llevaron a cabo el 7 de septiembre y el 10 de noviembre de 2019 aplicando los métodos de estudios socioculturales y estuvieron a cargo de una de las investigadoras; se desarrollaron en dos sesiones para evaluar los cambios en la percepción de los murciélagos.

Resultados

Ensamblaje de murciélagos

Se registraron dos familias y ocho especies de murciélagos correspondientes a cuatro gremios tróficos en el corregimiento de Pasuncha. El ensamblaje estaba conformado por el gremio frugívoro (62,5 %), con cinco especies de la familia Phyllostomidae (Carollinae: *Carollia brevicaudum* Schinz, 1821, *Carollia castanea* H Allen, 1890, *Carollia perspicillata* Linnaeus, 1758); el Stenodermatinae (*Artibeus lituratus* Olfers, 1818 y *Sturnira erythromos* Tschudi, 1844); por los nectarívoros-polinívoros (12,5 %) (*Glossophaga soricina* Pallas, 1766 (Phyllostomidae: Glossophaginae); por insectívoros (12,5 %) (*Eptesicus brasiliensis* Desmarest, 1819 (Vespertilionidae), y por los sanguívoros (12,5 %) (*Desmodus rotundus* É Geoffroy Saint Hilaire, 1810, Phyllostomidae: Desmodontinae) (**Figura 2**).

Casas refugio: caracterización y especies

Las tres casas refugio eran antiguas y estaban deterioradas, ya que se construyeron en la primera mitad del siglo XX y fueron abandonadas a principios del siglo XXI; se evidenció que para su cimentación se hizo una tala. En su edificación se emplearon árboles de la región como el chicalá (*Tabebuia* Gomes ex DC; Bignoniaceae), el roble



Figura 2. Murciélagos del corregimiento de Pasuncha, municipio de Pacho, Cundinamarca. **a)** *Artibeus lituratus*. **b)** *Carollia brevicaudum*. **c)** *Carollia castanea*. **d)** *Carollia perspicillata*. **e)** *Desmodus rotundus*. **f)** *Eptesicus brasiliensis*. **g)** *Glossophaga soricina*. **h)** *Sturnira erythromos*

(*Quercus* (Bonpl.); Fagaceae), y el amarillo (*Ocotea* Aubl; Lauraceae). Todas las casas tenían techo de zinc en la parte externa y madera en la parte interna (techo de las habitaciones), con vigas de madera de 12 a 15 cm de grosor y superficie corrugada por las vetas de la madera, así como fisuras producto del desgaste natural, la acción de insectos xilófagos y su uso como percha por parte de los murciélagos. El espacio entre el techo inferior (cuartos) y el superior (casa) se evidenció como un punto importante para el movimiento de los murciélagos, que accedían al resto de los cuartos a través de las aberturas del techo inferior (**Figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1603/3217>).

La ubicación de los murciélagos dentro de las casas era aleatoria, sin una preferencia evidente por la orientación cardinal, pero sí evitando las fuentes de perturbación (luz, ruido, vibraciones) y restringida a la presencia de estructuras de percha. Los murciélagos se encontraron perchando en el techo y en las vigas y sus vetas, principalmente. El tipo de agregación fue similar (aglomerados, en ocasiones solitarios). En la Reserva Roble & Nogal, el 3 de septiembre se registraron 25 individuos, aproximadamente, pertenecientes a las especies *C. brevicaudum*, *C. perspicillata* y *G. soricina*; en la finca Patio Bonito, se encontraron cerca de 45 individuos pertenecientes a la especie *C. perspicillata*, y en la finca San Martín, cerca de 861 pertenecientes a la especie *C. perspicillata* (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1603/3217>).

Estructura poblacional de las especies en la comunidad de murciélagos

En total se identificaron 15 individuos, ocho de ellos capturados para medir su edad, sexo y estado reproductivo (**Tabla 1**).

Diseño e instalación de la caja para murciélagos

Diseño. Se tuvo en cuenta la caracterización biótica y abiótica de las casas refugio, en especial la de la Reserva Roble & Nogal (**Tablas 1S, 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1603/3217>). La caja medía 70 cm de ancho, 30 cm de profundidad y 100 cm de alto. Se empleó aglomerado de madera por su bajo peso y su superficie corrugada. Se instalaron diez listones de madera a lo largo de la caja en la parte interna del techo, el cual se impermeabilizó con una lámina de acrílico. El refugio artificial se fijó a una vara de madera de 4 m de altura y 15 cm de ancho, y sus superficies interna y externa se impregnaron con guano proveniente de la casa refugio (**Figura 2Sa, b**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1603/3217>).

Tabla 1. Distribución de sexos, clase de edad y estado reproductivo de las especies de la colonia en la Reserva Roble & Nogal

Número de liberación	Especie	Sexo	Edad	Condición reproductiva
3	<i>C. perspicillata</i>	♀	Subadulto	Nulípara
4	<i>C. perspicillata</i>	♂	Subadulto	No testiculado
5	<i>C. perspicillata</i>	♀	Subadulto	Nulípara
6	<i>C. perspicillata</i>	♂	Subadulto	No testiculado
7	<i>C. perspicillata</i>	♀	Subadulto	Nulípara
9	<i>C. perspicillata</i>	♀	Subadulto	Nulípara
10	<i>C. perspicillata</i>	♂	Subadulto	No testiculado
8	<i>C. brevicaudum</i>	♂	Subadulto	No testiculado
*	<i>Carollia</i> sp.		Individuos observados volando: 5	
*	<i>G. soricina</i>		Individuos observados volando: 2	

*No capturados

Instalación. La caja se situó en la Reserva Roble & Nogal, en el punto 05°17'07,62" N, 74°13'22,51" W, tomando como referencia los corredores naturales y la presencia de claros dominados por plántulas de *Piper* L (nombre común: cordoncillo; Piperaceae), y de *Vismia* Vand (n.c.: punta de lanza; Hypericaceae), indicadores de procesos de sucesión primaria favorecida por las rutas de forrajeo de las especies *C. castanea* y *C. perspicillata* (**Figura 2Sc**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1603/3217>).

Considerando que la vegetación asociada con la casa refugio se caracteriza por los estratos arbustivo (1,51-5 m) y subarbóreo (5,1-12 m), se definió *in situ* la altura de instalación a partir de los 6 m desde el suelo. Además, se consideró el límite entre el corredor arbóreo inferior (12,1-25 m) y las áreas de cultivo o pastizales como punto de acceso a mayores recursos alimenticios, áreas de percha, protección y forrajeo. La vara de soporte de la caja se enterró a una profundidad de un metro y se aseguró con alambre y guayas al fuste de un árbol de chicalá o flor amarilla (*Tabebuia* Gomes ex DC (Bignoniaceae)), de una altura de 10 a 12 m, diámetro altura pecho (DAP) de 80 a 90 cm, y localizado entre 40 y 50 m en línea recta en dirección sureste de la casa refugio.

Las posibles entradas de los murciélagos (techos, paredes, puertas) a la casa refugio se bloquearon con polisombra para evitar el reingreso de los murciélagos previamente capturados y medidos; estos últimos, de las especies *C. brevicaudum* y *C. perspicillata*, fueron instalados uno a uno manualmente en la caja, teniendo cuidado de que percharan efectivamente.

Trabajo de educación ambiental y ciencia ciudadana

A las sesiones educativas asistieron cerca de 40 habitantes entre los 3 y los 70 años de edad, con un porcentaje aproximado de 50 % de mujeres y otro tanto de hombres. En la primera jornada se evidenció un desconocimiento generalizado de aspectos puntuales como la anatomía y la morfología de los murciélagos, así como la marcada percepción negativa que de ellos tenían algunos de los asistentes. La mayoría de los participantes tenía un gran conocimiento sobre los refugios naturales y artificiales de los murciélagos y algunos conocían bien los servicios ecosistémicos que brindan y la importancia de su conservación (**Figura 3SI**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1603/3217>).

En la segunda jornada se observó un cambio general en la percepción de la comunidad en torno a los murciélagos, pues se pasó de un conocimiento básico, comúnmente sesgado e incorrecto, a un conocimiento personal amplio y sólido de su biología e importancia. Este cambio fue notable especialmente en aquellos que asistieron a las dos jornadas educativas, e incluso mayor en las habitantes que apoyaron el muestreo (**Figura 3SII**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1603/3217>).

El material gráfico y los registros recopilados en los conversatorios dieron como resultado el desarrollo del póster informativo “Los murciélagos de Pasuncha”, y de una serie de folletos: ¿Qué son los murciélagos?, ¿Qué murciélagos hay en Pasuncha?, ¿Dónde viven los murciélagos?, ¿Qué comen los murciélagos?, ¿En dónde buscamos nuestro alimento?, y ¿Cómo hacer un murciélagos? (**Figura 4S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1603/3217>).

Discusión

Ensamblaje de murciélagos

La fragmentación de los ecosistemas y la deforestación selectiva, entre otras formas de perturbaciones antrópicas, se encuentran entre los procesos que mayor incidencia tienen en la distribución y abundancia de las especies de murciélagos, las cuales pueden presentar, según su historia evolutiva, un mayor o menor grado de adaptabilidad a las condiciones antrópicas (Presley *et al.*, 2008; Meyer *et al.*, 2016).

Las especies *C. brevicaudum* y *C. perspicillata*, registradas en todas las casas refugio, y *G. soricina*, registrada en la Reserva Roble & Nogal, se encuentran asociadas a ambientes tropicales sujetos a perturbaciones que tienden a aumentar (Pons & Cosson, 2002; Sampaio

et al., 2003; Delaval & Charles-Dominique, 2006; Meyer & Kalko, 2008; Meyer *et al.*, 2008; Estrada-Villegas *et al.*, 2010). Estas especies dominan los bosques secundarios en estadios sucesionales tempranos a intermedios (Brosset *et al.*, 1996; Castro-Luna *et al.*, 2007a, b; Willig *et al.*, 2007; de la Peña-Cuéllar *et al.*, 2012; Vleut *et al.*, 2012) y allí participan en los procesos de regeneración mediante la dispersión de semillas y la polinización de las plantas (Muscarella & Fleming, 2007). La predominancia de *Carollia* spp. en este tipo de hábitats, característicos de las casas refugio visitadas, podría deberse, en parte, a que son especies generalistas y aprovechan diversos recursos alimenticios como los frutos de los géneros *Cecropia* Loeffl., *Piper*, *Solanum* L y *Vismia* Vand, y, además, complementan su dieta con polen, néctar, algunos insectos y hojas (Melo *et al.*, 2004; Oria & Machado, 2007; Maguiña *et al.*, 2012; Alviz, 2014; Ríos-Blanco & Pérez-Torres, 2015; Pereira *et al.*, 2017; Muñoz-Saba *et al.*, 2019).

Así, la presencia de estas especies en las casas refugio se esperaba y concuerda con los hábitats asociados, entre ellos, extensas áreas de cultivos y pastizales, pero también puntos de transición sucesional representada por bancos de plántulas de especies de consumo (v.g. *Piper*, *Vismia*) y vegetación arbustiva en la zona ecotonal entre las áreas antrópicas y los remanentes de vegetación secundaria. En las fincas Patio Bonito y San Martín, en donde la vegetación arbórea secundaria era más representativa, la presencia de las especies frugívoras y percheras *A. lituratus* y *S. erythromos* se relacionaría con el hecho de que son más abundantes en hábitats conservados o en estadios sucesionales avanzados que ofrecen mejores recursos alimenticios y una mayor cobertura de refugios para la reproducción, en comparación con áreas perturbadas que también pueden hacer parte de su área de distribución (Muñoz-Saba *et al.*, 2019).

En cuanto al ensamblaje de los murciélagos al interior de las casas refugio, solo se comprobó la coexistencia de las especies *C. brevicaudum* y *C. perspicillata* con *G. soricina* en la Reserva Roble & Nogal. La asociación entre *C. perspicillata* y *G. soricina* en colonias ya ha sido documentada (Díaz & Linares-García, 2012; Rengifo *et al.*, 2013; Camelo-Pinzón & Esquivel-Melo, 2015).

La estructura social de *C. perspicillata* se caracteriza por un patrón de poliginia en la cual se establecen harenes conformados por un macho y varias hembras, en tanto que los machos restantes se mantienen solos o en grupos (Porter, 1978; Williams, 1986; Knörnschild *et al.*, 2016; Martínez-Medina & Pérez-Torres, 2018). Sin embargo, dicha estructura no se evidenció en la casa refugio de la Reserva Roble & Nogal, ya que la representatividad de sexos fue homogénea (1:1), y todos los individuos eran subadultos sin actividad reproductiva.

Aunque se han registrado estructuras de este tipo, no son típicas en condiciones ambientales estables (Porter, 1978; Williams, 1986). Los aspectos relacionados con la reproducción no parecen explicar el estado de la población, pues, aunque la fecha del muestreo no coincidió con los periodos reproductivos de la especie (junio-agosto y febrero-mayo) (Cloutier & Thomas, 1992), lo cual podría relacionarse con la nula actividad reproductiva, esta no se asocia con la representación equitativa de los sexos.

Las condiciones climáticas durante el periodo de muestreo y la oferta alimenticia tampoco explicarían la estructura observada, debido, principalmente, al hábito generalista de *C. perspicillata* y su posibilidad de aprovechar recursos humanos, lo que la convierte en una especie sinantrópica (Voigt *et al.*, 2016).

Por lo tanto, lo más factible es que las diversas intervenciones en la casa refugio hayan alterado las características ambientales y espaciales en su interior, afectando la estructura social, el tipo de residencia, y las relaciones interespecíficas e intraespecíficas (Sedgeley & O' Donnell, 1999). Ello daría cuenta de la fuerte disminución del número de individuos, que pasó de cientos (según lo reportado por los habitantes locales, y lo evidenció la cantidad de guano acumulado y el tiempo de abandono de la casa), a solo 25 (3 septiembre 2019) y 15 (9 noviembre 2019) durante los muestreos, todos ellos subadultos. La hipótesis que planteamos es que esta casa refugio se convirtió en un sitio de paso, pues no tenía las condiciones óptimas para el establecimiento de harenes o colonias de maternidad.

Diseño, construcción e instalación de la caja para murciélagos

El diseño de la caja se basó en la caracterización estructural de las casas refugio. Se tomaron varios de sus elementos como evidencia de ocupación efectiva por parte de los murciélagos y se consideró la historia natural y la ecología de las especies registradas (**Tablas 1S, 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1603/3217>). Esto porque la mayoría de la información sobre el tema, en especial de los modelos actuales de cajas para murciélagos, se limita a las especies de la familia Vespertilionidae, propia de climas templados en Europa y Estados Unidos, que no comporten la misma historia natural de las especies neotropicales (**Neilson & Fenton, 1994; Brittingham & Williams, 2000; Dillingham et al., 2003; Lourenço & Palmeirim, 2004; White, 2004; Ritzl et al., 2005; Flaquer et al., 2006; Long et al., 2006; Tuttle et al., 2013; Mering & Chambers, 2014; Rueegger, 2016; Garland et al., 2017; López-Baucells et al., 2017; Bideguren et al., 2018**).

En contraste, los trabajos sobre los murciélagos del Neotrópico son pocos (**Alberico et al., 2004; Kelm, 2008; Kelm et al., 2008; Schöner, 2012; Reid et al., 2013**) y los modelos propuestos han tenido resultados variables. Por ello, la propuesta de un modelo dirigido a especies específicas (murciélagos frugívoros, nectarívoros-polinívoros) contribuye a ampliar el campo de uso de las cajas para murciélagos con fines de conservación en el Neotrópico.

El sitio de instalación en el borde del corredor del fragmento de bosque secundario (**Figura 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1603/3217>) cumplió con las condiciones registradas por **Ortiz-Ramírez et al. (2006)** en cuanto a las preferencias en la selección de refugios por parte de *C. perspicillata*: árboles de gran altura y diámetro en áreas de bosque tropical maduro o en estado de sucesión avanzado. Se espera que este modelo de refugio artificial dirigido permita el establecimiento de los murciélagos trasladados, además de atraer otros individuos. Aunque se evidenció su éxito como estructura en la cual los murciélagos pueden perchar (los individuos trasladados se mantuvieron por unos segundos en el interior de la caja), se debe comprobar su efectividad a largo plazo con estudios adicionales que integren a la comunidad en el proceso de construcción, instalación y monitoreo de nuevas cajas, estrategia adecuada para reducir los conflictos entre humanos y murciélagos y favorecer su conservación (**Salazar et al., 2010**).

Cabe resaltar que esta estrategia surge como respuesta a que, inicialmente, muchos de los habitantes no deseaban ver a los murciélagos en ningún tipo de construcción humana, incluidas las casas abandonadas. No obstante, nuevos esfuerzos de pedagogía pueden orientarse hacia la conservación de estas casas abandonadas para mantener a los murciélagos residentes y los servicios ecosistémicos que prestan.

Trabajo de educación ambiental y ciencia ciudadana

Los resultados obtenidos evidenciaron mitos y creencias, en ocasiones fuertemente arraigadas, como la idea de que todos los murciélagos son hematófagos (**Cajas-Castillo et al., 2013**), que son ratones alados y que se asocian con la oscuridad (**Vargas-Contreras et al., 2012**), o producen temor y repulsión (**Bernal, 2016**).

La inclusión de los habitantes en las jornadas educativas y los muestreos, y su integración al componente educativo-participativo, permitió establecer un diálogo que no se limitó a la exposición, sino que favoreció la apropiación del conocimiento de la fauna local por parte de la comunidad, hecho que se reflejó en la elaboración de folletos, posters y carteleras. Asimismo, el desarrollo de las actividades en varios grupos demográficos y a nivel grupal e individual permitió la expresión del liderazgo (incluso de niños), el aumento de confianza, el trabajo en equipo, la difusión de lo aprendido, la asimilación de nuevos conceptos, el reconocimiento de situaciones particulares, y la asociación de eventos en torno a esta fauna, lo que constituye un avance en la construcción de una visión de los murciélagos que reconoce su importancia en múltiples aspectos de la cotidianidad, como la dispersión de semillas, la polinización de plantas cultivadas, los efectos en los

insectos plaga y su control, la regeneración de los bosques fuente de recursos, el mantenimiento de procesos ecosistémicos, y los encuentros con los murciélagos consumidores de sangre, entre otros.

Los resultados obtenidos son congruentes con lo observado en varias experiencias con actividades divulgativas similares que cambian la percepción negativa de los murciélagos, como la de la “carpa de los murciélagos”, cuya efectividad se ha evaluado en otros estudios (Galarza *et al.*, 2013), la de la “murci-maleta viajera”, en la que se usan personajes ficticios y se orienta especialmente a los niños (Briones & España, 2012), y la del “festival de los murciélagos”, en la que se dan conferencias al público en general, talleres, cursos, obras de teatro, y foros (Cisneros-Palacios, 2012), así como los diferentes ejercicios sobre el tema liderados por el Programa para la Conservación de los Murciélagos de Colombia (PCMCo, 2020).

La inclusión de las comunidades permite, por lo tanto, establecer estrategias de conservación; sin embargo, las acciones efectivas se logran cuando se integra a las comunidades locales y académicas, las ONG, organismos gubernamentales, e instituciones de financiamiento (Gómez-Ruiz *et al.*, 2015). La experiencia del trabajo con la comunidad de Pasuncha evidenció la necesidad de integrar los centros de investigación y educación y las comunidades, con el apoyo de entidades nacionales e internacionales.

En resumen, se hicieron los primeros registros de las siguientes especies de murciélagos en el corregimiento de Pasuncha (municipio de Pacho, Cundinamarca): *A. lituratus*, *C. brevicaudum*, *C. castanea*, *C. perspicillata*, *S. erythromos* (consumidoras de frutas); *G. soricina* (nectarívora-polinívora); *E. brasiliensis* (insectívora), y *D. rotundus* (hematófaga). Además, se comprobará la efectividad de la caja para murciélagos en estudios posteriores para proponerla como estrategia de conservación de los ecosistemas, orientando su diseño, construcción e instalación a especies específicas con el enfoque de ensamblaje de murciélagos. Por último, como estrategia para reducir los conflictos entre humanos y murciélagos, deben incentivarse estrategias educativas y de participación que integren los diferentes sectores sociales.

Agradecimientos

A Helver Enrique Hernández Bohada, Liro Cabrera, Edwin Cabrera Lizarazo, David Cabrera Lizarazo, Fabián Cabrera Lizarazo, Mireya Cabrera y la familia Cabrera, quienes nos brindaron alojamiento durante el trabajo de campo, apoyo en los muestreos, en la construcción e instalación de la caja para murciélagos, y en el desarrollo de las actividades educativas. A la comunidad del corregimiento de Pasuncha por su hospitalidad e interés en compartir sus ideas y conocimientos. Al corregidor Cerafín Aguillón Rojas por permitir las actividades de trabajo comunitario en el polideportivo, al párroco de esta localidad, Wilman Carrillo, por la difusión del evento al finalizar la misa dominical y al presidente de la Junta de Acción Comunal, Jesús Antonio Pachón Santana, por la colaboración logística durante las jornadas educativas. Al arquitecto Miguel Ángel Muñoz Saba por su asesoría desde el punto de vista arquitectónico en el diseño de la caja para murciélagos, así como a las muchas personas de diferentes partes del país que aportaron libros y otros materiales que se entregaron como premios durante las jornadas educativas; al Dr. Thomas R. Defler por la traducción al inglés. Se agradece la autorización del uso de las fotografías a Nathaly Calvo-Roa (*Carollia perspicillata*, *Glossophaga soricina*, *Sturnira gr lilium*), Paul Andrés Gómez-Sandoval (*Artibeus lituratus*), David Marín (*Carollia brevicaudum*), Diego G Tirira, al Archivo Murciélago Blanco (*Carollia castanea*, *Desmodus rotundus*) y a Innovagro SAS (Imágenes de satélite, cobertura vegetal); las fotos no especificadas pertenecen al Grupo de Investigación Evolución y Ecología de Fauna Neotropical (EEFN).

Información suplementaria

Ver información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1603/3217>

Contribución de los autores

JCVO: trabajo de grado, diseño, toma de datos, determinación del material, análisis, escritura del documento, trabajo de educación ambiental y ciencia ciudadana; YMS: dirección del trabajo de grado, concepción, determinación del material biológico, diseño, análisis, trabajo de educación ambiental y ciencia ciudadana; MJGL: codirectora, diseño y análisis del trabajo de educación ambiental y de ciencia ciudadana; JAC: asesor en el tema de vegetación, trabajo de educación ambiental y ciencia ciudadana; DFRC: asesor de diseño de las cajas para murciélagos, trabajo de educación ambiental y ciencia ciudadana.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Referencias

- Alberico, M., Saavedra-R., C., García-Paredes, H.** (2004). Criterios para el diseño e instalación de casas para murciélagos: Proyecto CPM (Cali, Valle Del Cauca, Colombia). *Actual Biol.* **26** (80): 5-11.
- Ali, S., Hamma-Soor, T., Babakir-Mina, M., Dimonte, S., Greco, F.** (2020). Is it scaly anteater or bat a real origin of the 2019-Novel CoV: A probable hypothesis? *KJAR Kurdistan Journal of Applied Research.* **5**: 1-12. <https://doi.org/10.24017/covid.1>
- Alviz, A.** (2014). Dinámica temporal de la dieta de *Carollia perspicillata* en la Cueva Macaregua, Santander-Colombia. Trabajo de grado, Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Andersen, K.G., Rambaut, A., Lipkin W.I., Holmes, E.C., Garry, R.F.** (2020). The proximal origin of SARS-CoV-2. *Nature Medicine.* **26**: 450-455.
- Atagana, P.J., Bakwo, E.M., Kekeunou, S.** (2021). Responses of Bat Communities (Mammalia: Chiroptera) to Forest Loss and Habitat Conversion in Southern Cameroon. *Tropical Conservation Science.* **14**: 1-8.
- Bello-A., A.M. & Paz-F., D.N.** (2018). Estudio de viabilidad financiera de la generación de energía eléctrica a partir de paneles solares para puestos de salud en Colombia. Reporte técnico. Bogotá: Universidad Libre.
- Bernal, J.** (2016). Estrategia pedagógica para la conservación de la biodiversidad a partir de los murciélagos. Trabajo de grado. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- Bideguren, G., López-Baucells, A., Puig-Montserrat, X., Mas, M., Porres, X., Flaquer, C.** (2018). Bat boxes and climate change: testing the risk of overheating in the Mediterranean region. *Biodivers Conserv.* **28** (1): 21-35. <https://doi.org/10.1007/s10531-018-1634-7>
- Briones, S. & España, M.** (2012). Educando para conservar. La murcimaleta viajera en Guatemala. *Bol. Red. Latin. Cons Murc.* **3** (2): 7.
- Brittingham, M. & Williams, L.** (2000). Bat Boxes as alternative roosts for displaced bat maternity colonies. *Wildlife soc b.* **28** (1): 197-207.
- Brosset, A., Charles-Dominique, P., Cockle, A., Cosson, J.F., Masson, D.** (1996). Bat communities and deforestation in French Guiana. *Canadian Journal of Zoology.* **74** (11): 1974-1982.
- Cabrera-Ojeda, C., Noguera-Urbano, E.A., Calderón-Leytón, J.J., Flórez-Paí, C.** (2016). Ecología de murciélagos en el bosque seco tropical de Nariño (Colombia) y algunos comentarios sobre su conservación. *Revista Peruana de Biología.* **23** (1): 27-34.
- Cajas-Castillo, J., Kraker-Castañeda, C., Echeverría-Tello, J.** (2013). Escenarios de conservación de los murciélagos de Guatemala. *Bol. Red. Latin Cons Murc.* **4** (2): 9-11.
- Camelo-Pinzón, D.K. & Esquivel-Melo, D.A.** (2015). Estructura del ensamblaje de murciélagos (Mammalia: Chiroptera) en la cuenca media del Río Guayuriba (Acacias – Meta). Trabajo de grado. Bogotá, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Casallas-Pabón, D., Muñoz-Saba, Y., Valdívieso, N., Pinto, R.** (2019). Murciélagos de las cuevas, cavernas y áreas adyacentes de El Peñón (Andes), Santander, Colombia. En Lasso, C., Barriga, J. (Eds.), *Biodiversidad subterránea y epigea de los sistemas cársticos de El Peñón (Andes)*, Santander, Colombia (pp. 157-174). Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y COLCIENCIAS (Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación).
- Castro-Luna, A.A., Sosa, V., Castillo-Campos, G.** (2007a). Bat diversity and abundance associated with the degree of secondary succession in a tropical forest mosaic in South-Eastern Mexico. *Animal Conservation.* **10**: 219-228.

- Castro-Luna, A.A., Sosa, V., Castillo-Campos, G.** (2007b). Quantifying phyllostomid bats at different taxonomic levels as ecological indicators in a disturbed tropical forest. *Acta Chiropterologica*. **9**: 219-228.
- Ciechanowski, M.** (2005). Utilization of artificial shelters by bats (Chiroptera) in three different types of forest. *Folia Zool.* **54** (1-2): 31-37.
- Cisneros-Palacios, E.** (2012). Festival de los Murciélagos de Oaxaca 2012. *Bol Red Latin Cons Murc.* **3** (2): 8-9.
- Cloutier, D. & Thomas, D.W.** (1992). *Carollia perspicillata*: Mammalian Species. American Society of Mammalogists. **417**: 1-9.
- de la Peña-Cuéllar, E., Stoner, K.E., Avila-Cabadilla, L.D., Martínez-Ramos, M., Estrada, A.** (2012). Phyllostomid bat assemblages in different successional stages of tropical rain forest in Chiapas, Mexico. *Biodivers Conserv.* **21**: 1381-1397. <https://doi.org/10.1007/s10531-012-0249-7>
- Delaval, M. & Charles-Dominique, P.** (2006). Edge effects on frugivorous and nectarivorous bat communities in a neotropical primary forest in French Guiana. *Rev Ecol-terre vie.* **61**: 343-352.
- Díaz, M., Solari, S., Gregorin, R., Aguirre, L.F., Barquez, R.M.** (2021). Clave de identificación de los murciélagos neotropicales. Tucumán, Argentina: Programa de Conservación de los Murciélagos de Argentina. 211 pp.
- Díaz, M.M. & Linares-García, V.** (2012). Refugios naturales y artificiales de murciélagos (Mammalia: Chiroptera) en la selva baja en el noroeste de Perú. *Gayana (Concepc.)* **76** (2): 117-130.
- Dillingham, C., Cross, S., Dillingham, P.** (2003). Two environmental factors that influence usage of bat houses in managed forests of Southwest Oregon. *Northwestern Naturalist.* **84** (1): 20-23. <https://doi.org/10.2307/3536718>
- Dodds, M. & Bilston, H.** (2013). A comparison of different bat box types by bat occupancy in deciduous woodland, Buckinghamshire, UK. *Conservation Evidence.* **10**: 24-28.
- Estrada-Villegas, S., Meyer, C., Kalko, E.** (2010). Effects of forest fragmentation on aerial insectivorous bats in a land-bridge island system. *Biol Conserv.* **143**: 597-608.
- Fenton, M., Acharya, L., Audet, D., Hickey, M., Merriman, C., Obrist, M., Syme, D., Adkins, B.** (1992). Phyllostomyd bats (Chiroptera: Phyllostomidae) as indicators of habitat disruptions in the Neotropics. *Biotropica.* **24**: 440-446.
- Flaquer, C., Torre, I., Ruiz-Jarillo, R.** (2006). The value of bat-boxes in the conservation of *Pipistrellus pygmaeus* in wetland rice paddies. *Biol Conserv.* **128**: 223-230. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.09.030>
- Galarza, M., Aguirre, L., Pérez, J., Lizarro, D., Mejia, P., Barboza, K., Avilés, S., Quiroz, J., Rojas, R., Carpio, R.** (2013). Difusión sobre murciélagos en ferias y parques. *Bol Red Latin Cons Murc.* **4** (2): 12-14.
- Garland, L., Wells, M., Markham, S.** (2017). Performance of artificial maternity bat roost structures near Bath, UK. *Conservation Evidence.* **14**: 44-51.
- Gómez-Ruiz, E., Jiménez, C., Flores-Maldonado, J., Lacher, T., Packard, J.** (2015). Conservación de murciélagos nectarívoros (Phyllostomidae: Glossophagini) en riesgo en Coahuila y Nuevo León. *Therya.* **6** (1): 89-102. <https://doi.org/10.12933/therya-15-233>
- González, E.** (2013). La degradación de los montes y su efecto sobre los murciélagos en Uruguay. *Bol. Red. Latin. Cons Murc.* **4** (2): 4-6.
- Hu, B., Guo, H., Zhou, P., Shi, Z.** (2021). Characteristics of SARS-Cov-2 and COVID-19. *Nature Reviews.* **19**: 141-154. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-00459-7>
- Irving, A.T., Ahn, M., Goh, G., Anderson, D.E., Wang, L-F.** (2020). Lesson from the host defences of bats, a unique viral reservoir. *Nature.* **589**: 363-370.
- Jin, Z., Du, X., Xu, Y., Deng, Y., Liu, M., Zhao, Y., Zhang, B., Li, X., Zhang, L., Peng, C., *et al.*** (2020). Structure of M^{pro} from SARS-CoV-2 and discovery of its inhibitors. *Nature.* **582**: 289-293. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2223-y>
- Kelm, D.** (2008). Restoring lost rainforests. Artificial bat roosts attract seed-dispersing bats. *BATS. BD at Conservation International.* **26** (2): 6-7.
- Kelm, D., Wiesner, K., von Helversen, O.** (2008). Effects of artificial roosts for frugivorous bats on seed dispersal in a neotropical forest pasture mosaic. *Conserv Biol.* **22** (3): 733-741. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.00925.x>
- Kingston, T.** (2016). Cute, Creepy, or Crispy - How values, attitudes, and norms shape human behavior toward bats. En Voigt, C.C., Kingston, T. (Eds) *Bats in the Anthropocene: conservation of bats in a changing world* (pp. 571-588). Springer International AG, Cham.

- Knörnschild, M., Eckenweber, M., Fernandez, A., Nagy, M.** (2016). Sexually selected vocalizations of neotropical bats. En: Ortega, J. (Ed), *Sociality in Bats* (pp. 179-195). Suiza: Springer International Publishing AG Switzerland.
- Latinne, A., Hu, B., Olival, K.J., Zhu, G., Zhang, L., Li, H., Chmura, A.A., Field, H.E., Zambrano-Torrelío, C., Epstein, J.H., et al.** (2020). Origin and cross-species transmission of bat coronaviruses in China. *Nature Communications*. **11** (4235): 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17687-3>
- Leighton, R. & Casallas-Pabón, D.** (2012). Designing homes for tropical bats. Scientists explore artificial roosts for rebuilding forests. *Bats*. **30** (2):7-9.
- Long, R., Kiser, M., Kiser, S.** (2006). Well-placed bat houses can attract bats to Central Valley farms. *Calif Agr*. **60** (2): 91-94.
- López-Baucells, A., Puig-Montserrat, X., Torre, I., Freixas, L., Mas, M., Arrizabalaga, A., Flaquer, C.** (2017). Bat boxes in urban non-native forests: a popular practice that should be reconsidered. *Urban Ecosystems*. **20** (1): 217-255. <https://doi.org/10.1007/s11252-016-0582-9>
- Lourenço, S. & Palmeirim, J.** (2004). Influence of temperature in roost selection by *Pipistrellus pygmaeus* (Chiroptera): relevance for the design of bat boxes. *Biol Conserv*. **119**: 237-243. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2003.11.006>
- Maguiña, R., Amanzo, J., Huamán, L.** (2012). Dieta de murciélagos filostómidos del valle de Kosñipata, San Pedro, Cusco-Perú. *Revista Peruana de Biología*. **19** (2): 159-166.
- Martínez-Medina, D. & Pérez-Torres, J.** (2018). Apuntes sobre la estructura social de *Carollia perspicillata* (Chiroptera, Phyllostomidae) en la cueva Macaregua, Santander, Colombia. *Revista Biodiversidad Neotropical*. **8** (1): 14-21. <https://doi.org/10.18636/bioneotropical.v8i1.687>
- Medellín, R., Equihua, M., Amín, M.** (2000). Bat diversity and abundance as indicators of disturbance in Neotropical rainforest. *Conserv Biol*. **14**: 1666-1675.
- Melo, M., Schittini, G., Selig, P., Bergallo, H.** (2004). Seasonal variation in the diet of the bat *Carollia perspicillata* (Chiroptera: Phyllostomidae) in an Atlantic Forest area in southeastern Brazil. *Mammalia*. **68** (1): 49-55. <https://doi.org/10.1515/mamm.2004.006>
- Mering, E. & Chambers, C.** (2014). Thinking outside the box: a review of artificial roosts for bats. *Wildlife Soc B*. **38** (4): 741-751. <https://doi.org/10.1002/wsb.461>
- Meteoblue.** (2020). Archivo meteorológico Pacho. Fecha de consulta: 28 de enero de 2021. Disponible en: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/weatherarchive/pacho_colombia_3673424?fcstlength=1m&year=2019&month=9
- Meyer, C., Fründ, J., Pineda-Lizano, W.** (2008). Ecological correlates of vulnerability to fragmentation in Neotropical bats. *J Appl Ecol*. **45**: 381-391.
- Meyer, C. & Kalko, E.** (2008). Assemblage-level responses of phyllostomid bats to tropical forest fragmentation: land-bridge islands as a model system. *J Biogeogr*. **35**: 1711-1726.
- Meyer, C., Struebig, M., Willig, M.** (2016). Responses of tropical bats to habitat fragmentation, logging, and deforestation. En Voigt, C., Kingston, T. (Eds.), *Bats in the Anthropocene: conservation of bats in a changing world* (pp. 63-103). Switzerland, New York, Dordrecht, London: Springer International Publishing AG.
- Muñoz-Saba, Y., Calvo-Roa, N., Gómez-Sandoval, P.A., Casallas-Pabón, D., Lynch, J., Barrientos, L., Gómez-Sánchez, D.** (2019). Guía de campo de los mamíferos, anfibios y reptiles de Santa María (Boyacá, Colombia). Serie Guías de Campo del Instituto de Ciencias Naturales, N° 23. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Muscarella, R. & Fleming, T.H.** (2007). The role of frugivorous bats in tropical forest succession. *Biological Reviews*. **82** (4): 573-590. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185x.2007.00026.x>
- Neilson, A. & Fenton, B.** (1994). Responses of little brown *Myotis* to exclusion and to bat houses. *Wildlife Soc B*. **22** (1): 8-14.
- Oria, F. & Machado, M.** (2007). Determinación de la dieta de algunas especies de murciélagos (Mammalia: Chiroptera) de la Cordillera Central de Venezuela. *Arte, Ciencia y Tecnología*. **2** (2): 5-15.
- Ortiz-Ramírez, D., Lorenzo, C., Naranjo, E., León-Paniagua, L.** (2006). Selección de refugios por tres especies de murciélagos frugívoros (Chiroptera: Phyllostomidae) en la Selva Lacandona, Chiapas, México. *Rev Mex Biodivers*. **77** (2): 261-270.
- Programa para la Conservación de los Murciélagos de Colombia-PCMCo.** (2020). Actividades Programa para la Conservación de los murciélagos de Colombia. Fecha de consulta: 13 de enero de 2020.

- Pereira, A., da Rocha, P., Santana, P., Beltrão-Mendes, R., Ruiz-Esparza, J., Ferrari, S.** (2017). Consumption of leaves by *Carollia perspicillata* (Chiroptera, Phyllostomidae): a new dimension of the species' feeding ecology. *Mammalia*. **82** (3): 303-307. <https://doi.org/10.1515/mammalia-2016-0096>
- Pons, J. & Cosson, J.** (2002). Use of forest fragments by animalivorous bats in French Guiana. *Rev Ecol-terre Vie*. **57**: 117-130.
- Porter, F.** (1978). Roosting patterns and social behavior in captive *Carollia perspicillata*. *J Mammal*. **59** (3): 627-630. <https://doi.org/10.2307/1380245>
- Presley, S., Willig, M., Wunderle, J., Saldanha, L.** (2008). Effects of reduced-impact logging and forest physiognomy on bat populations of lowland Amazonian Forest. *J Appl Ecol*. **45**: 14-25.
- Prieto, A., Murcia, L., Gómez, L.** (2003). *Pacho, tierra de esperanza*. Bogotá, Colombia: Guadalupe. 469 pp.
- Ramírez-Chávez, H.E., Suárez-Castro, A.F., Morales-Martínez, D.M., Rodríguez-Posada, M.E., Zurc, D., Concha-Osbahr D.C., Trujillo, A., Noguera-Urbano, E.A., Pantoja-Peña, G.E., González-Maya, J.F., et al.** (2021). Mamíferos de Colombia. v1.12. Sociedad Colombiana de Mastozoología. Dataset/Checklist. <https://doi.org/10.15472/k1whs>
- Reid, J., Holste, E., Zahawi, R.** (2013). Artificial bat roosts did not accelerate forest regeneration in abandoned pastures in southern Costa Rica. *Biol Conserv*. **167**: 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.06.026>
- Rengifo, E.M., Calderón, W., Aquino, R.** (2013). Características de refugios de algunas especies de murciélagos en la cuenta alta del Río Itaya, Loreto, Perú. *Cuadernos de Investigación UNED*. **5** (1): 143-150.
- Ríos-Blanco, M. & Pérez-Torres, J.** (2015). Dieta de las especies dominantes del ensamblaje de murciélagos frugívoros de un bosque seco tropical (Colombia). *Mastozoología Neotropical*. **22** (1): 103-111.
- Ritzi, C., Everson, B., Whitaker, J.** (2005). Use of bat boxes by a maternity colony of Indiana *Myotis (Myotis sodalis)*. *Northeast Nat*. **12** (2): 217-220.
- Rodríguez-Herrera, B., Nabte, M., Cordero, E., Sánchez, R.** (2015). *Murciélagos y techos*, 1ra ed. Costa Rica: Universidad de Costa Rica. 56 pp.
- Romero-Ruiz, M., Flantúa, S., Tansey, K., Berrío, J.** (2012). Landscape transformations in savannas of northern South America: Land use/cover changes since 1987 in the Llanos Orientales of Colombia. *Appl Geogr*. **32**: 766-776.
- Ruegger, N.** (2016). Bat boxes: a review of their use and application, past, present and future. *Acta Chiropterol*. **18** (1): 279-299. <https://doi.org/10.3161/15081109ACC2016.18.1.017>
- Salazar, D., Kelm, D., Marquis, R.** (2010). Directed seed dispersal of *Piper* by *Carollia perspicillata* and its effect on understory plant diversity and folivory. *Ecology*. **94** (11): 2444-2453.
- Sampaio, E., Kalko, E., Bernard, E.** (2003). A biodiversity assessment of bats (Chiroptera) in a tropical lowland rainforest of Central Amazonia, including methodological and conservation considerations. *Stud Neotrop Fauna E*. **38** (1): 17-31.
- Saunders, D., Hobbs, R., Margules, C.** (1991). Biological consequences of ecosystem fragmentation: A review. *Conservation Biology*. **5** (1): 18-32.
- Schöner, M.** (2012). Effectiveness of artificial roosts for neotropical bat species. Fecha de consulta: 26 de septiembre de 2019. Disponible en: <https://www.wildlifeacoustics.com/component/k2/item/912-effectiveness-of-artificial-roosts-for-neotropical-bat-species>
- Sedgeley, J. & O'Donnell, C.** (1999). Factors influencing the selection of roost cavities by a temperate rainforest bat (Vespertilionidae: *Chalinolobus tuberculatus*) in New Zealand. *J Zool*. **249** (4): 437-446. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1999.tb01213.x>
- Segura-Trujillo, C. & Navarro-Pérez, S.** (2010). Escenario y problemática de conservación de los murciélagos (Chiroptera) cavernícolas del complejo volcánico de Colima, Jalisco-Colima, México. *Therya*. **1** (3): 189-206.
- Tirira, D.** (2007). *Guía de Campo de los Mamíferos del Ecuador*. Quito, Ecuador: Ediciones Murciélago Blanco. 576 pp.
- Tuttle, M., Kiser, M., Kiser, S.** (2013). *The bat house builder's handbook*. Texas, USA: Bat Conservation International. 36 pp.
- Vargas-Contreras, J., Escalona-Segura, G., Arroyo-Cabrales, J., Von Osten, J., Navarro, L.** (2012). Conservación de murciélagos en Campeche. *Therya*. **3** (1): 53-66. <https://doi.org/10.12933/therya-12-56>
- Vleut, I., Levy-Tacher, S.I., Galindo-González, J., de Boer, W.F., Ramírez-Marcial, N.** (2012). Tropical rain-forest matrix quality affects bat assemblage structure in secondary forest patches. *J Mammal*. **93** (6): 1469-1479. <https://doi.org/10.1644/12-MAMM-005.1>

-
- Voigt, C., Phelps, K., Aguirre, L., Schoeman, M., Vanitharani, J., Zubaid, A.** (2016). Bats and Buildings: The Conservation of Synanthropic Bats. En Voigt, C., Kingston, T. (Eds). *Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World* (pp. 427-462). Springer, Cham.
- White, E.** (2004). Factors affecting bat house occupancy in Colorado. *The Southwestern Naturalist*. **49** (3): 344-349.
- Wilkinson, G. & Fleming, T.** (1996). Migration and evolution of lesser long-nosed bat *Leptonycteris curasoae*, inferred from mitochondrial DNA. *Mol Ecol*. **5**: 329-339.
- Williams, C.** (1986). Social organization of the bat, *Carollia perspicillata* (Chiroptera: Phyllostomidae). *Ethology*. **71** (4): 265-282. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.1986.tb00591.x>
- Willig, M.R., Presley, S.J., Bloch, C.P., Hice, C.L., Yanoviak, S.P., Díaz, M.M., Chauca, L.A., Pacheco, V., Weaver, S.S.** (2007). Phyllostomid bats of lowland Amazonia: Effects of habitat alteration on abundance. *Biotropica*. **39** (6): 737-746. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2007.00322.x>

Artículo original

Veliidae (Hemiptera: Gerromorpha) en el piedemonte andino-pacífico en el suroeste de Colombia

Veliidae (Hemiptera: Gerromorpha) in the Andean-Pacific piedmont in South-West Colombia

Dora Nancy Padilla-Gil

Universidad de Nariño, Departamento de Biología, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia

Resumen

Los Veliidae son uno de los más diversos hemípteros semiacuáticos y su papel como predadores en las cadenas tróficas de los ecosistemas lóticos es importante. El objetivo de este estudio fue determinar la composición, riqueza y distribución de la familia Veliidae en el piedemonte andino-pacífico en el departamento de Nariño, suroeste de Colombia. Se establecieron diez sitios de muestreo entre el 2010 al 2011 para recolectar las especies de vélidos. Se especificó la distribución geográfica y altitudinal para cada especie y se comparó la composición de especies en este gradiente altitudinal mediante el análisis UPGMA. Los resultados evidenciaron una composición diferente de especies para cada sitio, siendo la Reserva Natural Río Nambí el de mayor riqueza de especies, por lo que se sugiere establecer esta reserva como un centro de biodiversidad de los vélidos, pues es posible encontrar 19 especies de *Rhagovelia* y *Microvelia* en diferentes ecosistemas acuáticos y microhábitats del mismo bosque pluvial premontano.

Palabras clave: Insectos semiacuáticos; *Rhagovelia*; *Microvelia*; Neotrópico; Distribución altitudinal.

Abstract

The Veliidae is one of the most diverse semiaquatic hemipterans family. They are predators with an important role in the trophic chains of lotic ecosystems. The focus of this study was to determine the composition, richness, and distribution of the Veliidae family in the Andean-Pacific piedmont, department of Nariño, in South-West Colombia. From 2010 to 2011, we established ten sampling sites to collect the Veliid species. We specified and compared the geographic and altitudinal distribution, as well as the composition of each species at this altitudinal gradient through a UPGMA analysis. The results showed the composition of the different species in each site, the “Río Nambí” Nature Reserve being the one with the highest species richness for which we recommend turning this reserve located in the Andes mountain range into a center for veliids biodiversity. Here, 19 species of *Rhagovelia* and *Microvelia* were found living in the same premontane rain forest in different aquatic ecosystems and microhabitats.

Keywords: Semiaquatic insects; *Rhagovelia*; *Microvelia*; Neotropic; Elevational distribution.

Introducción

Las familias Veliidae y Gerridae son las más abundantes en los ecosistemas acuáticos neotropicales, especialmente en los sistemas lóticos de los Andes y en áreas de tierras bajas del Caribe y el Pacífico (Padilla-Gil, 2015a, 2019a, 2020a). Los vélidos pertenecen a los insectos patinadores, son hemimetábolos, tanto ninfas como adultos viven generalmente en grupos en ríos y arroyos de diferente profundidad y son depredadores importantes en la cadena trófica. Los géneros más diversos de Veliidae son *Rhagovelia* y *Microvelia*; en Colombia el primero cuenta con más de 80 especies y el segundo con aproximadamente 20 (Padilla-Gil, 2020b).

Citación: Padilla-Gil DN. Veliidae (Hemiptera: Gerromorpha) en el piedemonte andino-pacífico en el suroeste de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):372-379, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1599>

Editor: Gabriel Roldán

Correspondencia:

Dora Nancy Padilla Gil;
dnpadilla@udenar.edu.co

Recibido: 15 de noviembre de 2021

Aceptado: 7 de abril de 2022

Publicado en línea: 2 de mayo de 2022



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

El piedemonte del Pacífico se localiza en los Andes del suroeste de Colombia y hace parte de la región del Chocó biogeográfico, que se destaca por ser una de las regiones más biodiversas del planeta con gran variedad de ecosistemas, desde manglares hasta páramos, y ríos que discurren desde la cordillera Occidental y desembocan en el océano Pacífico. Se caracteriza por una alta pluviosidad, más de 3.000 mm/año, que garantiza un ambiente húmedo (**Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM**, 2011; **World Bank & Global Facility for Disaster Reduction and Recovery - GFDRR**, 2011). El área geográfica del estudio se localizó en la vertiente occidental de la cordillera Occidental, en el departamento de Nariño, donde se hallan los ecosistemas acuáticos lóticos que son hábitat de los vélidos.

La distribución geográfica y altitudinal de la familia Gerridae en el piedemonte del Pacífico ya fue abordada por **Padilla-Gil & García-López** (2013), quienes evidenciaron la estrecha correlación entre la composición de las especies y su distribución geográfica y altitudinal. Por otra parte, la especie *Rhagovelia gastroticha* fue estudiada por estos autores (2016) con referencia al cambio en la morfometría de la pata media de varias poblaciones de insectos y su relación con diferentes ecosistemas acuáticos del piedemonte del Pacífico, en tanto que **Padilla-Gil** (2013) describió los estadios inmaduros de la especie y reportó la presencia de algunas especies de heterópteros semiacuáticos (2016a) en la Reserva Natural Río Ñambí (RNRÑ), ubicada en el mencionado piedemonte.

En este contexto, en el presente estudio se abordó la pregunta sobre si la composición de los vélidos cambiaba según su distribución geográfica y altitudinal en el piedemonte del Pacífico y si presentaba las mismas tendencias que la familia Gerridae, así como los factores que pudieran estar relacionados con su distribución y composición.

Métodos

El trabajo de campo se realizó en diez localidades a lo largo de todo el piedemonte del Pacífico en el departamento de Nariño entre el 2010 y el 2011 (los detalles de la recolección de ejemplares se pueden consultar en **Padilla-Gil**, 2016a). Los sitios de muestreo se ubicaron en los municipios de a) Mallama, sitio de muestreo en Piedrancha; b) Ricaurte, sitio de muestreo en Ricaurte; c) Barbacoas, corregimiento Altaquer, sitio de muestreo 1: Reserva Natural Río Ñambí y sitio de muestreo 2: corregimiento El Diviso; d) Tumaco, sitios de muestreo Llorente, Caunapí, Mar Agrícola, Agua Clara y Consejo Comunitario río Mejicano (**Figura 1**).

Para conocer la composición de las especies de vélidos de cada uno de estos ecosistemas acuáticos, así como la asignación de las especies de *Rhagovelia* a los grupos taxonómicos, se revisaron las notas de campo y las publicaciones previas derivadas del estudio de los heterópteros semiacuáticos de todos estos ambientes (**Padilla-Gil**, 2011, 2015b, 2016b, 2019b). Los sitios muestreados, así como su posición geográfica y altitud, se registran en la **tabla 1**.

Análisis de datos

Se estableció la relación entre la altitud de la localidad y la riqueza de especies, así como el rango geográfico de las especies de vélidos para cada localidad. Para comparar la composición de vélidos de las diferentes localidades a lo largo del piedemonte del Pacífico se hizo el análisis UPGMA usando distancia euclidiana con el programa Past 3.17.

Resultados

Se registraron 43 especies de Veliidae en el piedemonte del Pacífico, 33 de *Rhagovelia* y 10 de *Microvelia* (**Anexo 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1599/3223>). La localidad con mayor riqueza de especies fue la RNRÑ (**Figura 2**) y el sitio con menor riqueza y menor altitud fue Agua Clara.

En cuanto al análisis de UPGMA, se evidenció la separación de la RNRÑ del resto de localidades (**Figura 3**) debido a una composición diferente a la de los otros sitios de



Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo del piedemonte andino-pacífico en el departamento de Nariño, Colombia

muestreo. Además, hubo mayor similitud en la composición de especies de vélidos entre Piedrancha y Ricaurte, cercanas geográficamente y con rangos altitudinales contiguos, así como una mayor proximidad de los dos con El Diviso y de este con dos localidades de la planicie del Pacífico.

Con respecto a los grupos taxonómicos del género *Rhagovelia*, se determinaron nueve grupos con rangos altitudinales diferentes, cinco de ellos representados en el piedemonte de la parte alta (por encima de los 900 m s.n.m.) y siete en la parte baja (por debajo de los 900 m s.n.m.) (**Figura 4**).

Los grupos *cali* y *torquata* presentaron una distribución limitada a la parte alta del piedemonte del Pacífico, en tanto que la de los grupos *elegans*, *itaitaiana*, *hirtipes* y *salina* se registró en altitudes menores; el grupo *salina* es exclusivo de ambientes salobres, de estuarios y de esteros. Debe enfatizarse el recambio de especies en los grupos de *Rhagovelia* compartidos, por ejemplo, el grupo *robusta*, en la parte alta, incluyó las especies *R. narinensis*, *R. nicolai* y *R. imperatrix*, en tanto que en el piedemonte de menor altitud estas estuvieron ausentes, pero sí se registró *R. zeteki*.

En Piedrancha se encontró una especie de *Rhagovelia* del grupo *torquata*, *R. mallama*, y una especie de *Microvelia*, *M. piedrancha*, las dos con un rango de distribución exclusivo para esta área geográfica. Por otra parte, del grupo *torquata* se registraron dos especies en el piedemonte del Pacífico, la anterior y *R. divisoensis*, con rango geográfico restringido a El Diviso; este último lugar también incluyó *R. tricoma* del grupo *hambletoni*, con una distribución geográfica entre los 350 y los 900 m s.n.m. (**Padilla-Gil, 2015b**).

Tabla 1. Sitios de muestreo del piedemonte andino-pacífico en el departamento de Nariño, Colombia

Localidad	Coordenadas	Altitud (m s.n.m.)
Piedrancha	1° 08' 28" N 77° 51' 52" W	1810-1583
Ricaurte	1° 11' 43,8" N 77° 56' 17,9" W	1385-1450
Reserva Natural Río Ñambí	1° 17' 12,3" N 78° 04' 25,8" W	1140-1530
El Diviso	1° 21' 55,8" N 78° 10' 55,6" W	900
Llorente	1° 24' 8,3" N 78° 30' 1,6" W	70-250
Candelillas	1° 28' 11" N 78° 41' 7,5" W	35
Caunapí	1° 28' 14,4" N 78° 38' 14" W	20
Mar Agrícola	1° 41' 78" N 78° 45' 15" W	10
Agua Clara	1° 42' 65" N 78° 46' 37" W	4
Río Mejicano	1° 48' 06" N 78° 33' 55" W	0-2

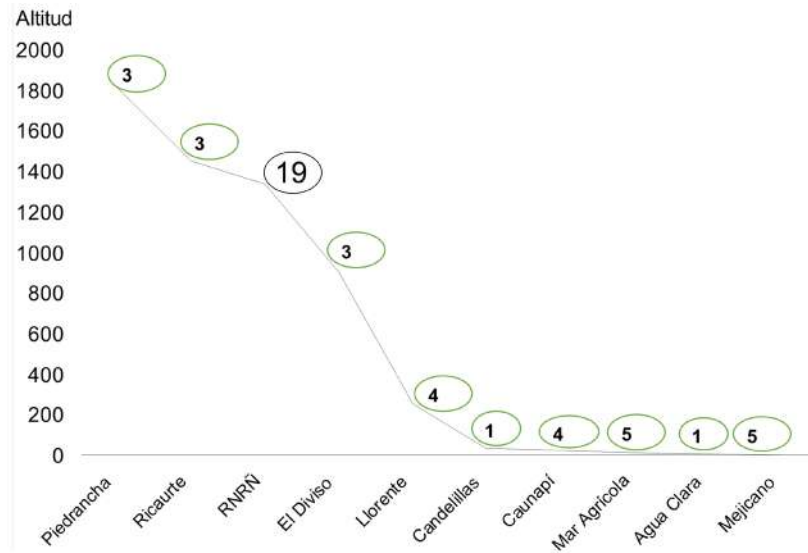


Figura 2. Sitios de muestreo según altitud y riqueza de especies por localidad del piedemonte andino-pacífico en el departamento de Nariño, Colombia

Las especies recolectadas en Ricaurte correspondieron a *Rhagovelia*, grupo *cali*, compartidas con Piedrancha o con la RNRÑ. Al comparar la composición y la distribución de las especies de la RNRÑ con las halladas en los otros sitios de muestreo, se encontraron cinco especies del género *Microvelia* y diez de *Rhagovelia* restringidas a la Reserva

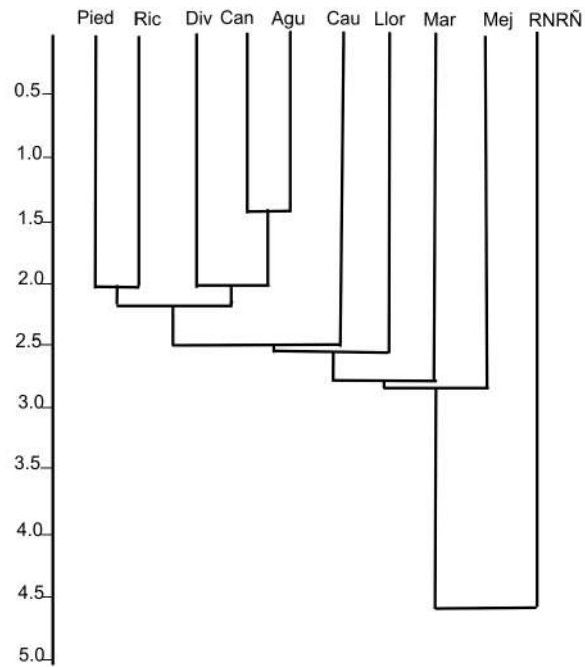


Figura 3. Dendrograma de similitud de los vélidos del piedemonte andino-pacífico en el departamento de Nariño, Colombia $r=0,97$

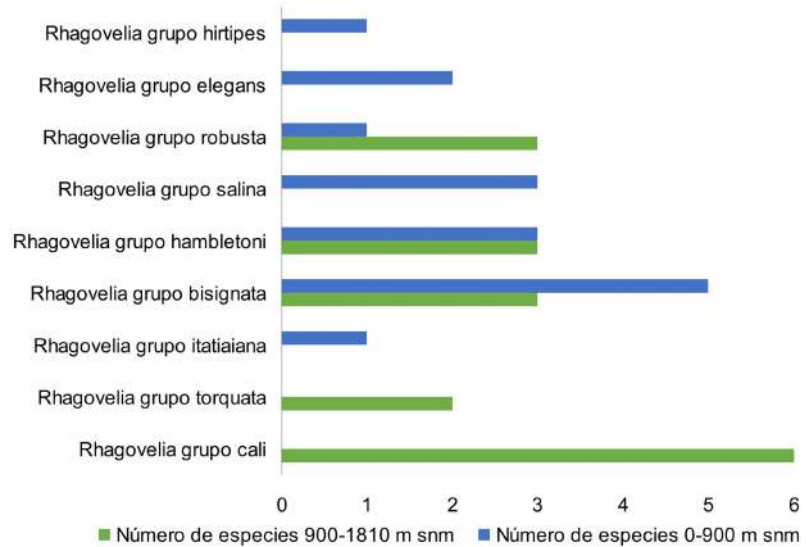


Figura 4. Grupos del género *Rhagovelia*, número de especies y distribución altitudinal en el piedemonte andino-pacífico en el departamento de Nariño, Colombia

(Tabla 2), y solo cuatro especies compartidas con otras localidades: *R. cali*, *R. manzanoi* y *R. gastrotricha* con Piedrancha o Ricaurte, y *R. carina* con El Diviso. No hubo especies compartidas con ninguna localidad por debajo de los 900 m s.n.m. Sin embargo, al comparar la composición de especies de la Reserva con otras áreas de los Andes, se observó la presencia de seis especies de *Rhagovelia* con un rango de distribución geográfica en otras áreas septentrionales: *R. cali*, *R. manzanoi*, *R. carina*, *R. calceola* y *R. gastrotricha*, que alcanzan su límite geográfico y altitudinal en la RNRÑ en el piedemonte del Pacífico, y *R. carina*, cuyo límite de distribución se extiende hasta El Diviso.

Tabla 2. Especies de vélidos de la Reserva Natural Río Ñambí con distribución restringida en el piedemonte andino-pacífico en el departamento de Nariño, Colombia

Especies /grupo taxonómico				
<i>Microvelia</i>	<i>Rhagovelia</i>			
	Grupo cali	Grupo hambletoni	Grupo bisignata	Grupo robusta
<i>Microvelia altaquerensis</i>	<i>Rhagovelia cephalo</i>	<i>Rhagovelia cardia</i>	<i>Rhagovelia barbacoensis*</i>	<i>Rhagovelia imperatrix</i>
<i>Microvelia bicolora</i>	<i>Rhagovelia deigmena</i>		<i>Rhagovelia calceola*</i>	<i>Rhagovelia nicolai</i>
<i>Microvelia digitalis</i>	<i>Rhagovelia ramphus</i>			<i>Rhagovelia narinensis</i>
<i>Microvelia mega</i>	<i>Rhagovelia tsecuri</i>			
<i>Microvelia micra</i>				

* Especies asignadas a este grupo por desconocimiento de la forma macróptera

Al comparar estas especies con las del género *Microvelia*, también se mantuvieron rangos estrechos de distribución geográfica y altitudinal, con seis especies en la parte alta del piedemonte de rango geográfico restringido a esas localidades.

Por otra parte, las 20 especies de Veliidae, las cuatro de *Microvelia* y las 16 de *Rhagovelia* que se consideraron en la parte baja del piedemonte del Pacífico, se encuentran todas restringidas a este rango altitudinal sin extenderse a El Diviso u a otras localidades de mayor altitud en el piedemonte del Pacífico.

Se observó que todas las especies de *Microvelia* de la parte baja del piedemonte, comparadas con las de otras áreas geográficas de Colombia, se encuentran ampliamente distribuidas tanto en los Andes como en otras regiones de Colombia, con excepción de *R. inguapi*, que es exclusiva del Pacífico.

Discusión

Al comparar la distribución geográfica y altitudinal de la familia Gerridae en el piedemonte del Pacífico en la vertiente occidental de la cordillera Occidental (Padilla-Gil & García-López, 2013) con la de los vélidos, se observó que los gerridos mantienen una distribución geográfica más continua y una composición de especies en estrecha correlación con el cambio altitudinal. La diferencia con los Veliidae es evidente en el sentido del cambio drástico que se da por encima de los 900 m s.n.m. frente a las especies de la planicie costera del Pacífico. Por otro lado, en Veliidae se evidenció una explosión de diversidad de especies en la RNRÑ que no se presentó en los Gerridae.

¿A qué se debe esta alta diversidad de especies de Veliidae de rango geográfico y altitudinal restringido a este lugar del piedemonte del Pacífico? La composición de los heterópteros semiacuáticos difiere debido a alteraciones e impactos antropogénicos como el uso del suelo, la ganadería, la construcción de presas y la deforestación (Brasil *et al.*, 2021; Giehl *et al.*, 2020), lo que contrasta con la RNRÑ, donde se mantiene un ambiente estable y no se presentan tales impactos antropogénicos, en tanto que el ciclo del agua se garantiza con una elevada precipitación de 7.000 mm/año, lo cual favorece la permanencia de ríos, quebradas y otros cuerpos de agua en toda esta cuenca hidrográfica. Por otra parte, la vegetación de bosque pluvial premontano asegura una capa de mantillo y el depósito de hojas de palmas y otras estructuras de plantas o bromelias que permiten la permanencia temporal, el refugio o el hábitat propicio para muchas especies de *Microvelia* propias de las filotelmata. La diversidad de microhábitats de este ecosistema altamente conservado garantiza la permanencia y continuidad de las especies de *Rhagovelia* y *Microvelia*.

Otro aspecto es el polimorfismo alar de estas especies, con formas ápteras y macrópteras en ambos géneros. En este sentido, las especies de *Rhagovelia* de la parte alta del piedemonte presentan una asociación directa entre una mayor frecuencia de la forma macróptera, una mayor abundancia local y la distribución geográfica y altitudinal. Tal fue el caso de las especies *R. gastrotricha*, *R. manzanoi* y *R. cardia*, en tanto que en las especies con rangos exclusivos la forma áptera fue la más frecuente.

En concordancia con lo anotado, el género *Microvelia* presentó dos especies con predominio de la forma áptera: *M. digitalis* y *M. micra*, y una especie con formas micrópteras y braquípteras, *M. bicolora*. La presencia de estas especies es más dependiente de un microhábitat que les ofrezca protección y recursos alimenticios y, posiblemente, un ambiente relativamente estable dadas sus limitaciones de desplazamiento.

Otros aspectos que influyen en la diversidad de los vélicos en la RNRÑ se relacionan con la velocidad del agua en los diferentes cuerpos de agua: en los de flujo lento, casi laminar, es frecuente hallar las especies de *Rhagovelia* del grupo *robusta*, en tanto que las especies de *Rhagovelia* del grupo *cali* y de los grupos *bisignata* y *hambletoni*, prefieren ecosistemas más caudalosos de flujo turbulento como el del río Nambí.

Asimismo, se percibió la influencia de los ambientes umbrosos y los soleados de aguas expuestas, evidenciándose la preferencia del grupo *robusta* por áreas umbrosas y del grupo *bisignata* por aguas expuestas y soleadas. Estas condiciones son exclusivas de este bosque, ya que su vegetación está altamente conservada y la alta pluviosidad mantiene sus condiciones de humedad y temperatura relativamente estables.

Sin lugar a dudas la calidad del agua de los diferentes cuerpos de agua de la RNRÑ, a altitudes entre los 1.140 y 1.530 m, se refleja en sus parámetros físico-químicos, con una saturación de oxígeno que va desde un 76 a un 97 %, una temperatura del agua entre los 18 y los 19 °C, una temperatura ambiental entre los 20 y los 23 °C, un pH entre 6 y 7 y una conductividad entre 0,04 y 0,08 S/m.

Con base en los resultados del estudio, se plantea establecer la RNRÑ como centro de biodiversidad para los vélicos teniendo en cuenta la riqueza de especies de los géneros *Rhagovelia* y *Microvelia*; además, su restricción geográfica y altitudinal la diferencia de las otras localidades del piedemonte del Pacífico, con condiciones de relieve, de topografía y de ambiente únicas en Colombia; asimismo, la conservación ambiental del suelo, la cobertura vegetal y la calidad del agua brindan la variedad de microhábitats que garantiza la supervivencia de estos insectos semiacuáticos, así como la gran diversidad de aves, mamíferos y plantas, especialmente epífitas y palmas, como lo señala **Salaman** (1994).

En la planicie del Pacífico también se evidencia la heterogeneidad de las especies de Veliidae; en este sentido, **Padilla-Gil** (2017) comparó tres ecosistemas acuáticos lóticos cuya composición de heterópteros acuáticos y semiacuáticos, riqueza y abundancia fueron diferentes, a pesar de su proximidad geográfica y un rango altitudinal muy estrecho.

Conclusiones

En el piedemonte del Pacífico se observó la riqueza de especies de vélicos, con un 77 % de especies de *Rhagovelia* de los grupos *cali*, *torquata*, *itatiaiana*, *bisignata*, *hambletoni*, *salina*, *robusta*, *hirtipes* y *elegans*, y un 23 % de especies de *Microvelia*. Las especies de Veliidae presentaron rangos de distribución geográfica y altitudinal limitados en el piedemonte. Se planteó establecer la RNRÑ como centro de biodiversidad de los vélicos dada su riqueza de especies, el ambiente propicio para la diversidad de microhábitats y su composición de especies diferenciada de los otros sitios de muestreo analizados.

Información suplementaria

Ver información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1599/3223>

Conflicto de intereses

La autora declara no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Brasil, L.S., Ferreira, V.R.S., Resende, B.O., Juen, L., Batista, J.D., Castro, L.A., Giehl, N.F.S.** (2021). Dams Change Beta Diversity of Aquatic Communities in the Veredas of the Brazilian Cerrado. *Fron Ecol Evol.* **9**: 612642. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.612642>
- Giehl, N.F.S., Cabette, H.S.R., Dias-Silva, K., Juen, L., Moreira, F.F.F., Castro, L.A., Ferreira, V., Batista J.D.** (2020). Variation in the diversity of semiaquatic bugs (Insecta: Heteroptera: Gerromorpha) in altered and preserved veredas. *Hydrobiologia.* **847**: 3497-3510. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04364-1>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).** (2011). Informe del estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables 2010. Fecha de consulta: 14 noviembre de 2021. Disponible en: <http://www.rds.org.co/es/recursos/informe-del-estado-del-medio-ambiente-y-los-recursos-naturales-renovables-2010>
- Padilla-Gil, D. N.** (2011). Ten new species of *Rhagovelia* in the *R. angustipes* complex from Colombia (Heteroptera: Veliidae). *Aquat Insects.* **33** (3): 203-231. <https://doi.org/10.1080/1650424.2011.597404>
- Padilla-Gil, D. N.** (2013). Description of the eggs and immature stages of *Rhagovelia gastrotricha* Padilla-Gil, 2011 and *Paravelia daza* Padilla-Gil & Moreira, 2011 (Hemiptera: Heteroptera: Veliidae). *Dugesiana.* **20** (2): 211-214.
- Padilla-Gil, D. N.** (2015a). Gerromorpha y Nepomorpha (Heteroptera) del Pacífico de Colombia; lista de especies, distribución geográfica y altitudinal. *Biota Colomb.* **16** (1): 20-35.
- Padilla-Gil, D. N.** (2015b). Ten new species of *Rhagovelia* in the *angustipes* complex (Hemiptera: Heteroptera: Veliidae) from Colombia, with a key to the Colombian species. *Zootaxa.* **4059** (1): 71-95. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4059.1.4>
- Padilla-Gil, D. N.** (2016a). Las Chinchas semi-acuáticas de la Reserva Natural Río Nambi (Nariño) Colombia. *Acta biol Colomb.* **21** (1): 201-206. <https://doi.org/10.15446/abc.v21n1.50001>
- Padilla-Gil, D. N.** (2016b). Nuevos registros de Heteroptera (Hemiptera) acuáticos y semiacuáticos de Colombia. *Biota Colomb.* **17** (2): 39-46. <https://doi.org/10.21068/c2016.v17n02a04>
- Padilla-Gil, D. N.** (2017). Composición y estructura de heterópteros (Hemiptera) en ecosistemas lóticos costeros del pacífico colombiano. *Actual Biol.* **39** (107): 51-57. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.v39n107a06>
- Padilla-Gil, D. N.** (2019a). Diversidad del género *Rhagovelia* (Hemiptera: Heteroptera: Veliidae) del piedemonte Andino-Amazónico (Putumayo, Colombia). *Acta biol Colomb.* **24** (1): 174-179. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n1.66352>
- Padilla-Gil, D. N.** (2019b). Nuevas especies de *Rhagovelia*, *Microvelia*, *Buenoa* Registros nuevos de otros heterópteros de Colombia (Gerromorpha, Nepomorpha, Leptopodomorpha). España: Editorial Académica Española.
- Padilla-Gil, D. N.** (2020a). The Heteropterans (Gerromorpha and Nepomorpha) of Andean Lakes in Colombia: Composition and Biota similarity. *Revista Facultad de Ciencias Básicas.* **15** (2): 57-68. <https://doi.org/10.18359/rfcb.4399>
- Padilla-Gil, D. N.** (2020b). Gerromorpha: Insectos semiacuáticos, desarrollo en la última década en Colombia. *Acta biol Colomb.* **25** (3): 414-420. <https://doi.org/10.15446/abc.v25n3.81817>
- Padilla-Gil, D. N. & García, J. P.** (2013). Análisis de la distribución geográfica de las Gerridae (Hemiptera, Gerromorpha) en los Andes del Suroeste de Colombia. *Acta biol Colomb.* **18** (2): 381-389.
- Padilla-Gil, D. N. & García, J. P.** (2016). Variación morfométrica de la pata mesotorácica de *Rhagovelia gastrotricha* (Hemiptera: Veliidae) en los Andes de Colombia. *Hidrobiológica.* **26** (3): 395-401. [10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2016v26n3/Padilla](https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2016v26n3/Padilla)
- Salaman, P. G. W.** (ed.). (1994). Surveys and conservation of biodiversity in the Chocó, south-west Colombia. Cambridge, UK: BirdLife International Study Report N. 61.
- World Bank, Global Facility for Disaster reduction and Recovery (GFDRR).** (2011). Vulnerability, Risk Reduction and Adaptation to Climatic Change. Fecha de consulta: 14 noviembre de 2021. Disponible en: http://www.wb_gfdr climate_change_country_profile_for_COL

Artículo original

Caracterización de la diversidad de aves en un humedal altamente intervenido del Pacífico suramericano

Characterization of bird diversity in a highly impacted wetland in the South American Pacific

Antony Apeño^{1,2}, Héctor Aponte^{1,*}

¹ Carrera de Biología Marina, Facultad de Ciencias Veterinarias y Biológicas, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

² CooperAcción – Programa de Gobernanza Marino Costera, Lima, Perú

Resumen

Los humedales son ecosistemas que han sido afectados por diversos procesos humanos. En el presente estudio se determinó la diversidad y variación espacio-temporal de la ornitofauna del humedal Santa Rosa (Lima, Perú), el cual se ubica en el desierto costero y alberga una gran riqueza de taxones, aunque presenta hoy un alto impacto por actividades humanas. Se hicieron censos mensuales entre marzo del 2018 y febrero del 2019 utilizando el conteo por puntos, y se calcularon los índices de Simpson y de Shannon-Wiener en cada estación de muestreo, así como el recambio mensual entre estaciones (índices de Harrison y Morisita), mediante técnicas de extrapolación para el cálculo de la diversidad total del área. En octubre y noviembre se registró una mayor riqueza de especies, con 69 y 68, respectivamente. La zona arbustiva (con visible intervención humana) presentó, en promedio, los valores más altos del índice de Shannon-Wiener (2,46). En octubre, noviembre y diciembre hubo una menor similitud y mayor recambio entre estaciones, lo que coincidió con el periodo de inicio de las migraciones. Se reportan 89 especies, siendo *Leucophaeus pipixcan* la de mayor abundancia entre las migratorias y *Gallinula galeata* entre las residentes; la extrapolación evidenció la eventual presencia de 90 especies (84 a 95) en este humedal, tres de ellas catalogadas como “casi amenazadas” (NT), y dos incluidas en el apéndice I de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) y cinco en el apéndice II. Los resultados sugieren que el ecosistema y los diferentes hábitats que lo componen se han conservado a pesar del impacto de la actividad humana, y siguen siendo un albergue importante de la diversidad de aves en la costa del Pacífico suramericano.

Palabras claves: aves migratorias; avifauna; Chancay; conservación de humedales; extrapolación; humedales costeros.

Abstract

Wetlands are ecosystems that have been affected by various human processes which have transformed them and their communities. In the present study, we determined the diversity and spatial-temporal variation of the avian fauna of the Humedal Santa Rosa (Lima, Perú), a highly impacted but rich in species wetland of the South American coastal desert. Monthly censuses were carried out between March 2018 and February 2019 using point counts; Simpson and Shannon-Wiener indices were calculated in each station, as well as the monthly turnover between stations (Harrison and Morisita indices); we used extrapolation techniques to calculate the total area richness. October and November showed higher species richness with 69 and 68 species, respectively. The shrub zone, characterized by human intervention, presented the highest values on average for the Shannon-Wiener index (2.46). October, November, and December showed less similarity and higher turnover between stations coinciding with the beginning of the migrations. Eighty-nine species are reported: *Leucophaeus pipixcan* with the highest abundance for migratory species and *Gallinula galeata* for resident species; extrapolation pointed to 90 species (84-95) for this wetland, three of them

Citación: Apeño A, Aponte H. Caracterización de la diversidad de aves en un humedal altamente intervenido del Pacífico suramericano. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):380-392, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1605>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Héctor Aponte;
haponte@cientifica.edu.pe

Recibido: 24 de noviembre de 2021

Aceptado: 21 de abril de 2022

Publicado: 28 de junio de 2022



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

categorized in the Near Threatened (NT) status, two listed in the CITES Appendix I, and five in Appendix II. Our results suggest the conservation of this ecosystem and its different habitats despite human impacts and its maintenance as an essential shelter for bird diversity on the South American Pacific coast.

Keywords: Birdlife; Chancay; coastal wetlands; extrapolation; migratory birds; wetland conservation.

Introducción

Los humedales son ecosistemas muy importantes para los seres humanos, ya que brindan servicios ecosistémicos como la provisión de agua, la seguridad, la facilidad de acceso a recursos útiles como las fibras, y el uso de espacios para actividades recreativas (Constanza, 1997). A pesar de ello, múltiples actividades humanas los han convertido en uno de los ecosistemas que se degradan con mayor velocidad (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). La costa peruana tiene una gran cantidad de humedales entre manglares, humedales costeros y estuarios (ver mapa en Rivera *et al.*, 2021); algunos de ellos, por ejemplo en Lima los de Puerto Viejo, Ventanilla y la albufera de Medio Mundo, se han visto sometidos al deterioro debido a la pesca sin control, la extracción excesiva de fibras y los constantes incendios provocados por humanos (Aponte, 2017a; Aponte *et al.*, 2020). Por ello, en regiones como Lima, es posible apreciar un mosaico de ecosistemas fruto de la reducción de los humedales, la ampliación de las zonas urbanas y los consecuentes cambios en las comunidades de plantas y aves (Aponte & Ramírez, 2011; Pulido-Capurro & Bermúdez-Díaz, 2018; Flores *et al.*, 2020). A pesar de ello, estos humedales se muestran resilientes y nos siguen brindando servicios como el control de clima mediante la captura de carbono y espacio para el turismo y las actividades educativas (Aponte, 2015; Ampuero *et al.*, 2016).

Uno de los humedales de esta región del Pacífico suramericano que ha sufrido la influencia de la urbanización, la agricultura y la ganadería en su acuífero es el humedal Santa Rosa (Chancay, Lima), que, a pesar de todas estas fuentes de impacto, sigue siendo albergue importante de la diversidad de plantas vasculares e invertebrados, con altos valores de riqueza, comparado con otros ecosistemas similares de la costa central del Perú (Aponte & Cano, 2013; Aponte, 2017b; Loayza Basan *et al.*, 2018; Castillo-Velásquez & Huamantínco-Araujo, 2020). Algunos humedales de la costa central de menos de 100 hectáreas (como los de Carquín-Hualmay y el costero Poza de la Arenilla) tienen gran diversidad de vegetación (Alberca & Aponte, 2021; Aponte & Cano, 2018) y ornitofauna (Podestá & Cotillo, 2016; Podestá *et al.*, 2021), y dada esta variabilidad de formaciones vegetales, incluidas comunidades únicas en toda la costa de Lima, en un área que no supera las 100 hectáreas, es posible que el patrón de alta riqueza y diversidad se repita en otros taxones como las aves, que aprovechan todos los hábitats de los humedales (Ramírez *et al.*, 2010; Pulido *et al.*, 2020).

Hasta la fecha no se ha publicado un estudio que documente la diversidad de aves en el humedal de Santa Rosa, y este permitirá evaluar dicha hipótesis mediante la enumeración y caracterización de su ornitofauna y el examen espacio-temporal de sus comunidades para comprender mejor cómo este mosaico de hábitats moldea también la comunidad de aves.

Materiales y métodos

Área de estudio

El humedal Santa Rosa (11°36'01,4" S – 77°15'54,0" W), se encuentra al norte de Lima, Provincia de Huaral, distrito de Chancay (Figura 1a). Tiene un área aproximada de 85 hectáreas, con un cuerpo de agua en la zona norte, una laguna al lado oeste y un canal que lo abastece de agua proveniente del río Chancay (Verones *et al.*, 2012). La vegetación del humedal está compuesta principalmente por juncales, predominantemente *Schoenoplectus americanus*, totorales, sobre todo *Typha dominguensis*, una vega mixta compuesta por múltiples especies herbáceas de humedal de porte bajo, así como por abundante *Pistia*

stratiotes o “repollito de agua”, que cubre gran parte de la laguna principal; alrededor de la vegetación se encuentran zonas de desmonte y de intervención humana; en la zona oeste se encuentra el océano Pacífico (Ramírez *et al.*, 2010).

Diseño del muestreo

El estudio se llevó a cabo entre marzo del 2018 y febrero del 2019. Se determinaron 10 estaciones de muestreo con una separación mínima de 200 metros entre ellas, distribuidas de acuerdo a la vegetación predominante, la presencia del espejo de agua, el impacto antropogénico y su cercanía al mar. Las estaciones escogidas fueron: lado norte del espejo de agua y cerro aledaño (E1), lado noroeste del espejo de agua y zona árida con presencia de residuos sólidos (E2), lado suroeste del espejo de agua y zona árida con presencia de residuos sólidos (E3), cantos rodados frente al totoral y zona árida con presencia de residuos sólidos (E4), orilla de mar (E5), juncal con presencia de cultivos a los costados y cantos rodados (E6), comunidad arbustiva conformada por *Tessaria integrifolia*, parches de totoral (*Typha domingensis*) y de *Colocassia esculenta* y una acequia con agua de desagüe (E7), zona de desmonte (E8), lado este del totoral, vega mixta y presencia de agua (E9), y lado noreste del espejo de agua, lomas de tierra y vega mixta (E10) (Figura 1b).

El muestreo se hizo mensualmente empleando en cada estación el método de conteo total por puntos (Sutherland, 2000). Para la observación e identificación de las aves se utilizaron binoculares, cámaras digitales, guías de campo y las reportadas en la literatura especializada (Schulenberg *et al.*, 2010; Tello & Engblom, 2010; Barrio & Guillén, 2014; Plenge, 2021). El avistamiento partió de la E1 y terminó en la E10 considerando los 360 ° de visión del observador durante 10 minutos por estación y un alcance máximo fue de 50 m. El muestreo se hizo en las primeras horas de la mañana (6:00 am), con el fin de encontrar la mayor cantidad de aves, según las recomendaciones de Ortega-Álvarez *et al.* (2012).

Análisis de datos

Se listaron todas las familias de aves registradas en el humedal por orden alfabético con base en la clasificación y la nomenclatura de la *South American Classification Committee* (SACC) de la *American Ornithologists Union* utilizada en las investigaciones en la zona de estudio consultadas (Schulenberg *et al.*, 2010; Plenge, 2021). Además, se anotó el estado de vulnerabilidad de las aves y su estatus de amenazadas por el comercio de fauna

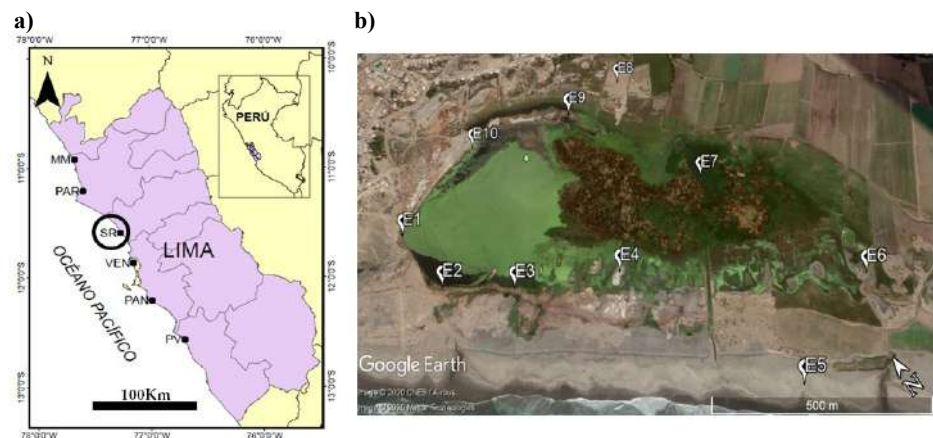


Figura 1. Área de estudio. **a)** Mapa de humedales de la provincia de Lima (PV = Puerto Viejo, PAN = Pantanos de Villa, VEN = Ventanilla, SR = Santa Rosa, PAR = Paraíso y MM = Medio Mundo). **b)** Imagen de referencia del humedal Santa Rosa y las estaciones de muestreo obtenida de Google Earth (E1: lado norte del espejo de agua, E2: lado noroeste del espejo de agua, E3: lado oeste del totoral, E4: cantos rodados frente al totoral, E5: orilla de mar, E6: juncal - presencia de cultivos, E7: vegetación mixta, E8: zona de desmonte, E9: lado este del totoral y E10: lado noreste del espejo de agua)

silvestre; para ello, se empleó la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) (www.iucnredlist.org), el Libro rojo de la fauna silvestre amenazada del Perú (**Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre - SERFOR, 2018**) y la lista de apéndices de la CITES (**Ministerio del Ambiente-MINAM, 2018**).

Los datos de abundancia de cada especie por estación se utilizaron para calcular índices y medidas de diversidad con el programa PAST 2.17, a partir de las ecuaciones descritas en su manual (**Hammer et al., 2001**); el detalle de las ecuaciones, con excepción de las medidas de diversidad de todo el humedal (se hacen las precisiones respectivas), se puede consultar en la **tabla S1** (<https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1605/3224>):

Diversidad por estación. Para calcularla se emplearon la riqueza, el índice de diversidad de Simpson (D) y el índice de diversidad de Shannon-Wiener (H).

Variación espacio-temporal. Esta se analizó mediante los índices de Morisita (I_{σ}) calculando el promedio de las similitudes por mes, y el índice de recambio de Harrison (β_H).

Diversidad de todo el humedal. Correspondió a la riqueza encontrada en un mes determinado. También se obtuvieron los valores de la diversidad esperada por medio de algoritmos de extrapolación con ayuda del programa INEXT Online (**Chao et al., 2014**), lo que permitió conocer la cobertura de la muestra (**Chao & Jost, 2012, 2015**); dichos valores se calcularon con datos de la presencia y ausencia de las especies por estación en cada mes evaluado y por año de muestreo. Los datos mensuales de cobertura de las muestras se promediaron para establecer la eficiencia mensual de muestreo, en tanto que los datos de cobertura anual permitieron determinar cuántas especies podían estar presentes en el humedal y qué tan eficiente había sido el muestreo durante el año.

Resultados

Diversidad por estación

La riqueza de especies varió a lo largo del periodo de muestreo en todas las estaciones (**Figura 2**). La zona arbustiva (E7) presentó la mayor riqueza de especies en los doce meses (20,5 especies/mes en promedio); lo contrario ocurrió en la zona de desmorte

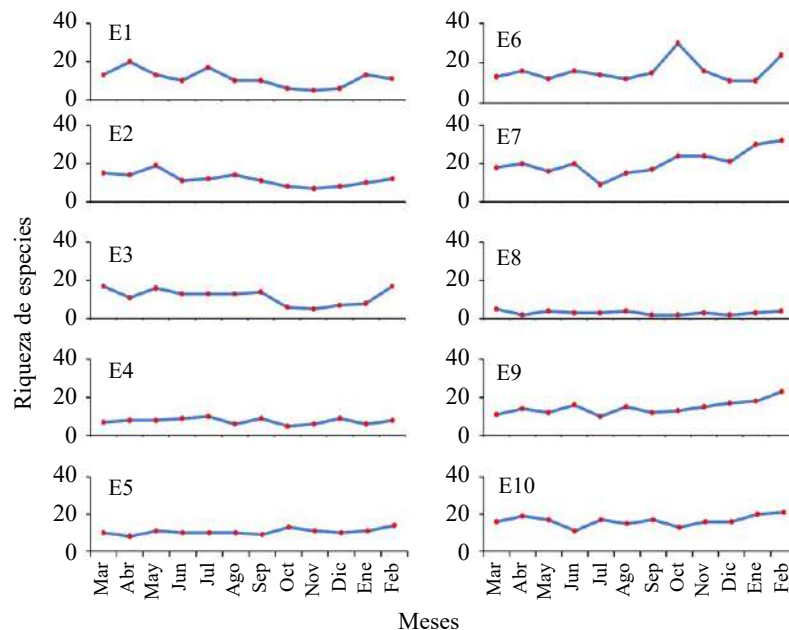


Figura 2. Variación mensual de la riqueza del humedal por estaciones. Estaciones de muestreo (E1: lado norte del espejo de agua, E2: lado noroeste del espejo de agua, E3: lado oeste del totoral, E4: cantos rodados frente al totoral, E5: orilla de mar, E6: juncal - presencia de cultivos, E7: vegetación mixta, E8: zona de desmorte, E9: lado este del totoral y E10: lado noreste del espejo de agua).

(E8), la cual presentó la menor riqueza durante los 12 meses del año (3,1 especies/mes en promedio). Las estaciones que presentaron los valores más altos del índice H fueron las E6 y E7 (zonas de cultivos y arbustiva, respectivamente) durante el periodo de octubre a febrero; los valores más bajos del índice H en todas las estaciones se presentaron en abril (**Figura 3**).

La estación con mayor dominancia promedio fue la E5 en la zona de playa, y los meses de marzo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre del 2018 y de enero del 2019 los que presentaron mayor dominancia para dicha estación (**Figura 3**).

Recambio espacio-temporal

La mayor similitud entre estaciones se observó en junio y julio (0,36 y 0,34 para el índice I_b respectivamente), lo cual coincide con los resultados obtenidos con el índice β_{H^*} , que indican que en julio se registró el menor recambio en todas las estaciones, con 0,28; lo contrario ocurrió en los meses de octubre, noviembre y diciembre, en los que se vio una menor similitud, lo que concuerda con lo evidenciado por el índice de Harrison en cuanto al mayor recambio en estos mismos meses (**Figura 4**).

Diversidad del humedal

Se registraron 89 especies incluidas en 16 órdenes, 37 familias y 66 géneros (**Tabla S2**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1605/3224>). Los órdenes con mayor riqueza durante todo el muestreo fueron Charadriiforme (30 especies, 33,7 %) y Passeriforme (19 especies, 21,4 %). Las familias con mayor riqueza durante todo el muestreo fueron Scolopacidae (13 especies, 14,6 %) y Anatidae (9 especies, 10,1 %); de las especies reportadas, 26 entre andinas, australes y neárticas son migratorias.

Los meses que presentaron mayor riqueza fueron octubre y noviembre (69 y 68, respectivamente); julio fue el mes con menor riqueza; la riqueza de especies observada estuvo siempre cercana a la mínima esperada (**Figura 5**). La cobertura de la muestra mensual

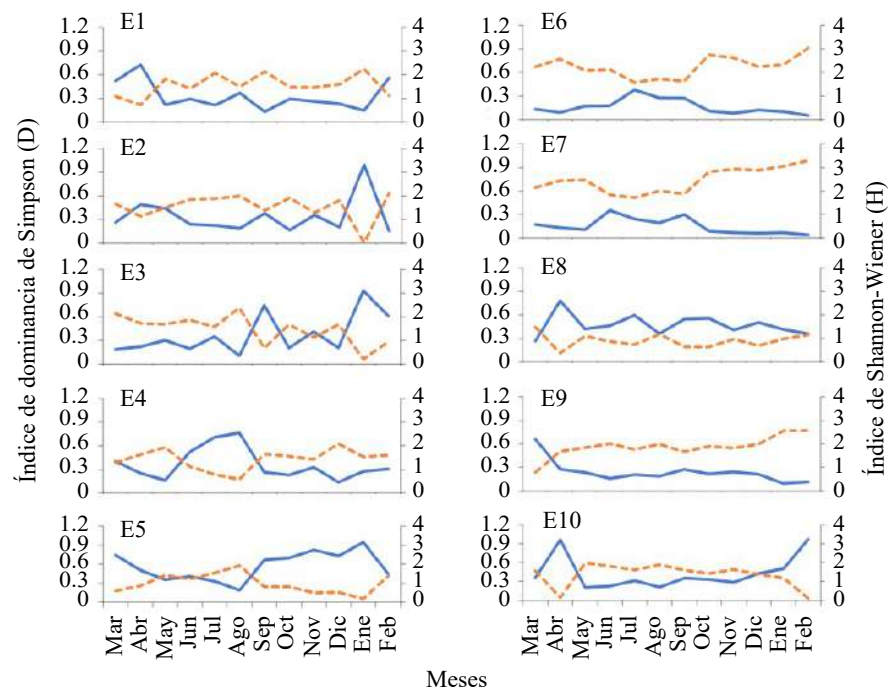


Figura 3. Variación por mes de los índices de diversidad alfa (Simpson = —; Shannon Wiener = —). E1: lado norte del espejo de agua, E2: lado noroeste del espejo de agua, E3: lado oeste del totoral, E4: cantos rodados frente al totoral, E5: orilla de mar, E6: juncal - presencia de cultivos, E7: vegetación mixta, E8: zona de desmonte, E9: lado este del totoral y E10: lado noreste del espejo de agua.

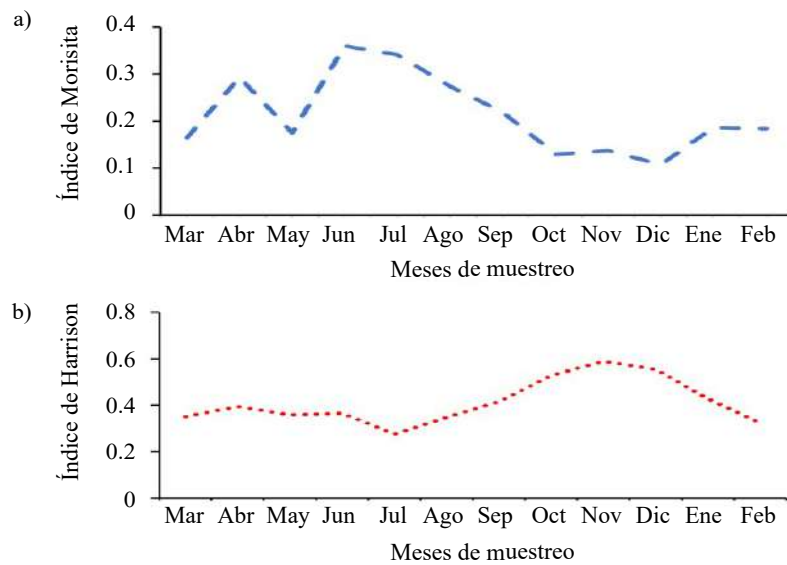


Figura 4. Variación mensual de los estimadores de diversidad beta (a: Morisita “-”, y b: Harrison “•”)

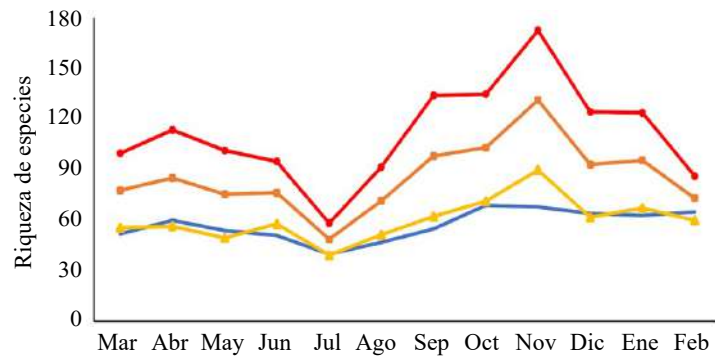


Figura 5. Riqueza de aves del humedal Santa Rosa por mes (diversidad gamma). Riqueza de especies observada: (—), riqueza de especies esperada, promedio: (■), riqueza de especies esperada, mínimo: (▲) y riqueza de especies esperada, máxima: (●)

promedio fue de 76,62 % (Tabla 1), en tanto que la cobertura de muestra anual tuvo un valor de 99 % (89 especies); se calcularon 90 especies con 100 % de la cobertura (con un mínimo modelado de 84 y un máximo de 95) (Figura 6a y b).

Las especies que presentaron mayor abundancia fueron *Leucophaeus pipixcan* (60.789 individuos en febrero), *Calidris alba* (1.341 en marzo) y *Tringa semipalmata* (1.005 en enero), todas aves migratorias. Se registraron especies poco frecuentes para los humedales de la costa central (*Dendrocygna autumnalis*, *Jabiru mycteria* y *Coccyzus melacoryphus*), una especie con un solo avistamiento en Perú (*Spatula clypeata*) y otra (*Tadorna tadorna*) con un solo reporte documentado para Perú, publicado durante la redacción del presente manuscrito (Cotillo *et al.*, 2019).

Se determinaron tres especies en estado casi amenazado y 86 en estado de preocupación menor según la IUCN; dos especies están en el apéndice I y cinco en el apéndice II de la CITES (Tabla S2, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1605/3224>). Por último, se encontraron dos especies en estado casi amenazado y dos en peligro, según el Libro rojo de fauna amenazada (Tabla S2, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1605/3224>).

Tabla 1. Porcentaje de cobertura de las muestras a lo largo del estudio

Fechas de muestreo	Cobertura	Porcentaje
Marzo-18	0,81	80,93
Abril-18	0,79	78,95
Mayo-18	0,81	81,40
Junio-18	0,79	79,15
Julio-18	0,88	87,98
Agosto-18	0,82	81,70
Setiembre-18	0,73	73,42
Octubre-18	0,69	68,60
Noviembre-18	0,58	57,67
Diciembre-18	0,67	66,70
Enero-19	0,75	74,79
Febrero-19	0,88	88,11

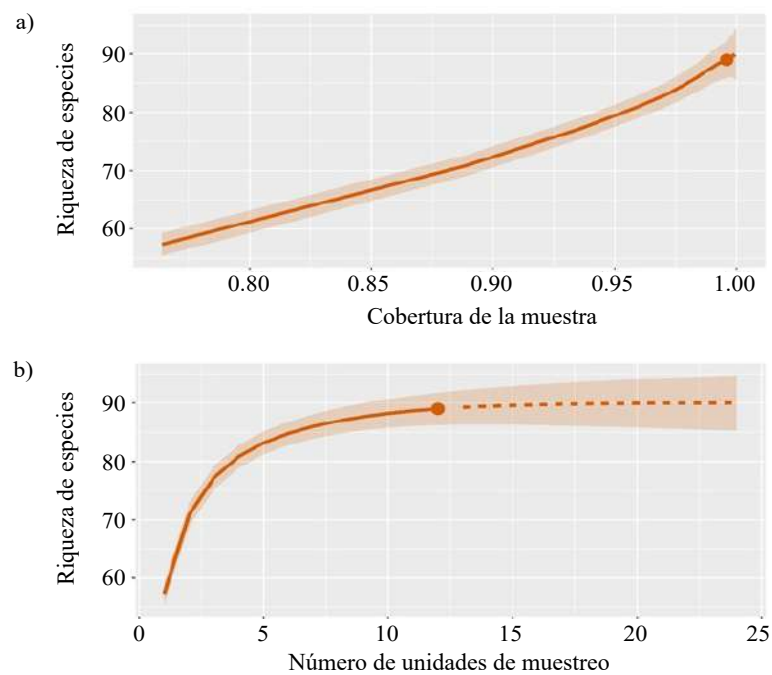


Figura 6. a) Riqueza de aves del humedal Santa Rosa y número de unidades de muestreo. **b)** Riqueza de aves del humedal Santa Rosa y cobertura de la muestra. Las líneas punteadas representan valores extrapolados. Las regiones sombreadas corresponden a los límites inferior y superior, con un 95 % de confiabilidad.

Observaciones complementarias

Si bien la riqueza de especies está distribuida en todo el humedal, se registraron 18 especies que tenían preferencia por una determinada zona (**Tabla S2**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1605/3224>). A lo largo del estudio se registró la presencia de nidos cerca de la orilla de la playa (E5) de la especie *Haematopus palliatus* y la construcción de uno sobre el agua de la especie *Podiceps major* en la zona suroeste del espejo de agua (E3). Asimismo, se evidenció la presencia de polluelos de algunas especies

como *Burhinus superciliaris* en la zona de cantos rodados frente al totoral (E4), *Amazilia amazilla* en la zona de la comunidad arbustiva (E7), *Tachuris rubrigastra* en la zona este del totoral (E9) y *Charadrius vociferus*, *Himantopus mexicanus*, y *G. galeata* en la zona este del espejo de agua (E10).

Discusión

En algunos estudios se ha evidenciado que los hábitats con valores más bajos en el índice H y en la riqueza son los arenales que no presentan vegetación (Álvarez, 2007; Pollack *et al.*, 2017), lo que concuerda con lo encontrado en la zona de desmonte (E8). La fragmentación del paisaje y la pérdida de hábitats debida a la disposición de desechos de materiales de construcción pueden tener consecuencias como las reportadas en este estudio (García, 2016). Es interesante que, a pesar de estos impactos, la zona arbustiva (E7) mostró la mayor riqueza de todas; en la zona de desmonte (E8), a pesar de ser la estación con menor riqueza de todas, se registraron especies únicas que no se encontraron en ninguna otra estación del humedal, por ejemplo, *A. cunicularia* (Tabla S2, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1605/3224>). La variabilidad de aves podría verse favorecida por la diversidad de hábitats, la variedad de cultivos y las zonas inundadas (Holm & Burger, 2002; Taft *et al.*, 2002; Salinas *et al.*, 2007), ya que esto les provee hábitat y alimento (Weller, 1999). Todo ello, sumado a la diversidad de plantas e invertebrados (Aponte & Cano, 2013; Castillo-Velásquez & Huamantínco-Araujo, 2020), podría explicar cómo un humedal tan afectado por la actividad humana presenta tan alta diversidad de aves.

La dominancia encontrada a lo largo del tiempo parece estar relacionada con los patrones migratorios y la disponibilidad de alimento (Calvo-Villalobos *et al.*, 2015; Cháu & Velásquez, 2009; García-Olaechea *et al.*, 2018). Por ejemplo, los valores más altos de dominancia se presentaron en los periodos de verano (enero-febrero) y primavera (septiembre) en estaciones ligadas a cuerpos de agua y a la presencia de aves migratorias, las cuales llegan en gran número en esos meses (García-Olaechea *et al.*, 2018; González *et al.*, 2011; Podestá *et al.*, 2017; Pulido Capurro & Bermúdez Díaz, 2018). El incremento de individuos de *G. galeata* durante julio y agosto aumentó también la dominancia en el cuerpo de agua; esta especie fue vista siempre forrajeando en dicho hábitat, lo que concuerda con los niveles más altos de agua en el humedal, además de ser la zona de mayor diversidad de macroinvertebrados (Castillo-Velásquez & Huamantínco-Araujo, 2020), que son parte de su dieta (Olguín *et al.*, 2013).

El recambio temporal aumentó entre octubre y enero, lo cual pudo deberse a la influencia de las migraciones, tal y como se observó en los trabajos de Álvarez (2007), García-Olaechea *et al.* (2018), Pulido Capurro & Bermúdez Díaz (2018) y Torres *et al.* (2006). Se sabe también que existen factores abióticos (como la variación de la profundidad del agua) que afectan la distribución de las especies (Holm & Burger, 2002; Sonal *et al.*, 2010). El humedal Santa Rosa se alimenta de aguas subterráneas y excedentes de aguas de riego, lo cual implica que no presenta marcadas época secas o húmedas sino, por lo contrario, fluctuaciones constantes en los niveles de agua (Verones *et al.*, 2012; Castillo-Velásquez & Huamantínco-Araujo, 2020); dichas fluctuaciones pueden incidir en la variación de la diversidad, pues las aves prefieren determinadas condiciones para alimentarse, descansar o realizar otras actividades (Helmers, 1992; Holm & Burger, 2002), por ejemplo, las playeras prefieren zonas semiinundadas para alimentarse (Rodríguez & Mata, 2015; Ruiz-Guerra *et al.*, 2014; Holm & Burger, 2002), como pudo apreciarse en el presente estudio.

La riqueza de especies registrada en nuestro estudio (89 especies) está por debajo de la riqueza histórica de los humedales Los Pantanos de Villa (zona reservada con un registro de 211 especies), ACR Humedales de Ventanilla (126 especies), los humedales de Paraíso (106 especies), y el humedal costero Poza de la Arenilla (98 especies), aunque por encima de la riqueza reportada en Puerto Viejo (72 especies) y Medio Mundo (72 especies). Con estos datos, el humedal Santa Rosa es el segundo con mayor riqueza por hectárea de la costa central de Perú (Tabla 2), y si se considera el total de especies histórico

reportado para la costa de Lima, alberga el 38,36 % de las especies de esta región, más que el humedal de Medio Mundo (31,03 %) y el de Puerto Viejo (31,03 %), aunque menor que el porcentaje de especies de aves reportado en Los Pantanos de Villa (90,95 %), Poza de la Arenilla (42,24 %), Ventanilla (54,31 %) y Paraíso (45,69 %) (**Terra Nuova, Proyecto de Conservación y Manejo Sostenible de los Humedales de la Costa Central del Perú - PROCOMHCC, 2009; Pulido, 2018; Podestá et al., 2021**). Cabe resaltar que el valor más alto es el de Los Pantanos de Villa, lo cual puede deberse a la cantidad de estudios que se han realizado en ese ecosistema (21 estudios sobre aves) (**Pulido, 2018**). También hay que considerar que la extensión del humedal Santa Rosa es menor que la de Los Pantanos de Villa y ACR Humedales de Ventanilla (con 263 y 653 ha., respectivamente) comparada con las 87 ha evaluadas en este estudio, lo que influye también en la disponibilidad de hábitats. A pesar de ello, el humedal Santa Rosa constituye un albergue importante para la avifauna en esta región.

Di Stefano et al. (2013) e **Ibarra & Belmonte (2017)** señalan que las construcciones marinas, como los puertos, interrumpen el transporte de sedimentos y alteran la dinámica de las playas generando cambios en ellas. El cambio en el transporte de sedimento podría influir en la riqueza de especies en estaciones como la orilla de playa (E5), donde se registraron individuos de las familias Charadriidae y Scolopacidae que prefieren las playas arenosas frente a las rocosas (**Ramos, 2019**). Estas familias de aves acuden a zonas de playas arenosas para alimentarse de macroinvertebrados, anidar y otras actividades en las que aprovechan la arena. Por ello se recomienda hacer estudios continuos de la diversidad de aves para observar cómo influenciarían estas construcciones en el ecosistema. Dos de las tres especies casi amenazadas y dos especies en peligro (*P. thagus* y *S. variegata*) se avistaron en la orilla de la playa y cualquier impacto podría afectarlas. La construcción de zonas portuarias podría también perjudicar la nidificación en la zona de playa, pues afectan el sustrato (**Di Stefano et al., 2013; Ibarra & Belmonte, 2017**).

Algunas de las estaciones evaluadas no albergaban una gran riqueza de especies comparadas con otras, sin embargo, son importantes, ya que, a) complementan la riqueza total del humedal, b) muestran el potencial del ecosistema para albergar especies a pesar de los impactos, y c) hay especies que solo se encontraron en esas estaciones, por ejemplo, *A. cunicularia* y *P. uncinatus*. La variabilidad de hábitats es un factor que favorece la diversidad de aves (**Brandolin & Blendinger, 2016**), tal como se muestra en el presente trabajo; todo ello sugiere la necesidad de conservar hábitats complementarios para proteger integralmente la diversidad de aves en este ecosistema.

A pesar de que los arenales y la zona arbustiva se encuentran entre las más impactadas por la actividad humana, las aves acuden y logran vivir en tales circunstancias, complementando la diversidad del humedal, incluso con especies únicas. Esto no significa que esos impactos sean favorables; la disposición de desechos de desmonte ha generado la pérdida de hábitats y la homogeneización de las zonas del ecosistema, afectando, a su vez,

Tabla 2. Porcentaje de la riqueza de especies de aves histórica y por área de los humedales de la costa central del Perú

Humedales	Riqueza histórica	Extensión (ha)	Riqueza (%)	Riqueza/Área
Medio Mundo	72	687,71	31,03	0,10
Paraíso	106	674,50	45,69	0,16
Santa Rosa	89	87,00	38,36	1,02
Ventanilla	126	275,45	54,31	0,46
Poza de la Arenilla	98	18,10	42,24	5,41
Pantanos de Villa	211	263,27	90,95	0,80
Puerto Viejo	72	275,81	31,03	0,26

la diversidad de aves. Es importante resaltar que las especies únicas registradas en estas estaciones no son, en su mayoría, propias de los humedales, por lo que sugerimos hacer su seguimiento para evaluar si se registran cada vez es más común en estos ecosistemas.

En el presente estudio se observó la presencia de nidos y polluelos en múltiples estaciones del humedal que deben contemplarse como de conservación prioritaria, de manera que se asegure la reproducción de las especies de aves; esto refuerza la propuesta de conservar el área en su integridad, incluyendo los hábitats evaluados en este estudio. Por el diseño del estudio, es posible que no se haya podido registrar la totalidad de nidos y polluelos fuera de las zonas de muestreo, por ello, se recomienda hacer estudios complementarios para conocer su distribución completa.

Conclusiones

En el presente estudio se registraron 89 especies de aves en el humedal Santa Rosa, tres especies en estado casi amenazado (NT), dos incluidas en el apéndice I de la CITES y cinco en el apéndice II. Estos resultados invitan a reconocer la importancia de la diversidad de aves en esta localidad y constituye una muestra de cómo la variabilidad de hábitats promueve la diversidad espacio-temporal y la complementariedad en un humedal afectado por la actividad humana en la costa peruana. Asimismo, permiten sugerir que se considere la conservación de estos ecosistemas que, a pesar de las afectaciones detectadas (disposición de desechos de desmonte) y las potenciales derivadas de la eventual construcción del puerto, se mantienen como albergues de diversas aves y otros organismos que luchan por su subsistencia en la costa desértica del Pacífico.

Agradecimientos

A nuestras familias por el constante apoyo. A Alejandro Cotillo por su ayuda en campo, a Damaso Ramírez, Carlos Zavalaga y David Montes por sus recomendaciones para mejorar el manuscrito y por la bibliografía brindada, al comité de vigilancia del humedal Santa Rosa por guía inicial en el humedal, y a la DGIDI de la Universidad Científica del Sur por la financiación a través del “Concurso de Fondos para Proyectos de Tesis 2018-1”.

Información suplementaria

Ver información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1605/3224>

Contribución de los autores

AA y HA: contribuyeron en los aspectos de diseño, implementación, ejecución, redacción y revisión del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Álvarez, C. (2007). Evaluación de la diversidad específica de las aves de los humedales de Ventanilla, Callao, Perú. Tesis para obtener el título de Licenciado en Ciencias Biológicas. Universidad Ricardo Palma.
- Ampuero, W., Aponte, H., Ramírez, D., Lértora G. (2016). Estimación del carbono almacenado en los Juncales de los Pantanos de Villa: Estudio preliminar. En: Libro de Resúmenes. Lambayeque, Perú.
- Alberca, L. C., Aponte, H. (2021). Diversidad y recambio espacial de las plantas vasculares del humedal marino costero de Carquín-Hualmay (Lima – Perú). *Arnaldoa*, 28(2), 319-338. <https://doi.org/10.22497/1596>
- Aponte, H., Cano, A. (2018). Flora vascular del Humedal de Carquín—Hualmay, Huaura (Lima, Perú). *Ecología Aplicada*, 17(1), 69-76. <https://doi.org/10.21704/rea.v17i1.1175>

- Aponte, H.** (2017a). Humedales de la Costa central del Perú: un diagnóstico de los humedales de Santa Rosa, laguna El Paraíso y Albufera de Medio Mundo. CooperAccion. Lima, Perú. 114p.
- Aponte, H.** (2017b). Un ajuste a la diversidad beta en los humedales costeros de lima. *The Biologist*, 15(2), 479-481.
- Aponte, H.** (2015). Ecosistemas potenciales para el turismo en la costa central de Lima y Callao: oportunidades y perspectivas. *Novum Otium*, 1(1), 57-64.
- Aponte, H., Cano A.** (2013). Estudio florístico comparativo de seis humedales de la costa central del Perú: actualización y nuevos retos para su conservación. *Revista Latinoamericana de Conservación*, 3(2), 15-27.
- Aponte, H., Gonzáles, S., Gómez, A.** (2020). Impulsores de cambio en los humedales de América Latina: el caso de los humedales costeros de Lima. *South Sustainability*, 1(2), e023 (1-5).
- Aponte, H., Ramírez, D.W.** (2011). Humedales de la costa central del Perú: estructura y amenazas de sus comunidades vegetales. *Ecología Aplicada*, 10(1-2), 31.
- Barrio, J., Guillén, C.** (2014). Aves de los Humedales de la costa peruana. Serie Biodiversidad Corbidi 03. CORBIDI. 139 pp.
- Brandolin, P.G., Blendinger, P.G.** (2016). Effect of habitat and landscape structure on waterbird abundance in wetlands of central Argentina. *Wetlands Ecology and Management*, 24(1), 93-105.
- Calvo-Villalobos, J., Piedra-Castro, L., González-Villalobos, J.** (2015). Aves acuáticas en ecosistemas playeros del Parque Nacional Cahuita, Limón, Costa Rica. *Zeledonia*, 19(2), 11-25.
- Castillo-Velásquez, R., Huamantínco-Araujo, A.A.** (2020). Variación espacial de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos en la zona litoral del humedal costero Santa Rosa, Lima, Perú. *Revista de Biología Tropical*, 68(1), 50-68.
- Chao, A., Gotelli, N.J., Hsieh, T.C., Sander, E.L., Ma, K.H., Colwell, R.K., Ellison A.M.** (2014). Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecological Monographs*. 84(1): 45-67.
- Chao, A., Jost, L.** (2012). Coverage-based rarefaction and extrapolation: standardizing samples by completeness rather than size. *Ecology*, 93(12), 2533-2547.
- Chao, A., Jost, L.** (2015). Estimating diversity and entropy profiles via discovery rates of new species. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(8), 873-882.
- Cháux, J.T.D., Velásquez, A.** (2009). Uso de las coberturas vegetales y movilidad de aves semilleras en un paisaje urbano de Florencia (Caquetá, Colombia). *Momentos de Ciencia*. 6(1), 70-79.
- Constanza, R.** (1997). La economía ecológica de la sostenibilidad: invertir en capital natural. En: Medio ambiente y desarrollo sostenible: más allá del informe Brundtland. 1997, ISBN 84-8164-157-X, p. 103-114.
- Cotillo, A., Apeño A., Aponte H.** (2019). Primer registro documentado del Pato Tarro Blanco, Tadorna Tadorna (Linnaeus, 1758), en el Perú. *Ecología Aplicada*. 18(2), 185-188.
- Di Stefano, A., De Pietro, R., Monaco, C., Zanini, A.** (2013). Anthropogenic influence on coastal evolution: A case history from the Catania Gulf shoreline (eastern Sicily, Italy). *Ocean Coastal Management*, 80, 133-148.
- Flores, N., Castro, I., Aponte H.** (2020). Evaluación de las unidades de vegetación en Los Pantanos De Villa (Lima, Perú) mediante sistemas de información geográfica y teledetección. *Arnaldoa*, 27(1), 303-321.
- García, D.** (2016). Birds in ecological networks: insights from bird-plant mutualistic interactions. *Ardeola*, 63(1), 151-180.
- García-Olaechea, Á., Chávez-Villavicencio, C., Tabilo-Valdivieso, E.** (2018). ¿Influyen las aves migratorias neárticas en el patrón estacional de aves de los humedales costeros? *Revista Peruana de Biología*, 25(2), 117-122.
- González, A.L., Vukasic, A.M., Estades, C.F.** (2011). Temporal variability in the abundance and diversity of aquatic birds in the Itata River wetland, Bio-Bio Region, Chile. *GAYANA*, 75 (2), 170-181.
- Hammer, O., Harper, D., Ryan, P.** (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4, 1-9.
- Helmets, D.L.** (1992). Shorebird management manual. Western Hemisphere Shorebird Reserve Network. Manomet, MA. USA. 58 pp.
- Holm, K.J., Burger, A.E.** (2002). Foraging Behavior and Resource Partitioning by Diving Birds During Winter in Areas of Strong Tidal Currents. *Waterbirds*, 25(3), 312-325.
- Ibarra, D., Belmonte, F.** (2017). Comprendiendo el litoral: Dinámica y procesos. Universidad de Murcia. Murcia, España 67pp.

- Loayza-Basan, K., Castillejos, Paniagua, K., Mestas-Valero, R., Quiliche-Durán, J.P.J.** (2018). Estudio de la teledetección y caracterización fisicoquímica del humedal «El Cascajo», Santa Rosa, Chancay- Lima, Perú. *INFINITUM*, 7(1), 52-58.
- Millennium Ecosystem Assessment** (Program) ed. (2005). Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis: a report of the Millennium Ecosystem Assessment. World Resources Institute. Washington, DC. 80p.
- MINAM.** (2018). Listado de especies de fauna silvestre. CITES - Perú. p.135.
- Olgún, P.F., Beltzer, A.H., Attademo, A.M.** (2013). Biología alimentaria de algunas especies de rálidos (rallidae) del valle de inundación del río Paraná Medio. *Ornitología Neotropical*, 24, 15-26.
- Ortega-Álvarez, R., Sánchez-González, L., Berlanga, H., Contreras, V., Canales, V.** (2012). Manual para monitores comunitarios de aves. CONABIO, NABCI, CBM-M y CONAMP. México. 35pp.
- Plenge, M.** (2021). Boletín UNOP - List of the birds of Peru / Lista de las aves del Perú. SERNANP, Lima, Perú. 40pp.
- Podestá, J., Gil, F., Liviach-Espinoza, R., Barona, D., Balarezo-Díaz, A., Zarate, R.** (2021). Aves de los humedales de la Región Callao: actualización y estados de conservación. *The Biologist*, 19(2), 155-173.
- Podestá, J., Cotillo, A.** (2016). Avifauna del área de conservación municipal humedal poza de la arenilla (Callao, Perú): actualización y categorías de conservación. *Científica*, 13(1), 38-57. <https://doi.org/10.21142/cient.v13i1.319>
- Podestá, J., Cotillo, A., Segura-Cobeña, E., Cabanillas, G.** (2017). Variación temporal de la riqueza y abundancia de aves playeras limícolas en el humedal costero “Poza de la Arenilla” La Punta, Callao. *The Biologist (Lima)*, 15, 23-35.
- Pollack, L., Alvítez, E., Huamán, E., Rodríguez, E., Rimarachin, V., Vásquez, R.** (2017). Ensamble de aves del humedal de Cerro Negro, Puerto Morín, La Libertad. *Arnaldoa*, 24(2), 645-656.
- Pulido Capurro, V.M., Bermúdez Díaz, L.** (2018). Patrones de estacionalidad de las especies de aves residentes y migratorias de los Pantanos de Villa, Lima, Perú. *Arnaldoa*, 25(3), 1107-1128.
- Pulido, V.** (2018). Ciento quince años de registros de aves en Pantanos de Villa. *Revista Peruana de Biología*, 25(3), 291-306.
- Pulido, V., Salinas, L., Del Pino, J., Arana, C.** (2020). Preferencia de hábitats y estacionalidad de las especies de aves de los Pantanos de Villa en Lima, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 27(3), 349-360.
- Rivera, G., Gonzáles, S., Aponte, H.** (2021). Wetlands of the South American pacific coast: A bibliometric analysis. *Wetlands Ecology and Management*, <https://doi.org/10.1007/s11273-021-09830-8>
- Ramírez, D., Aponte, H., Cano A.** (2010). Flora vascular y vegetación del humedal de Santa Rosa (Chancay, Lima). *Revista Peruana de Biología*, 17, 105-110.
- Ramos, L.** (2019). Actividad antrópica sobre la comunidad de aves en la Bahía de Paracas, Pisco, Perú. 2017. Universidad Nacional Agraria La Molina. 96pp.
- Rodríguez, H., Mata, A.** (2015). Zonación y comportamiento alimentario de aves limícolas migratorias en el Parque Nacional Laguna de La Restinga, estado Nueva Esparta, Venezuela. Memoria de la Sociedad de Ciencias Naturales La Salle, 71, 51-63.
- Ruiz-Guerra, C., Eusse-González, D., Arango, C.** (2014). Distribución, abundancia y reproducción de las aves acuáticas de las sabanas inundables de Meta y Casanare (Colombia) y sitios prioritarios para la conservación. *Biota Colombiana*, 15(1), 137-160.
- Salinas, L., Arana C., Pulido V.** (2007). Diversidad, abundancia y conservación de aves en un agroecosistema del desierto de Ica, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 13(3), 155-168.
- Schulenberg, T.S., Stotz, D.F., Lane, D.F., O'Neill, J.P., Theodore, A.P.** (2010). Birds of Peru: Revised and Updated Edition. Princeton University Press. Princeton. 664 pp.
- SERFOR.** (2018). Libro rojo de la fauna silvestre amenazada del Perú. SERFOR. Lima, Perú, 548 pp.
- Sonal, D., Jagruti, R., Geeta, P.** (2010). Avifaunal diversity and water quality analysis of an inland wetland. *Journal of Wetlands Ecology*, 4, 1-32.
- Sutherland, W.J.** (2000). The Conservation Handbook: Research, Management and Policy. John Wiley & Sons. Oxford UK, 278pp.
- Taft, O.W., Colwell, M.A., Isola, C.R., Safran, R.J.** (2002). Waterbird responses to experimental drawdown: implications for the multispecies management of wetland mosaics. *Journal of Applied Ecology*, 39(6), 987-1001.

-
- Tello, A., Engblom, G.** (2010). Lista de especies de los humedales de la Región Lima: Aves. Gobierno Regional de Lima. Perú, 97 pp.
- Terra Nuova, Proyecto de conservación y manejo sostenible de los humedales de la Costa Central Del Perú (PROCOMHCC).** (2009). Informe Final del Proyecto de conservación y manejo sostenible de los humedales de la Costa central del Perú. Lima – Perú: ENIEX – Terra Nuova – Gobierno Regional de Lima. Gobierno Regional de Lima, 150 pp.
- Torres, M., Quinteros, Z., Takano, F.** (2006). Variación temporal de la abundancia y diversidad de aves limícolas en el Refugio de Vida Silvestre Pantanos de Villa, Perú. *Ecología Aplicada*, 5(1-2), 119-125.
- Verones, F., Bartl, K., Pfister, S., Jiménez Vilchez, R., Hellweg, S.** (2012). Modeling the Local Biodiversity Impacts of Agricultural Water Use: Case Study of a Wetland in the Coastal Arid Area of Peru. *Environmental Science & Technology*, 46(9), 4966-4974.
- Weller, M.W.** (1999). Wetland Birds: Habitat Resources and Conservation Implications. Cambridge University Press. Cambridge, UK, 316pp.

Artículo original

Registros notables de mamíferos en una cordillera aislada, amenazada y no protegida en la depresión de Huancabamba, norte de Perú

Noteworthy records of mammals from an isolated, threatened, and unprotected mountain range in the Huancabamba depression, northern Perú

✉ Alexander More*, ✉ Isai Sánchez, ✉ Renzo P. Piana, ✉ José Vallejos, ✉ Robyn D. Appleton, ✉ Javier Vallejos

Conservación del Oso de Anteojos SBC – Perú

Resumen

La depresión de Huancabamba es la sección más baja de todos los Andes y tiene una importancia biogeográfica muy significativa para la biodiversidad andina del sur de Ecuador y norte de Perú. Solo algunas montañas o cordilleras en esta depresión sobrepasan los 3.000 m s.n.m. y se encuentran relativamente aisladas. Los estudios de mamíferos de la zona aún son escasos. En este artículo detallamos las especies más notables de mamíferos medianos y mayores, así como la riqueza preliminar de los taxones registradas mediante cámaras trampa (3.847 cámaras-día) y observaciones en los bosques montanos y jalcas de Tucto y Gramalote, ubicados en la cordillera Kañaris – Pagaibamba en el departamento de Cajamarca, noroeste de Perú. De las 14 especies de mamíferos registrados, dos son especies globalmente amenazadas (*Tapirus pinchaque* y *Tremarctos ornatus*), una está casi amenazada (*Cuniculus taczanowskii*) y dos aparecen con datos deficientes (*Dasyopus pilosus* y *Sylvilagus andinus*). Reportamos una ampliación de la distribución de *D. pilosus*, los registros documentados a mayor altitud de *Dasyprocta* cf. *fuliginosa* y *Potos flavus*, y una ampliación del rango altitudinal de *Coendou rufescens* en el país. Este último constituye, además, el primer registro de la especie en el departamento de Cajamarca. Asimismo, hemos encontrado una importante población de *T. ornatus* en el área, una abundancia relativa de *T. pinchaque* en el extremo sur de su distribución global, con registros directos más actuales. Nuestro estudio evidenció que la cordillera Kañaris - Pagaibamba constituye un singular refugio para mamíferos andinos que es urgente proteger.

Palabras clave: Bosque montano; Jalcas; Cámaras trampa; Mamíferos; Conservación; Cajamarca, Perú.

Abstract

The Huancabamba depression is the lowest region of the Andes with significant biogeographic importance for the Andean biodiversity in southern Ecuador and northern Peru. Only a few mountains and ranges within this depression exceed the 3,000 masl and they are relatively isolated. Studies of mammals from this region are still scarce. Here, we report the most notable large and medium mammal species and also the preliminary richness of these taxa as recorded via camera traps (3,847 camera-days) and observations in the montane forests and *jalcas* located in Tucto and Gramalote, in the Kañaris-Pagaibamba mountain range, department of Cajamarca, northern Peru. We recorded 14 species of mammals, including two globally threatened species (*Tapirus pinchaque* and *Tremarctos ornatus*), one near threatened species (*Cuniculus taczanowskii*), and two with deficient data (*Dasyopus pilosus* and *Sylvilagus andinus*). We report a range extension for the endemic *D. pilosus*, the highest documented record for *Dasyprocta* cf. *fuliginosa* and *Potos flavus*, and an altitudinal extension in Perú for *Coendou rufescens* recorded for the first time in the department of Cajamarca. Additionally, we found an important population of *T. ornatus* in the area

Citación: More A, Sánchez I, Piana RP, et al. Registros notables de mamíferos en una cordillera aislada, amenazada y no protegida en la depresión de Huancabamba, norte de Perú. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):393-405, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1624>

Editor: Martha Patricia Ramírez Pinilla

***Correspondencia:**

Alexander More; alex@sbc-peru.org

Recibido: 25 de enero de 2022

Aceptado: 2 de mayo de 2022

Publicado: 28 de junio de 2022



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

and we present an updated estimation of the relative abundance of *T. pinchaque* at its southernmost global range. Our study shows that the Kañaris-Pagaibamba range constitutes a unique refuge for Andean mammals that is in urgent need of protection.

Keywords: Montane forest; Jalca; Camera trap; Mammals; Conservation; Cajamarca, Perú.

Introducción

La depresión de Huancabamba se encuentra en el norte de Perú y sur de Ecuador. Es la región donde la cordillera de los Andes tiene la porción más estrecha y de menor altitud a lo largo de Suramérica. Alberga el paso más bajo (Abra de Porculla, 2.145 m s.n.m.) en el norte de los Andes, donde las montañas o cordilleras aisladas no sobrepasan los 4.000 m s.n.m. (Weigend, 2002; Reynel *et al.*, 2013; Peters *et al.*, 2014) (Figura 1A).

Biogeográficamente, esta sección de los Andes ha tenido un gran impacto en el desarrollo de la biodiversidad del noroeste peruano y el extremo sur ecuatoriano, y se la considera el límite sur del ecosistema del páramo (Brack, 1996; Pacheco, 2002; Josse *et al.*, 2009; Ministerio del Ambiente – MINAM, 2019) y del ámbito de distribución del ecosistema de jalca (Sánchez-Vega & Dillon, 2006). Aunque se la ha considerado una barrera natural de la dispersión de norte a sur de algunos taxones (Vuilleumier, 1968; Fjeldsa, 1995; Ayers, 1999; Skrabal *et al.*, 2001; Venegas, 2005), también es una región biogeográfica propia con gran biodiversidad (Young & Reynel, 1997; Weigend, 2002; Struwe *et al.*, 2009). En el caso de los mamíferos, la depresión de Huancabamba es un área muy singular que no constituiría una barrera significativa para la dispersión de especies, pero que ha sido insuficientemente estudiada (Pacheco & Patterson, 1992; Vivar *et al.*, 1997; Lunde & Pacheco, 2003).

Los estudios de mamíferos con cámaras trampa son cada vez más comunes y particularmente útiles para determinar la riqueza de especies de una zona, la presencia y distribución de las más importantes, así como de las raras, poco conspicuas, con el fin de obtener nuevos registros y contribuir a su conservación (Jiménez *et al.*, 2010; O’Connell *et al.*, 2011; Díaz-Pulido & Payán-Garrido, 2012; Hurtado & Pacheco, 2015; Solorzano *et al.*, 2021). Además, este método no invasivo permite obtener información sobre el uso del hábitat, la demografía, la abundancia relativa, y el comportamiento de las especies (Appleton *et al.*, 2018; Green *et al.*, 2020; Mena *et al.*, 2020), e, incluso, la identificación de individuos de algunas de ellas como el oso de anteojos (Van Horn *et al.*, 2014). Toda esta información permite orientar mejor los esfuerzos de conservación de las especies silvestres y sus hábitats.

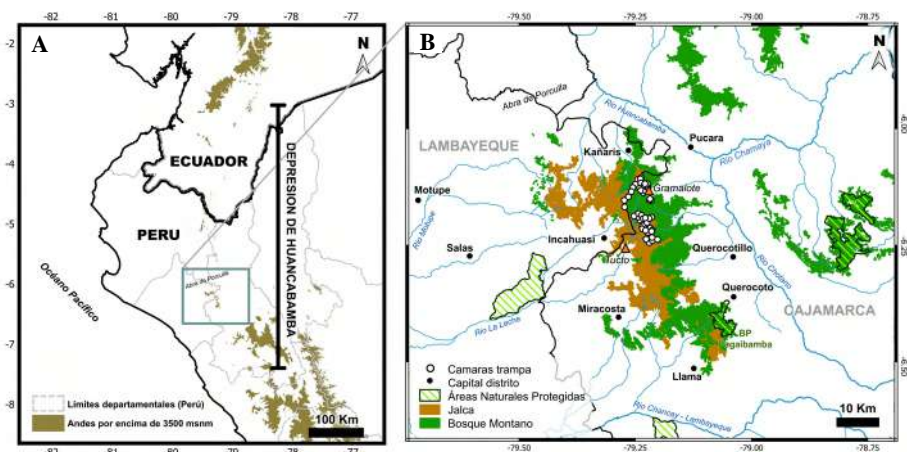


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. **A.** Ubicación de la depresión de Huancabamba. **B.** Bosques montanos y jalcas de la cordillera Kañaris-Pagaibamba con la ubicación de las cámaras trampa del presente estudio

Los estudios de mamíferos con cámaras trampa en Perú se han desarrollado mayoritariamente en la vertiente oriental de los Andes y en la llanura amazónica (Jiménez *et al.*, 2010; Medina *et al.*, 2016; Pillco-Huarcaya *et al.*, 2020; Mena *et al.*, 2020; Scullion *et al.*, 2021) y más recientemente en los ecosistemas secos del noroeste del país (Hurtado & Pacheco, 2015; Appleton *et al.*, 2018; García-Olaechea *et al.*, 2021). Uno de los primeros estudios de mamíferos usando cámaras trampa en los bosques montanos de los Andes peruanos se hizo en el Bosque de Protección de Pagaibamba (Jiménez *et al.*, 2010), que se ubica en el sur de la depresión de Huancabamba. En este mismo ecosistema, más recientemente se han desarrollado estudios con cámaras trampa en el Santuario Nacional Tabaconas Namballe (SNTN) (Mena & Yagui, 2019, Mena & Pacheco, 2020), ubicado en el centro de esta depresión andina.

Nuestro estudio se desarrolló en los bosques montanos y jalcas de las localidades de Gramalote y Tucto, en el departamento de Cajamarca, al norte de Perú, ambas ubicadas al sur de la depresión de Huancabamba. El objetivo es presentar los registros más notables de mamíferos grandes y medianos endémicos o raros y los que se encuentran amenazados, y presentar la información preliminar sobre la riqueza y abundancia relativa de dichos taxones, para así fomentar la conservación de los últimos remanentes boscosos en esta parte de Perú.

Materiales y métodos

Área de estudio

Esta se ubicó en una cordillera que abarca desde los bosques montanos del distrito de Kañaris, provincia Ferreñafe, departamento de Lambayeque, hasta el Bosque de Protección de Pagaibamba, departamento de Cajamarca (distrito Querocoto, provincia Chota), en el norte de Perú. Fisiográficamente, el área está en el límite entre las vertientes occidental y oriental de los Andes (Pacheco, 2002), y en la ecorregión de los bosques montanos occidentales de los Andes del norte (CDC-UNALM, 2006). La denominamos Kañaris–Pagaibamba por sus bosques más conocidos (Llatas-Quiroz & López-Mesones 2005; Jiménez *et al.*, 2010), y se localiza al sur del Abra de Porculla y la parte sur de la depresión de Huancabamba (Figura 1A); supera los 3.500 m s.n.m. y presenta un relativo aislamiento geográfico en la cordillera occidental marcado por los ríos Huancabamba, Chotano y Chancay-Lambayeque.

El estudio se realizó específicamente en los bosques montanos y jalcas de los centros poblados de Gramalote (distrito de Querocotillo, provincia Cutervo) y Tucto (distritos de Miracosta y Querocotillo, provincia Chota) al oeste de Cajamarca, entre los 2.500 y los 3.600 m s.n.m. (Figura 1B).

Los bosques montanos en nuestra zona de estudio están dominados por árboles de los géneros *Weinmannia*, *Cinchona*, *Podocarpus*, helechos arbóreos (*Nephelea*), palmeras de montaña (*Ceroxylon*) y abundantes epífitas. En los pajonales de las jalcas predominan las poáceas (*Calamagrostis*, *Stipa*), asteráceas (*Gynoxys*, *Baccharis*, *Senecio*, *Chuquiraga*) y ericáceas (*Vaccinium*, *Gaultheria*), con algunos parches de bosques enanos de *Polylepis* (Llatas-Quiroz & López-Mesones, 2005). Según la información de la estación meteorológica más cercana (Incahuasi, Lambayeque, a 3.052 m s.n.m.), la temperatura anual promedio en la zona varía entre 7,4 ° y 16,3 °C, y la precipitación anual fluctúa entre 605 y 1.050 mm, con una estación lluviosa normalmente entre enero y marzo (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI, 2021).

Metodología

La evaluación con cámaras trampa se hizo durante la época seca, entre junio y setiembre del 2018. Nuestra área de estudio comprendía una superficie aproximada de 65 km² (polígono mínimo convexo), donde se colocaron 47 cámaras trampa (Bushnell Trophy Cam) distribuidas tomando como referencia una grilla de 1 x 1 km. En la medida de lo posible, las cámaras se instalaron en el centro de las cuadrículas; dependiendo de las condiciones de accesibilidad, se buscó que la distancia entre ellas fuera mayor o igual a 1 km y en senderos donde se encontraron rastros de mamíferos grandes, especialmente *T.*

ornatus y *T. pinchaque*. Estaban colocadas a una altura aproximada de 40 cm del suelo y se programaron para que funcionaran las 24 horas del día y tomaran tres fotos por detección, con un tiempo entre ráfagas de un segundo y alta sensibilidad del sensor. Las fotografías de mamíferos terrestres se procesaron en el programa Camera Base 1.7 (Tobler, 2015) separándolas por especies, y se identificaron según las guías de campo (Emmons & Feer, 1997; Tirira, 2017), el conocimiento de los autores y la asesoría de expertos. Se estimó la abundancia relativa de las especies a partir de su frecuencia de captura determinada por el número de eventos fotográficos independientes, con un periodo de una hora entre capturas para maximizar la independencia entre eventos. El número total de eventos independientes por especie se corrigió con el esfuerzo de muestreo (número total de cámaras instaladas multiplicado por el tiempo que estuvieron funcionando) y estandarizado por 1.000 cámaras-día (Díaz-Pulido & Payán-Garrido, 2012).

Además, para obtener observaciones directas o evidencias de presencia (heces y huellas) de las especies de mamíferos, se hicieron caminatas en trochas cercanas y de acceso a las estaciones de fototrampeo durante el periodo de instalación y revisión, y entre agosto y noviembre del 2021.

Para la taxonomía de las especies se siguió a Pacheco *et al.* (2021). Las especies amenazadas se seleccionaron y clasificaron según el Libro Rojo de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, 2021) y la lista de fauna silvestre amenazada de Perú (Ministerio de Agricultura, 2014).

Resultados

El total de especies de mamíferos terrestres medianos y mayores registrados en la zona de estudio fue de 14 especies. Obtuvimos 2.598 imágenes de 13 de estas especies durante 3.847 cámaras-día, cuatro de ellas también se registraron con base en evidencias indirectas, aunque las observaciones directas nos permitieron registrar dos especies, una de ellas (*C. rufescens*) nueva, que se añade a la diversidad de mamíferos de la zona (Tabla 1).

Según las categorías de amenaza de la UICN, se registró una especie “En Peligro” (*T. pinchaque*), una “Vulnerable” (*T. ornatus*), una “Casi Amenazada” (*C. taczanowskii*) y dos con “Datos Deficientes” (*D. pilosus*, *S. andinus*), en tanto que según la categorización de especies amenazadas de Perú, *T. pinchaque* está considerada como “Críticamente Amenazada”, *T. ornatus* y *D. pilosus* como “Vulnerables” y *C. taczanowskii* como “Casi Amenazada” (Figura 2).

Registros notables

Dasyprocta pilosus (*armadillo peludo*). Registramos tres eventos diferentes de la especie en dos cámaras trampa tanto en Gramalote (6°7,92' S, 79°14,27' O) como en Tucto (6°11,48' S, 79°13,71' O), en elevaciones de 2.890 y 3.375 m s.n.m., respectivamente. Los registros se hicieron entre las 22:40 y 01:30 h a una temperatura entre los 8 y los 10 °C. Esta especie es endémica de los Andes de Perú y es una de las especies de armadillos menos estudiadas (Superina *et al.*, 2014). Según la UICN está categorizada como con “Datos Deficientes” (Superina & Abba, 2014).

Coendou rufescens (*puerco espín de cola corta*). El 10 de noviembre de 2021 registramos un ejemplar muerto, aparentemente atacado por otro animal silvestre, en un parche de bosque en las jalcas de Tucto a 3.277 m s.n.m. (6°14,46'S, 79°13,67'O). El espécimen solo se examinó y fotografió, pero no se recolectó. Esta especie es el único puerco espín neotropical con cola corta y coloración rojiza y habita en los Andes de Colombia, Ecuador, norte de Perú y Bolivia (Voss, 2001; Narváez-Romero *et al.*, 2018). En Perú es una especie muy poco conocida, con registros documentados en matorrales y bosques montanos entre los 1.700 y los 2.800 m s.n.m. en los departamentos de Piura y Lambayeque (More & Crespo, 2016).

Dasyprocta cf. fuliginosa (*añuje negro*). Individuos de *Dasyprocta* de coloración marcadamente negra fueron registrados por cuatro cámaras trampa en Gramalote, entre los 2.550 y los 2.930 m s.n.m. Las detecciones se dieron entre la 07:19 y las 19:30 horas

Tabla 1. Mamíferos medianos y mayores registrados en los bosques montanos y jalcas de Gramalote y Tucto (Cajamarca). Junio a septiembre, 2018

Orden	Familia	Especie	Nombre común	Estado de amenaza		Tipo de registro	Frecuencia de captura	
				UICN	Perú			
Cingulata	Dasyopodidae	<i>Dasyopus pilosus</i>	Armadillo peludo	DD	VU	C	0,8	
Rodentia	Erethizontidae	<i>Coendou rufescens</i>	Puerco espín de cola corta	LC		O	-	
	Cuniculidae	<i>Cuniculus taczanowskii</i>	Majaz de montaña	NT	NT	C	15,9	
	Dasyproctidae	<i>Dasyprocta cf. fuliginosa</i>	Añuje negro	LC		C	6,8	
Lagomorpha	Leporidae	<i>Sylvilagus andinus</i>	Conejo andino	DD		C	6,2	
Carnivora	Felidae	<i>Leopardus pardalis</i>	Tigrillo	LC		C	3,9	
	Canidae	<i>Lycalopex culpaeus</i>	Zorro andino	LC		C, E	5,2	
	Ursidae	<i>Tremarctos ornatus</i>	Oso de anteojos	VU	VU	C, E	22,4	
	Mephitidae	<i>Conepatus chinga</i>	Zorrillo andino	LC		C	3,4	
	Mustelidae		<i>Eira barbara</i>	Tayra	LC		C	8,1
			<i>Neogale frenata</i>	Comadreja	LC		C	0,8
	Procyonidae	<i>Potos flavus</i>	Chosna	LC		C	0,3	
Perissodactyla	Tapiridae	<i>Tapirus pinchaque</i>	Tapir de montaña	EN	CR	C, O, E	8,1	
Artiodactyla	Cervidae	<i>Odocoileus virginianus</i>	Venado de cola blanca	LC		C, E	4,7	

CR: críticamente amenazado, EN: en peligro, VU: vulnerable, NT: casi amenazado, DD: datos deficientes, LC: preocupación menor
C: cámara trampa; O: observación directa; E: evidencias indirectas de presencia

a temperaturas entre los 5 y los 17 °C. Las mayores detecciones independientes (n=8) se hicieron con una cámara a 2.660 m s.n.m. El género *Dasyprocta* es uno de los más reconocibles entre los roedores del Neotrópico y sus especies varían en el color del pelaje; los de coloración básicamente negra corresponden a *D. fuliginosa* (Patton & Emmons, 2015) y su rango altitudinal está entre los 200 y los 1.600 m s.n.m. (Tirira, 2017).

Potos flavus (*chosna* o *kinkanjú*). Un ejemplar fue captado por una cámara trampa en Gramalote (6°8,25'S, 79°13,94'O) a 2.720 m s.n.m. El registro se hizo a las 00:29 h a una temperatura de 10 °C. Este carnívoro nocturno y arbóreo se distribuye ampliamente en los bosques tropicales de Centroamérica y Suramérica desde el nivel del mar hasta los 2.500 m s.n.m. (Helgen et al., 2016).

Tremarctos ornatus (*oso de anteojos*). Se registraron individuos en nueve cámaras trampa instaladas en el bosque montano de Gramalote entre los 2.650 y los 3.320 m s.n.m., pero durante los recorridos se encontraron evidencias de alimentación y heces también en Tucto. Esta fue la especie con mayor número de detecciones entre todas las registradas.



Figura 2. Registro fotográfico de mamíferos amenazados y notables registrados en Gramalote y Tucto (Cajamarca) en el presente estudio. **A.** *Dasypus pilosus*, **B.** *Coendou rufescens*, **C.** *Dasyprocta cf. fuliginosa*, **D.** *Potos flavus*, **E.** *Tremarctos ornatus*, **F.** *Tapirus pinchaque*.

Las detecciones se hicieron las 06:10 y 19:05 horas y entre los 6 y los 16 °C. A través de la identificación facial de los osos se reconocieron 11 individuos diferentes, 10 de los cuales fueron fotografiados en una sola cámara (6°9,19' S, 79°13,16' O, 2.650 m s.n.m.). El oso de anteojos es una especie focal de conservación en Suramérica (Peyton, 1980; García-Rangel, 2012).

Tapirus pinchaque (*tapir de montaña*). La especie quedó registrada en 13 cámaras trampa ubicadas entre los 2.575 y los 3.450 m s.n.m. La mayor cantidad de registros (n=8) fue en las jalcas de Tucto. Las fotografías de la especie se hicieron entre las 01:12 y las 20:37 horas, mayormente en horas diurnas (52 %) y crepusculares (28 %). IS observó y grabó directamente a un individuo que caminaba en la ladera de un cerro aledaño a una laguna el 19 de junio 2018 a las 16:00 horas (6°12'44" S, 79°12'41" O, 3.419 m s.n.m.). Las heces y huellas de la especie se encontraron en la zona de Tucto, cerca de las cámaras instaladas más al este de la zona de estudio. *T. pinchaque* es uno de los herbívoros más grandes y se considera una especie amenazada y de prioridad para la conservación en la cordillera de los Andes (Downer, 1996; Ripple *et al.*, 2015) y globalmente como una especie “En Peligro” (Lizcano *et al.*, 2016).

En relación con las frecuencias de captura, las más altas fueron las del oso de anteojos (*T. ornatus*) con 22,4 y de la paca de montaña (*C. taczanowskii*) con 15,9, en tanto que las más bajas correspondieron al armadillo peludo (*D. pilosus*), la comadreja (*Neogale frenata*) con 0,8 y la chosna (*P. flavus*) con 0,3 (Tabla 1).

Discusión

Los estudios sobre la diversidad de mamíferos medianos y grandes en los ecosistemas de montaña ubicados en el lado peruano de la depresión de Huancabamba son muy escasos

y hasta la fecha solo se habían publicado aquellos realizados en las áreas naturales protegidas del Bosque de Protección de Pagaibamba -BPP (Jiménez *et al.*, 2010) y el SNTN (Mena & Pacheco, 2020).

Nuestro estudio constituye el primero de su tipo en bosques montanos y jalcas en el sur de la depresión de Huancabamba que no están formalmente protegidos, aunque sí reconocidos como una prioridad para la conservación desde hace más de 25 años (Rodríguez, 1996; Weigend *et al.*, 2005; Llatas-Quiroz & López-Mesones, 2005; MINAM, 2009; Gobierno Regional Cajamarca, 2009; Arnillas *et al.*, 2011).

La cordillera Kañaris–Pagaibamba es un excepcional refugio de biodiversidad que ha sido muy poco explorado en estudios científicos. Unos pocos se han hecho en la última década, con el registro de especies nuevas para la ciencia (Venegas & Duellman, 2012; Venegas *et al.*, 2014; Venegas *et al.*, 2016). Varios de estos taxones constituyen endemismos locales, lo cual se explicaría por el relativo aislamiento de la zona con respecto a otros ecosistemas de montaña en la cordillera Occidental (Gobierno Regional Cajamarca, 2018). A pesar de que este fue un estudio relativamente rápido, los hallazgos notables de especies en la zona destacan aún más su valor para la investigación científica y la conservación.

Nuestros registros de *D. pilosus* extienden su distribución 100 km al noroeste de la localidad más cercana conocida (Bambamarca) en el departamento de Cajamarca (Feng *et al.*, 2017^a) (Figura 3a). Además, constituye el primer registro en la cordillera occidental de Perú y uno de los reportados más al norte en el país. Aunque nuestro registro se ubica fuera

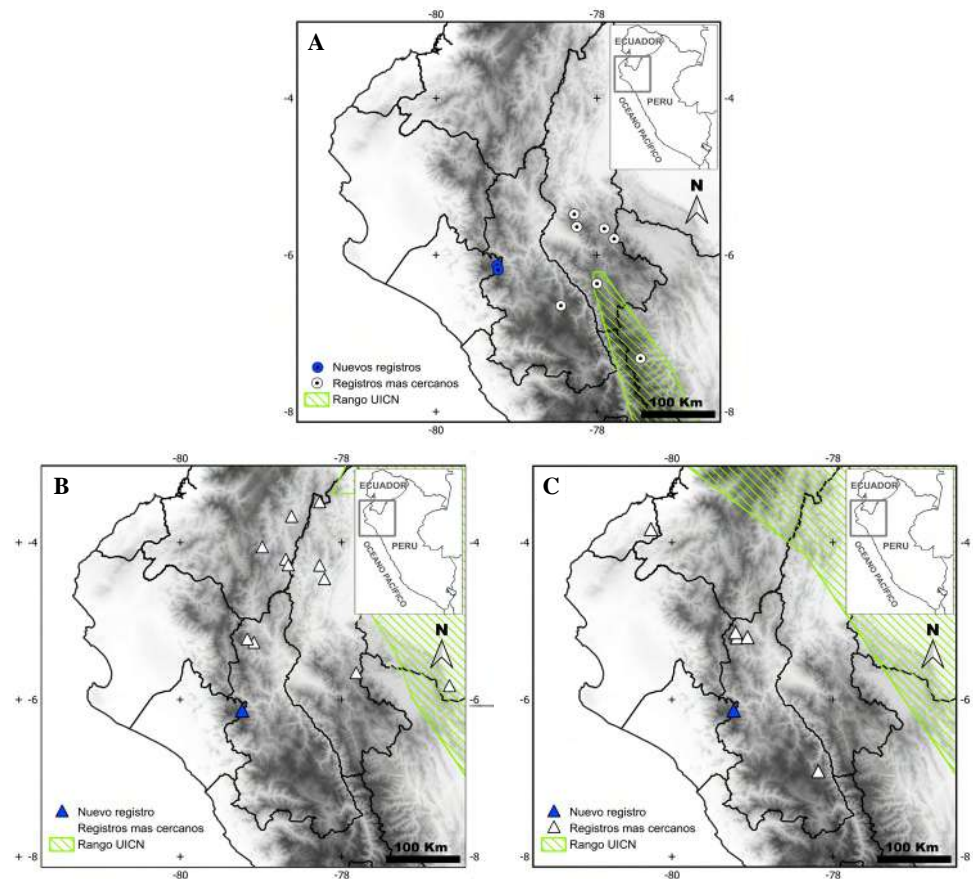


Figura 3. Mapa con la ubicación de los nuevos registros de *Dasypterus pilosus* (A), *Dasyprocta cf. fuliginosa* (B) y *Potos flavus* (C) comparado con registros previos más cercanos y la distribución según UICN

del ámbito de distribución conocido para la especie (**Superina & Abba**, 2014), coincide con la distribución potencial y el nicho climático estimado por **Feng *et al.*** (2017b), quienes predecían su presencia más extendida hacia la parte central y sur de Cajamarca.

Nuestro registro incrementa el rango altitudinal de *C. rufescens* en 477 m en el país (hasta 3.277 m s.n.m.), constituye el primer registro para el departamento de Cajamarca, y coincide con la distribución potencial de la especie sugerida por **Narvaez-Romero *et al.*** (2018).

Los registros de *D. cf. fuliginosa* y *P. flavus* en Gramalote expanden los límites altitudinal y latitudinal previamente conocidos hacia la cordillera Occidental del país. Los registros más cercanos de ambas especies se ubican en el SNTN y el Área de Conservación Regional Bosques El Chaupe, Cunia y Chinchiquilla (**Hurtado *et al.***, 2016; **Mena & Pacheco**, 2020; **Gobierno Regional Cajamarca**, 2021) que se ubican, en promedio, unos 100 km al norte (línea recta) de Gramalote. *D. fuliginosa* ha sido previamente documentado en Perú hasta los 1.900 m s.n.m. (MUSM 25162) y nuestro registro ampliaría su rango altitudinal en 1.000 metros y sería el más occidental en su rango de distribución (**Figura 3b**). Tomando en cuenta el conocimiento previo de la especie, el excepcional registro que presentamos como *D. cf. fuliginosa* destaca, además, la necesidad de estudiar mejor la identidad taxonómica de estas poblaciones que habitan los bosques montanos de los Andes del norte del país.

Por otra parte, en el Perú el límite altitudinal para *P. flavus* es de 1.950 m s.n.m. (**Pacheco *et al.***, 2020). Nuestro registro incrementa este rango en 770 metros (hasta los 2.720 m s.n.m.) y constituye el más occidental en los Andes del norte del país (**Figura 3c**). **Hernández-Camacho** (1977) menciona que en Colombia la especie se encuentra hasta los 3.200 m s.n.m., pero no existen registros documentados recientes a estas altitudes, por lo que reconocen como límite altitudinal los 2.500 m s.n.m. (**Ford & Hoffmann**, 1988; **Helgen *et al.***, 2016). En este sentido, nuestro registro sería también el más alto para la especie a nivel global.

Aunque lo consideramos un resultado preliminar, la abundancia relativa que hemos encontrado de *T. ornatus* y la detección de 11 individuos en el área de estudio evidencian la presencia de una importante población de osos, con una densidad que podría alcanzar los 16 ind/km², por encima del promedio previamente conocido (5-7 ind/km²) (**Vélez-Liendo & García-Rangel**, 2017). Para una estimación más precisa y confiable se requieren estudios de largo plazo sobre la presencia de la especie en el área de estudio.

Las fotografías del tapir de montaña en Gramalote y Tucto son las más actuales de la especie en el extremo sur de la depresión de Huancabamba. Su presencia en esta cordillera había sido descrita a partir de evidencias indirectas (huellas y heces) encontradas por **Amanzo** (2009) y **Jiménez *et al.*** (2010). El rango de distribución de esta especie en Perú incluye dos bloques separados naturalmente por el valle del río Huancabamba (**More *et al.***, 2022) y, a pesar de que existe un plan nacional de conservación del tapir de montaña en Perú (**SERFOR**, 2018), es una especie escasamente estudiada, particularmente en el sur de su rango en el país.

Además de los registros notables de mamíferos grandes y medianos en el área de estudio, se presenta la riqueza de estos taxones en la zona solo preliminarmente debido a las limitaciones de la metodología empleada y el periodo de estudio. La riqueza de especies registrada en nuestro estudio (n=14) es importante si se comparan la superficie y el gradiente altitudinal de Tucto y Gramalote (65 Km² aprox./2.500 – 3.600 m s.n.m.) con la del SNTN (321,1 Km² / 1.600 – 3.600 m s.n.m.), donde se ha registrado la mayor riqueza (n=31) de mamíferos medianos y grandes en los Andes del extremo norte de Perú (**Mena & Pacheco**, 2020). Por otro lado, nuestro estudio se ubicó aproximadamente 35 Km al noroeste (en línea recta) de la localidad estudiada por **Jiménez *et al.*** (2010) en el BPP (20,8 Km²). Estos autores hicieron sus evaluaciones en las épocas seca y húmeda con un esfuerzo de muestreo menor que el nuestro (581 cámaras-día), e hicieron registros con base en evidencia indirecta. Nuestra evaluación (solo en la época seca) documentó la presencia de cuatro especies más que dicho estudio (*D. pilosus*, *D. cf. fuliginosa*, *P. flavus*, *C. rufescens*). Además de relacionarse con un mayor esfuerzo de muestreo, el mayor número

de especies registrado en nuestro estudio también lo estaría con la mayor extensión e integridad de los bosques en el ámbito de Gramalote y Tucto y su conectividad con la jalca y los bosques montanos que se extienden hacia los distritos de Kañaris en Lambayeque y Querocotillo y Miracosta en Cajamarca, ubicados al oeste y sureste de nuestra zona de estudio. Para obtener un conocimiento más integral de la comunidad de mamíferos del área de estudio, recomendamos continuar los estudios con mayor esfuerzo de muestreo, especialmente en época húmeda.

Los bosques montanos y jalcas al sur de la depresión de Huancabamba están desapareciendo rápidamente como consecuencia de la ampliación de las áreas agrícolas y ganaderas y los incendios forestales asociados con dichas actividades. Según *Global Forest Watch* (**World Resources Institute – WRI**, 2021), entre el 2001 y 2020 se perdió el 10 % de los bosques del distrito de Querocotillo, donde se ubica la mayor parte de nuestra área de estudio. Esta superficie representa alrededor del 10 % de los bosques montanos que aún quedan en la cordillera entre Kañaris y Pagaibamba (**MINAM**, 2019). Además, el 80 % de la parte alta de esta cordillera está cubierta por concesiones mineras (**INGEMMET**, 2021), en tanto que solo el 4 % se encuentra protegida formalmente. Las evidencias que presentamos en este estudio señalan que la cordillera Kañaris–Pagaibamba es un refugio importante para varias especies de mamíferos medianos y grandes muy amenazadas. Es fundamental que las autoridades nacionales y regionales trabajen junto a los pobladores locales y sus organizaciones de base para proteger los pocos bosques montanos y jalcas que aún quedan al sur de la depresión de Huancabamba y las poblaciones de mamíferos que alberga antes de que desaparezcan completamente.

Conclusiones

Mediante cámaras trampa se registraron 14 especies de mamíferos medianos y mayores en los bosques montanos y jalcas de Tucto y Gramalote (norte de Perú), ubicados en la parte sur de la depresión de Huancabamba. Los registros más notables de este estudio incluyen especies globalmente amenazadas como *T. pinchaque*, *T. ornatus* y *C. taczanowskii*. Asimismo, se reportan extensiones de rango latitudinal para *D. pilosus* y de rango altitudinal y latitudinal para *D. cf. fuliginosa*, *P. flavus* y *C. rufescens*. La cordillera estudiada es un refugio muy singular para mamíferos y para la biodiversidad y es una prioridad para la investigación y la conservación en los Andes del norte de Perú.

Agradecimientos

A Disney Conservation Fund Grant & Mohamed bin Zayed Species Conservation Fund. A la población y guías de campo en Tucto y Gramalote por permitirnos ingresar y realizar este estudio. A R. Cadenillas, M. Ruiz-García, J. Rivera, M. Weigend, A. Abba, C. M. Hurtado, J. L. Mena, P. Venegas y F. Angulo por compartir la información disponible sobre las especies de mayor relevancia de este estudio y otras de interés, así como sobre el valor biológico de la zona.

Contribución de los autores

AM: investigación, curaduría de datos, redacción del manuscrito; IS: curaduría de datos e investigación; RPP: investigación, revisión y edición del documento; JV: curaduría de datos e investigación; RDA: administración de proyecto; JaV: investigación

Conflicto de intereses

Los autores no tienen conflictos de intereses.

Referencias

- Amanzo, J.** (2009). Estado de Conservación del Tapir Andino (*Tapirus pinchaque*) en el Perú. XVIII Reunión científica del Instituto de Ciencias Biológicas Antonio Raimondi (ICBAR), Lima, Perú.

- Appleton, R.D., Van Horn, R. C., Noyce, K. V., Spady, T. J., Swaisgood, R. R., Arcese, P.** (2018). Phenotypic plasticity in the timing of reproduction in Andean bears. *Journal of Zoology*, 305, 196-202. <https://doi.org/10.1111/jzo.12553>
- Arnillas, C.A., Amorós, S., Luque, C., Regal, F., Tovar, L.A., Vásquez, P., Véliz, C.** (2011). Zonificación para la selección de Áreas Prioritarias para la Conservación de Tumbes y Lambayeque. CDC-UNALM; KfW; Gobierno Regional de Tumbes; Gobierno Regional de Lambayeque; FDA; PROFONANPE. Lima, Perú.
- Ayers, T.** (1999). Biogeography of *Lysipomia* (Campanulaceae), a high elevation endemic: an illustration of species richness at the Huancabamba depression, Peru. *Biodiversity Heritage Library: Arnaldoa*, 6, 13-28.
- Brack, A.** (1986). Las Ecoregiones del Perú. *Boletín de Lima*, 44, 57-70.
- Centro de Datos para la Conservación - Universidad Nacional Agraria La Molina (CDC-UNALM).** (2006). Análisis del recubrimiento ecológico del sistema nacional de áreas naturales protegidas por el estado. CDC-UNALM/TNC. Lima, Perú. 170pp.
- Díaz-Pulido, A., Payán-Garrido, E.** (2012). Manual de fototrampeo: una herramienta de investigación para la conservación de la biodiversidad en Colombia. Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt y Panthera Colombia. Colombia.
- Downer, C.** (1996). The mountain tapir, endangered 'flagship' species of the high Andes. *Oryx*, 30 (1), 45-58. <https://doi.org/10.1017/S0030605300021384>
- Emmons, L.H., Feer, F.** (1997). Neotropical Rainforest Mammals: A Field Guide. Segunda Edición. University of Chicago Press. Chicago. U.S.A. 396pp.
- Feng, X., Castro, M., Linde, E., Papes, M.** (2017a). Armadillo Mapper: A Case Study of an Online Application to Update Estimates of Species' Potential Distributions. *Tropical Conservation Science*, 10, 1-5. <https://doi.org/10.1177/1940082917724133>
- Feng, X., Castro, M., McBees, K., Papes, M.** (2017b). Hiding in a Cool Climatic Niche in the Tropics? An Assessment of the Ecological Biogeography of Hairy Long-Nosed Armadillos (*Dasybus pilosus*). *Tropical Conservation Science*, 10, 1-13. <https://doi.org/10.1177/1940082917697249>
- Fjeldsa, J.** (1995). Geographical patterns of neoendemic and older endemic species of Andean Forest birds: the significance of ecologically stable areas. En Churchill, S., Baslev, H., Forero, E., Luteyn, J. (Eds.). Biodiversity and conservation of Neotropical Montane Forests (pp. 89 - 102). New York Botanical Garden, Bronx. USA.
- Ford, L. & Hoffmann, R.S.** (1988). *Potos flavus*. *Mammalian Species*, 321, 1-9
- García-Olaechea, A., Vega, Z., Hurtado, C.M.** (2021). Noteworthy records and updated richness of medium to large-sized mammals in arid and semi-arid ecosystems of northern Peru and southern Ecuador. *Journal of Arid Environments*, 188, 104471. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104471>
- García-Rangel, S.** (2012). On Andean bear (*Tremarctos ornatus*) natural history and conservation. *Mammal Review*, 42, 85-119. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2907.2011.00207.x>
- Gobierno Regional Cajamarca.** (2009). Estrategia Regional de Biodiversidad de Cajamarca al 2021. Cajamarca, Perú.
- Gobierno Regional Cajamarca.** (2018). Línea base de flora y fauna del bosque de protección Pagaibamba, en el marco del proyecto "Recuperación del servicio ambiental hídrico de área de amortiguamiento del bosque de protección Pagaibamba, distrito de Querocoto, Provincia de Chota, región Cajamarca". Cajamarca, Perú.
- Gobierno Regional Cajamarca.** (2021). Plan maestro 2021 - 2025 del Área de Conservación Regional Bosques El Chaupé, Cunía y Chinchiquilla. Cajamarca, Perú.
- Green, A. M., Chynoweth, M. W., Şekerciöglü, C. H.** (2020). Spatially explicit capture recapture through camera trapping: A review of benchmark analyses for wildlife density estimation. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8, 563477. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.563477>
- Helgen, K., Kays, R., Schipper, J.** (2016). *Potos flavus*. En IUCN 2021. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2021.3. Fecha de consulta: 24 de septiembre, 2021. Disponible en: www.iucnredlist.org
- Hernández-Camacho, J.** (1977). Notas para una monografía de *Potos flavus* (Mammalia: Carnivora) en Colombia. *Caldasia*, 11(55), 147-181.
- Hurtado, C.M. & Pacheco, V.** (2015). Nuevos registros de mamíferos en el Parque Nacional Cerros de Amotape, noroeste de Perú. *Revista Peruana de Biología*, 22 (1), 077- 086. <https://doi.org/10.15381/rpb.v22i1.11124>

- Hurtado, C.M., Pacheco, V., Fajardo, U., Uturnunco, A.** (2016). An updated analysis of the distribution of Cites-listed Peruvian carnivores for conservation priorities. *Mastozoología Neotropical*, 23(2), 415-429.
- INGEMMET.** (2021). Sistema de Información Geológica y Catastro Minero. Fecha de consulta: 5 de octubre, 2021. Disponible en: www.geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin
- Jiménez, C., Quintana, H., Pacheco, V., Melton, D., Torrealva, J., Tello, G.** (2010). Camera trap survey of medium and large mammals in a montane rainforest of northern Peru. *Revista Peruana de Biología*, 17(2), 191-196.
- Josse C., Cuesta F., Navarro G., Barrena V., Cabrera E., Chacón- Moreno E., Ferreira W., Peralvo M., Saito J., Tovar A.** (2009). Mapa de Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa Regional ECOBONA, CONDESAN-Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe, LTA-UNALM, IAvH, ICAE-ULA, CDC-UNALM. Lima, Perú.
- Lizcano, D.J., Amanzo, J., Castellanos, A., Tapia, A., López-Málaga, C.M.** (2016). *Tapirus pinchaque*. En IUCN 2021. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2021.3. Fecha de consulta: 24 de septiembre, 2021. Disponible en: www.iucnredlist.org
- Llatas-Quiroz, S. & López-Mesones, M.** (2005). Bosques montanos-relictos en Kañaris (Lambayeque, Perú). *Revista Peruana de Biología*, 12 (2), 299-308.
- Lunde, D. & Pacheco, V.** (2003). A new species of *Cryptotis* (Insectivora: soricidae) from Northern Peru. *Mammal Study*, 28, 145-148.
- Medina, C., Pino, K., Pari, A., Llerena, G., Zeballos, H., López, E.** (2016). Mammalian diversity in the Savanna from Peru, with three new additions from country. *Papéis Avulsos de Zoologia*, 56(2), 9-26. <https://doi.org/10.1590/0031-1049.2016.56.02>
- Mena, J.L. & Yagui, H.** (2019). Coexistence and habitat use of the South American coati and the mountain coati along an elevational gradient. *Mammalian Biology*, 98, 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.mambio.2019.09.004>
- Mena, J.L., Yagui, H., Tejeda, V., Cabrera, J., Pacheco-Esquivel, J., Rivero, J., Pastor, P.** (2020). Abundance of jaguars and occupancy of medium- and large sized vertebrates in a transboundary conservation landscape in the northwestern Amazon. *Global Ecology and Conservation*, 23, e01079. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01079>
- Mena, J.L. & Pacheco, V.** (2020). Mountains and traits: environmental heterogeneity and mammal assemblages along an elevational gradient in the Northern Andes. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/01650521.2020.1851345>
- Ministerio del Ambiente – MINAM.** (2009). Plan director del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado - SINANPE. Estrategia Nacional. Lima, Perú.
- Ministerio del Ambiente – MINAM.** (2019). Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú. Ministerio del Ambiente, Lima, Perú.
- More, A. & Crespo, S.** (2016). Registros documentados del puerco espín de cola corta *Coendou rufescens* (Erethizontidae, Rodentia) en el noroeste de Perú. *The Biologist*, 14(2), 350-369.
- More, A., Devenish, C., Carrillo-Tavara, K., Piana, R.P., López-Málaga, C., Vega-Guarderas, Z., Núñez-Cortéz, E.** (2022). Distribution and conservation status of the mountain tapir (*Tapirus pinchaque*) in Peru. *Journal for Nature Conservation*, 66, 126130. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126130>
- Narváez-Romero, C., Reyes-Puig, C., Valle, D., Brito, J.** (2018). New records and estimation of the potential distribution of the stump-tailed porcupine *Coendou rufescens*. *Therya*, 9(2), 37-146. <https://doi.org/10.12933/therya-18-581>
- O'Connell, A.F., Nichols, J.D., Karanth, K.U.** (2010). Camera traps in animal ecology: methods and analyses. Springer Science & Business Media. Tokyo. Japan.271pp.
- Pacheco, V. & Patterson, B.** (1992). Systematics and biogeographic analyses of four species of *Sturnira* (Chiroptera: Phyllostomidae), with emphasis on Peruvian forms. *Memorias del Museo de Historia Natural*, 21, 5-81.
- Pacheco, V.** (2002). Mamíferos del Perú. En: Ceballos, G., Simonetti, J. (Eds) Diversidad y conservación de los mamíferos neotropicales (pp. 503-550). Conabio-UNAM. México, DF, 582pp.
- Pacheco, V., Graham-Ángeles, L., Diaz, S., Hurtado, C.M., Ruelas, D., Cervantes, K., Serrano-Villavicencio, J.** (2020). Diversidad y distribución de los mamíferos del Perú I: Didelphimorphia, Paucituberculata, Sirenia, Cingulata, Pilosa, Primates, Lagomorpha, Eulipotyphla, Carnivora, Perissodactyla y Artiodactyla. *Revista Peruana de Biología*, 27 (3), 289-328. <http://doi.org/10.15381/rpb.v27i3.18356>

- Pacheco, V., Díaz, S., Graham, L., Flores-Quispe, M., Calizaya-Mamani, G., Ruelas, D., Sánchez-Vendizú, P.** (2021). Lista actualizada de la diversidad de los mamíferos del Perú y una propuesta para su actualización. *Revista Peruana de Biología*, 28(4), 001-030. <http://doi.org/10.15381/rpb.v28i4.21019>
- Patton, J.L. & Emmons, L.H.** (2015). Family Dasyproctidae Bonaparte, 1838. En: Patton, J.L., Pardiñas, U.F.G., D'elia, G. (Eds). *Mammals of South America Volume 2: Rodents* (pp. 733-762). University of Chicago Press, Chicago.
- Peters, T., Braeuning, A., Muenchow, J., Richter, M.** (2014). An ecological paradox: high species diversity and low position of the upper forest line in the Andean Depression. *Ecology and Evolution*, 4(11), 2134-2145. <http://doi.org/10.1002/ece3.1078>
- Peyton, B.** (1980). Ecology, distribution, and food habits of spectacled bears, *Tremarctos ornatus*, in Peru. *Journal of Mammalogy*, 61, 639-652.
- Pillco-Huarcaya, R., Beirne, C., Serrano-Rojas, S., Whitworth, A.** (2020). Camera trapping reveals a diverse and unique high-elevation mammal community under threat. *Oryx*, 54(6), 901-908. <https://doi.org/10.1017/S0030605318001096>
- Reynel, C., Pennington, R.T., Sarniken, T.** (2013). Cómo se formó la diversidad ecológica del Perú. Lima, Perú. FDA, Royal Botanic Garden of Edinburgh. 412 pp.
- Ripple, W. J., Newsome, T. M., Wolf, C., Dirzo, R., Everatt, K. T., Galetti, M., Hayward, M. W., Kerley, G. I. H., Levi, T., Lindsey, P. A., Macdonald, D. W., Malhi, Y., Painter, L. E., Sandom, C. J., Terborgh, J., Van Valkenburgh, B.** (2015). Collapse of the world's largest herbivores. *Science Advances*, 1(4), 1-12. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400103>
- Ministerio de Agricultura.** (2014). Decreto Supremo N° 004-2014 - Aprueba la actualización de la lista de clasificación y categorización de las especies amenazadas de fauna silvestre legalmente protegidas (Perú). Ministerio de Agricultura. Lima – Perú. 8 abril 2014. Diario El Peruano.
- Rodríguez, L.** (Ed). 1996. Diversidad biológica del Perú. Zonas prioritarias para su conservación. FANPE. GTZ-INRENA. Lima, Perú. 190pp.
- Sánchez-Vega, I. & Dillon, M.O.** (2006). Jalcas. En Moraes, M., Øllgaard, B., Kvist, L.P., Borchsenius, F., Balslev, H. (Eds). *Botánica Económica de los Andes Centrales* (pp. 77-90). Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia.
- Scullion, J., Fahrenholz, J., Huaytalla, V., Rengifo, E.M., Lang, E.** (2021). Mammal conservation in Amazonia's protected areas: A case study of Peru's Ichigkat Muja - Cordillera del Condor National Park. *Global Ecology and Conservation*, 26, e01451. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01451>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI.** (2021). Datos Meteorológicos a Nivel Nacional. Fecha de consulta: 5 de octubre, 2021. Disponible en: www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones
- Servicio Forestal y de Fauna Silvestre - SERFOR.** (2018). Plan Nacional de Conservación del Tapir Andino (*Tapirus pinchaque*) en el Perú. Período 2018 - 2027. Lima, Perú.
- Skrabal, J., Tillich, H., Weigend, M.** (2001). A revision of the *Passiflora lobbiai* group (Passifloraceae), including some new species and subspecies. *Harvard Papers in Botany*, 6(1), 309-338.
- Solorzano, C., Intriago-Alcívar, L., Guerrero-Casado, J.** (2021). Comparison between terrestrial mammals in evergreen forests and in seasonal dry forests in Western Ecuador: should efforts be focused on dry forests? *Mammalia*, 85(4): 306-314. <https://doi.org/10.1515/mammalia-2020-0145>.
- Struwe, L., Haag, S., Heiberg, E., Grant, J.R.** (2009). Andean speciation and vicariance in Neotropical *Macrocarpaea* (Gentianaceae - Helieae). *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 96, 450-469.
- Superina, M., Pagnutti, N., Abba, A.** (2014). What do we know about armadillos? An analysis of four centuries of knowledge about a group of South American mammals, with emphasis on their conservation. *Mammal Review*, 44, 69-80. <https://doi.org/10.1111/mam.12010>
- Superina, M. & Abba, A.** (2014). *Dasypus pilosus*. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2021.3. Fecha de consulta: 5 de octubre, 2021. Disponible en: www.iucnredlist.org
- Tirira, D.** (2017). Guía de campo de los mamíferos del Ecuador. Publicación Especial 11. Editorial Murciélago Blanco. Ecuador. 600pp.
- Tobler, M.** (2012). Software Camera Base. Version 1.6. Fecha de consulta: junio, 2021. Disponible en: www.atrium-biodiversity.org/tools/camerabase
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza - UICN.** (2021). The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2021-3. Fecha de consulta: octubre, 2021. Disponible en: www.iucnredlist.org

- Van Horn, R. C., Zug, B., LaCombe, C., Velez-Liendo, X., Pasiley, S.** (2014). Human visual identification of individual Andean bears *Tremarctos ornatus*. *Wildlife Biology*, 20(5), 291-299. <https://doi.org/10.2981/wlb.00023>
- Vélez-Liendo, X. & García-Rangel, S.** (2017). *Tremarctos ornatus* (errata version published in 2018). The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T22066A123792952. Fecha de consulta: 16 de abril, 2022. Disponible en: www.iucnredlist.org
- Venegas, P.** (2005). La herpetofauna del Bosque Seco Ecuatorial de Perú: Taxonomía, ecología y biogeografía. *Zonas Áridas*, 9, 9-19.
- Venegas, P. & Duellman, W.** (2012). Two syntopic new species of the *Pristimantis orestes* Group (Anura: Strabomantidae) from northwestern Peru. *Zootaxa*, 3249, 47-59.
- Venegas, P., Echevarría, L., Álvarez, S.** (2014). A new species of spiny-tailed iguanid lizard (Iguania: Stenocercus) from northwestern Peru. *Zootaxa*, 3753(1), 047-058. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.3753.1.4>
- Venegas, P., Echevarría, L., Lobos, S., Sales, P., Torres-Carbajal, O.** (2016). A new species of Andean microteiid lizard (Gymnophthalmidae: Cercosaurinae: Pholidobolus) from Peru, with comments on *P. vertebralis*. *Amphibian & Reptile Conservation*, 10(1), Special Section, 2133 (e121).
- Vivar, E., Pacheco, V., Valqui, M.** (1997). A new species of *Cryptotis* (Insectivora: soricidae) from Northern Peru. *American Museum Novitates*, 3202, 1-15.
- Voss, R.S.** (2011). Revisionary notes on Neotropical porcupines (Rodentia: Erethizontidae). An annotated checklist of the species of *Coendou* Lacepede, 1799. *American Museum Novitates*, 3720, 1-36.
- Vuilleumier, F.** (1968). Population structure of the *Asthenes flammulata* superspecies (Aves: Furnariidae). *Breviora*, 29, 1-32
- Weigend, M.** (2002). Observations on the biogeography of the Amotape- Huancabamba Zone in northern Peru. *The Botanical Review*, 68, 38-54.
- Weigend, M., Rodríguez, E., Arana, C.** (2005). The relict forests of Northwest Peru and Southwest Ecuador. *Revista Peruana de Biología*, 12(2), 185-194
- World Resources Institute - WRI.** (2021). Global Forest Watch 2.0. Fecha de consulta: 5 de octubre, 2021. Disponible en: www.globalforestwatch.org.
- Young, K. R. & Reynel, C.** (1997). Huancabamba region, Peru and Ecuador. En: Davis, S.D., Heywood, V.H., Herrera-Macbride, O., Villalobos, J., Hamilton, A.C. (Eds). *The Americas*, Vol.3, Centers of Plant Diversity, a Guide and Strategy for their Conservation (pp. 465-469), Cambridge: IUCN Publications Unit.

Artículo original

Distribución espacial y temporal de microplásticos flotantes en aguas del Caribe central colombiano

Spatial and temporal distribution of floating microplastics in waters of the Colombian central Caribbean region

✉ Andrés Franco-Herrera*, ✉ Paula Irene Polanía-Zenner, ✉ Carlos David Otálora-Rincón, ✉ Paulo César Tigeros-Benavides

Grupo de Investigación Dinámica y Manejo de Ecosistemas Marino Costeros DIMARCO, Universidad de Bogotá “Jorge Tadeo Lozano”, Santa Marta, Colombia

Artículo de posesión para admisión de Andrés Franco-Herrera, como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

El plástico es un material fundamental en la vida moderna. La mitad de la producción mundial es de un solo uso y sus desechos generan una huella identificable en la naturaleza. La red hídrica de Colombia integra aguas dulces, estuarinas y saladas, lo que facilita que estos desechos puedan llegar a las zonas marinas. En este contexto, el objetivo de nuestro estudio fue proporcionar información de la dinámica espacial y temporal de los microplásticos en la zona marino-costera del departamento del Magdalena como aporte para la implementación de futuras políticas de manejo de estos residuos. Se llevaron a cabo arrastres con red manta (250 μm) en cuatro sectores durante las épocas lluviosa y seca (2019 - 2020). Se obtuvo una submuestra representativa que fue tratada con oxidación química (reacción de Fentom) para eliminar la materia orgánica. Se contaron y clasificaron las partículas de todos los sectores por categorías morfológicas: fragmentos, fibras, espumas, películas y *pellets*. Se registró una mayor abundancia en la época de lluvias, lo que estaría relacionado con la intensificación de las descargas continentales de los ríos Manzanares, Gaira, y Magdalena y de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Los fragmentos y fracciones de más de 500 μm fueron las más abundantes y no hubo diferencias espaciales en cuanto a las abundancias. Las dinámicas meteorológicas e hidrológicas tienen un papel importante en la abundancia de los microplásticos, a lo que se suma la presión antrópica y las aguas residuales domésticas que no se gestionan de manera adecuada y favorecen que estos residuos se viertan en los sistemas naturales.

Palabras clave: Microplásticos; Contaminación; Caribe; Magdalena.

Abstract

Plastic is a fundamental material in modern life. Half of the world's production is single-use and its waste generates an identifiable footprint in nature. Colombia's hydrological system integrates fresh, estuarine, and salt waters, which facilitates these wastes reaching the marine areas. In this context, our aim was to provide information on the spatial and temporal dynamics of microplastics in the marine-coastal zone of the department of Magdalena as a contribution to the implementation of future policies for the management of these residues. Trawls with a manta net (250 μm) were carried out in four sectors of the coastal zone during the rainy and dry seasons (2019 - 2020). We took a representative subsample and treated it with chemical oxidation (Fentom reaction) to remove organic matter. Particles were counted and classified by morphological categories: fragments, fibers, foams, films, and pellets in all sectors, with greater abundance in the rainy season, which may be related to the intensification of continental discharges from the Manzanares, Gaira, and Magdalena rivers and the *Ciénaga Grande de Santa Marta*. Fragments and fractions above 500 μm in size were the most abundant and no spatial differences were observed for abundances. Meteorological and hydrological dynamics play an important role in microplastic abundance, which adds to the anthropic pressure and domestic wastewaters not properly managed and favors the disposal of these residues in natural systems.

Keywords: Microplastics; Contamination; Caribbean; Magdalena.

Citación: Franco-Herrera A, Polanía-Zenner PI, Otálora-Rincón CD, *et al.* Distribución espacial y temporal de microplásticos flotantes en aguas del Caribe central colombiano. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):406-425, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1578>

Editor: Hernando Campos

***Correspondencia:**

Andrés Franco-Herrera;
andres.franco@utadeo.edu.co

Recibido: 9 de octubre de 2021

Aceptado: 6 de mayo de 2022

Publicado: 28 de junio de 2022



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

Introducción

Desde su masificación en los años 50, los plásticos se han convertido en un material omnipresente, dominante e indispensable en la vida moderna (Galloway *et al.*, 2017). Se estima que hasta el 2015 se habían elaborado alrededor de 8.300.000.000 t de materiales plásticos vírgenes empleados en la manufactura de plásticos primarios (Geyer *et al.*, 2017), es decir, un crecimiento exponencial. A nivel mundial, en el 2019 la producción de plásticos superó las 368.000.000 t (PlasticsEurope, 2020), de las cuales 1,36 t fueron aportadas por Colombia, lo que equivale a un 0,37 % de la producción global (ACOPLÁSTICOS, 2020). Gran parte de estos polímeros sintéticos no son biodegradables y cerca del 50 % tiene una vida útil de un solo uso, en consecuencia, el 79 % de los desechos generados hasta el 2015 se ha acumulado en botaderos o en el ambiente, el 12 % se ha incinerado y solo el 9 % se ha reciclado (Barnes *et al.*, 2009; Geyer *et al.*, 2017), lo que resulta en una carga creciente de desechos plásticos suficientemente alta como para dejar una huella identificable en el registro geoquímico del planeta (Waters *et al.*, 2016).

Los plásticos y materiales sintéticos son el tipo de desechos marinos más comunes. El Grupo de Expertos sobre los Aspectos Científicos de la Protección Ambiental Marina (*Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection*, GESAMP) ha estimado que las fuentes terrestres son responsables de hasta el 80 % de los desechos marinos y el restante 20 % se debe a actividades en el mar (GESAMP, 1991). Entre las fuentes de origen continental se encuentran los desechos sólidos que se disponen en vertederos inapropiados, así como los de actividades industriales que eventualmente encuentran un camino hacia el mar en la descarga de aguas pluviales, escorrentías, ríos, desbordamientos de alcantarillados y aguas negras. Los que se originan en los océanos son producidos por el transporte marítimo (navegantes recreacionales, mercantes, militares, buques de investigación), las plataformas de gas y petróleo costa afuera y, por último, las actividades de pesca comercial tanto industrial como artesanal (Pawar *et al.*, 2016).

Los residuos plásticos en aguas superficiales fueron reportados inicialmente por científicos en la década de 1970 (Carpenter & Smith, 1972; Colton *et al.*, 1974). Desde entonces se ha encontrado que los de flotabilidad positiva se acumulan en la superficie (de Lucia *et al.*, 2014) y son transportados por corrientes y vientos, concentrándose en las zonas de convergencia de cada uno de los cinco giros oceánicos subtropicales (Law *et al.*, 2010; Eriksen *et al.*, 2013; Goldstein *et al.*, 2013; Cózar *et al.*, 2014; Law & Thompson, 2014).

La basura plástica es un problema complejo y multidimensional y tiene importantes implicaciones para el medio ambiente y las actividades humanas (Pawar *et al.*, 2016). En los últimos años, los microplásticos, o partículas menores a 5 mm, han suscitado preocupación por su ubicuidad y persistencia, y los riesgos y daños que producen en los ecosistemas marinos, pero el conocimiento de sus posibles efectos nocivos todavía no se comprende a profundidad (Everaert *et al.*, 2020). Por ello en este siglo se ha priorizado el estudio de su impacto contaminante, pues que año tras año es mayor la presión que ejercen en los ecosistemas acuáticos y los organismos que allí habitan (Bergmann *et al.*, 2015). Se han comprobado diversos efectos de los MP en todo tipo de organismos marinos, por ejemplo, la mortalidad por el efecto en los hábitos alimenticios de los peces (Ferreira *et al.*, 2016), el estrés oxidativo en sus branquias e hígado (Barboza *et al.*, 2018) e, incluso, la reducción en la tasa de crecimiento de las microalgas (Davarpanah & Guilhermino, 2019). A ello se suma que transportan y liberan sustancias nocivas como agentes plastificantes y contaminantes adsorbidos entre los que se encuentran metales pesados (Vedolin *et al.*, 2018; Acosta-Coley *et al.*, 2019a) que pueden ser lixiviados en la columna de agua o ingeridos por una amplia variedad de especies marinas (Teuten *et al.*, 2009; Everaert *et al.*, 2018; Basseling *et al.*, 2019).

En este sentido, los microplásticos pueden introducir diferentes elementos y compuestos nocivos en la red trófica, con efectos ecológicos aún impredecibles debido a la bioacumulación y la biomagnificación (Teuten *et al.*, 2009; Basseling *et al.*, 2019;

Everaert *et al.*, 2020). La comida de mar es un importante componente de la dieta humana, por lo que la presencia de microplásticos en estos alimentos representa una grave amenaza para la salud (Ajith *et al.*, 2020) debido al aporte de contaminantes orgánicos. La alta exposición a determinados agentes plastificantes presentes en los alimentos puede interferir en procesos metabólicos y resultar en alteraciones endocrinas, disrupción de la síntesis de las hormonas, daño genotóxico, y afectaciones en la movilidad y la reproducción, entre otros (Lithner *et al.*, 2009; Oehlmann *et al.*, 2009; Talsness *et al.*, 2009; Lithner *et al.*, 2011).

En la costa caribe colombiana la investigación sobre la contaminación por microplásticos en ambientes marino-costeros se ha focalizado en las playas (Acosta-Coley & Olivero-Verbel, 2015; Rangel-Buitrago *et al.*, 2018; Acosta-Coley *et al.*, 2019a, 2019b; Garcés-Ordoñez *et al.*, 2020a, 2020b; Rangel-Buitrago *et al.*, 2021), la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) (Garcés-Ordoñez *et al.*, 2019), el delta del río Atrato (Correa-Herrera *et al.*, 2017) y en organismos como peces (Calderón *et al.*, 2019; Garcés-Ordoñez *et al.*, 2020c). La línea de base de los microplásticos en aguas costeras del Caribe y el Pacífico colombiano fue trazada por Garcés-Ordoñez *et al.* (2021) y Vidal *et al.* (2021), con un especial énfasis en las aguas estuarinas de la bahía de Buenaventura; sin embargo, no se ha abordado la espacio-temporalidad de estos contaminantes, por lo que es importante conocer su cantidad, específicamente en la zona costera del departamento del Magdalena, que actúa como un laboratorio natural gracias a los aportes de ríos que atraviesan el país, sistemas cenagosos, y eventos de surgencia y actividad turística, portuaria e industrial, lo que permite un buen diagnóstico de lo que pasa en el mar Caribe colombiano, que dada su naturaleza semicerrada y la influencia de los centros urbanos, alberga grandes cantidades y una considerable variedad de residuos plásticos (Coe *et al.*, 1997).

La contaminación plástica es un tema de investigación prioritaria en el Caribe central colombiano, ya que estos contaminantes (Richard *et al.*, 2019) y microcontaminantes (Sun *et al.*, 2019) pueden tener un impacto negativo en los ecosistemas y comunidades asociadas. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue proporcionar bases científicas de la dinámica espacio-tiempo de los microplásticos en la zona marino-costera del departamento del Magdalena, como un aporte para la implementación futura de políticas y normativas sobre la disposición, manejo y sostenibilidad de los residuos plásticos en la idea de reducir su impacto en los ecosistemas marinos y costeros del país.

Materiales y métodos

Área de estudio

La plataforma continental del Magdalena en el sector central de la costa Caribe colombiana abarca la desembocadura del río Magdalena, el sistema lagunar CGSM, numerosas playas arenosas, la ensenada de Gaira y bahías abiertas de playas cortas como las de Santa Marta, Taganga y aquellas pertenecientes al Parque Nacional Natural Tayrona (PNNT) (Franco-Herrera, 2005). El clima de la región se caracteriza por la interacción de los tres tipos principales de circulación atmosférica que determinan los climas ecuatoriales o intertropicales: 1) la circulación primaria o ecuatorial, que se produce por la penetración más meridional de las masas aéreas provenientes de las altas presiones subtropicales del hemisferio norte, y coincide con el desplazamiento norte-sur de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) favorecida por la dominancia de los vientos alisios, los cuales adquieren en superficie su máxima expresión en intensidad; 2) la circulación regional en la temporada de huracanes y el movimiento meridional del sistema de monzones americanos y, 3) la circulación local generada por la interacción con el sistema orográfico de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), que se opone al paso de los alisios y hace que los flancos norte y noroeste queden en posición de barlovento resultando en una mayor nubosidad y precipitación (Mejía, 1989; Posada & Henao, 2008).

En la mayoría de las ciudades de la costa caribe del país, incluidas las de la región central, los anteriores procesos definen, en teoría, cuatro épocas climáticas: la época seca mayor (diciembre-abril), la lluviosa menor (mayo-junio), la seca menor (julio-agosto) y la lluviosa mayor (septiembre-noviembre), cuyas dinámicas meteorológicas y oceanográficas han sido descritas en **Franco-Herrera (2005)** y **Andrade (2015)**.

Teniendo en cuenta criterios como la mayor incidencia de las actividades turística, industrial y portuaria, el tráfico marino y la pesca artesanal, además de la influencia de aguas continentales provenientes de la descarga del emisario submarino, así como de diferentes ríos que cruzan zonas urbanas (Manzanares y Gaira), del río Magdalena y de la CGSM, la recolección de muestras se hizo en cuatro sectores: bahía de Taganga (TAG), bahía de Santa Marta (BSM), ensenada de Gaira (EG) o bahía del Rodadero y el sector de Pozos Colorados (PC) (**Figura 1**).

Trabajo de campo

Se hicieron cinco salidas durante las épocas climáticas mayores que se presentan en el Caribe colombiano, específicamente en noviembre del 2019 (lluviosa-LI) y febrero a marzo del 2020 (seca-Sc). La recolección de muestras se llevó a cabo en ocho estaciones; sin embargo, no se pudo acceder a la E8 durante el periodo seco debido a las condiciones climáticas y a la elevada velocidad de los vientos. En este proceso se empleó una red manta con boca rectangular de 25 x 100 cm y poro de 250 μm en la malla. Se efectuaron arrastres superficiales (0 a 25 cm) en zigzag durante 30 min a una velocidad de 2 a 3 kn, incluidos sectores cercanos y alejados de la costa, estos últimos ubicados entre 4 y 6 km de la línea costera (**Figura 1**), y siguiendo las recomendaciones del **GESAMP (2019)**. A la red se le acopló un flujómetro HydroBios® previamente calibrado para determinar el volumen filtrado (**Boltovskoy, 1981**).

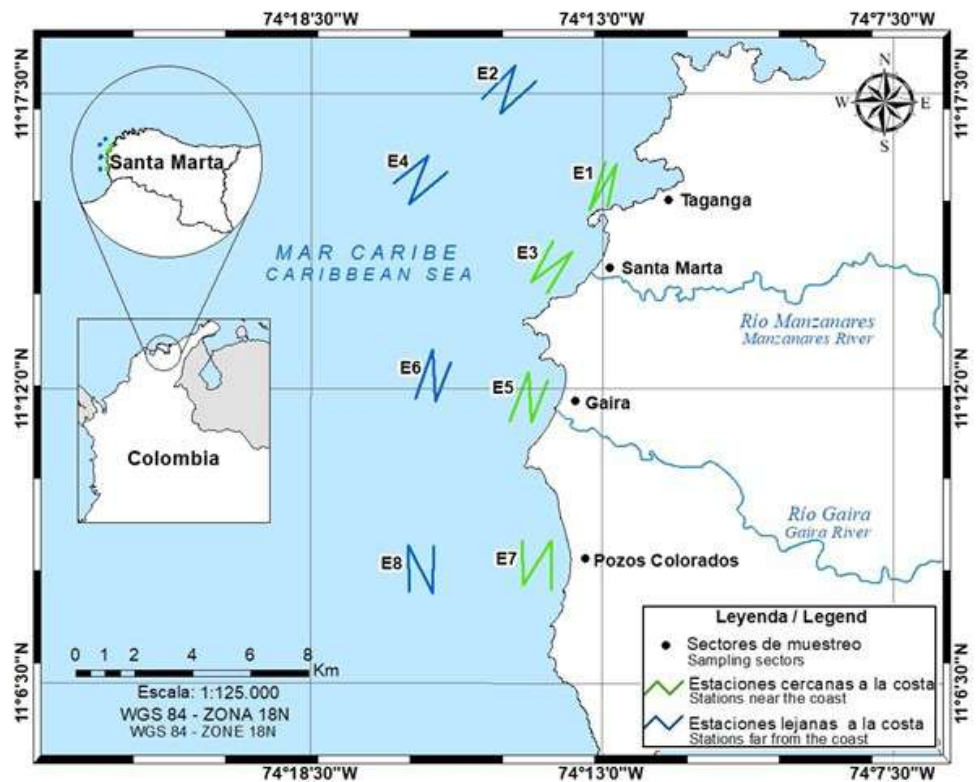


Figura 1. Distribución de las estaciones de muestreo a lo largo de la zona costera del departamento del Magdalena

La red se lavó con agua de mar filtrada a través de una malla de 250 μm , se concentró y se almacenó en recipientes de polietileno de alta densidad (PEAD Nalgene®) de 500 mL previamente lavados que se refrigeraron a 1 °C. Para descartar partículas plásticas provenientes de alguna fuente externa, se usaron dos procedimientos: 1) lavado de la red a mano con abundante agua desionizada, y 2) blanqueos del agua de mar usada para lavar la red en campo mediante filtración con un sistema secuencial de malla de 250 μm , carbón activado y filtro Whatman® GF/F (0,45 μm); se hicieron recircular 40 L de agua por la red en un laboratorio cerrado y aislado de corrientes de aire y se la lavo consistentemente, al igual que el copo recolector, durante 30 min para garantizar que no hubiese partículas de microplásticos y que las partículas recolectadas no provinieran de la red ni del agua de mar filtrada usada en campo. En cada estación se tomaron variables *in situ* de temperatura, salinidad, conductividad y pH empleando sondas multiparamétricas WTW® 3110 y un equipo Mettler Toledo® SG98, con el fin de medir las condiciones fisicoquímicas del agua requeridas para caracterizar la condición en cada época climática.

Trabajo de laboratorio

Uno de los problemas que introduce incertidumbre sobre los resultados es la contaminación de las muestras con microplásticos ajenos (Michida *et al.*, 2019). Para evitarla, se consideraron las recomendaciones del GESAMP (2019) en cuanto a evitar los flujos de aire, limpiar frecuentemente las superficies de trabajo, usar prendas de fibras naturales, así como guantes de nitrilo sin polvo. Además, se hicieron blanqueos por triplicado y en todas las etapas se trabajó con agua filtrada y desionizada proveniente de un filtro Milli-DI®.

Las muestras recolectadas se fraccionaron por la mitad (1/2) con un separador Folsom previamente calibrado (Boltovskoy, 1981). Una parte fue fijada con formalina al 4 % como contramuestra, en tanto que la fracción restante se lavó con agua desionizada y se tamizó (tamices metálicos de 5 mm, 500 μm y 250 μm); luego se separaron las partículas de menos de 5 mm y se establecieron dos subcategorías: las de >500 μm y las de <500 μm . Se recurrió a la digestión oxidativa a partir de la reacción de Fentom para eliminar la materia orgánica, separar los plásticos y facilitar su posterior clasificación (Correia *et al.*, 2019) siguiendo el procedimiento expuesto por Masura *et al.* (2015).

Los microplásticos se separaron y clasificaron con la ayuda del estereomicroscopio en las cinco categorías morfológicas (fragmentos, fibras, espumas, películas y *pellets*) propuestas inicialmente por Hidalgo-Ruz *et al.* (2012), y retomadas por el GESAMP (2019). Se siguieron las reglas planteadas por estos autores para evitar la identificación errónea, incluida la ausencia de estructuras celulares u orgánicas, la homogeneidad en el grosor de las fibras en toda su longitud y el color claro y homogéneo. Posteriormente, se hizo la prueba de la aguja caliente (Devriese *et al.*, 2015) acercando las partículas a esta para observar si se derretían o se retorcían.

Análisis de datos

Las épocas climáticas se corroboraron mediante un climograma que abarcó desde septiembre del 2019 a marzo del 2020 empleando el promedio mensual de la temperatura del aire y de la precipitación total, datos obtenidos de la estación climatológica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM ubicada en el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar de Santa Marta. La información con la que se elaboró la rosa de los vientos se procesó utilizando el programa WRPLOT View® 8.0.1 para los meses en que se llevó a cabo la recolección de las muestras.

Con los datos fisicoquímicos se elaboró un *draftsman plot* para detectar las posibles variables redundantes, es decir, aquellas que tuvieran una correlación mayor al 95 %. Se hizo un análisis de componentes principales (ACP) para observar las relaciones de las variables fisicoquímicas a partir de una matriz de distancias calculada con la distancia euclidiana e implementando 9.999 permutaciones (Clarke & Gorley, 2006).

Con el fin de expresar las abundancias en términos de partículas/m³ se tuvo en cuenta el tiempo efectivo de arrastre y el volumen filtrado, los cuales se determinaron con base en lo propuesto por Boltovskoy (1981). La información obtenida teniendo en cuenta los

tamaños, se consolidó en una matriz de densidad (partículas/m³). Antes de las comparaciones estadísticas se evaluó la naturaleza de los datos (normalidad y homogeneidad de varianzas), con el fin de determinar el tipo de estadística a utilizar. La normalidad se estimó con la prueba de Shapiro-Wilk y posteriormente se determinó la homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene. Como los datos no provinieron de una distribución normal ($p < 0,05$) y las varianzas presentaron heterocedasticidad ($p < 0,05$), se optó por la estadística no paramétrica. El análisis de las varianzas de la abundancia (densidad) de los microplásticos entre muestras se hizo con el programa estadístico PRIMER® (Plymouth Marine Laboratory, UK) utilizando la técnica PERMANOVA (Anderson *et al.*, 2008). Los datos no fueron transformados y se utilizaron 9.999 permutaciones; además, se empleó una prueba de Monte Carlo, que construye una distribución de permutaciones asintóticas para el valor del estadístico pseudo-F y permite un análisis sólido, incluso en el caso de que existan pocas permutaciones únicas posibles. Los factores comparados fueron: 1) “época”, fijado con dos niveles: lluviosa (Ll) y seca (Sc); 2) “tamaño”, fijado con dos factores: >500 μm y <500 μm ; 3) “sector”, fijado con cuatro niveles: bahía de Taganga (TAG), bahía de Santa Marta (SMT), ensenada de Gaira (EG) y Pozos Colorados (PC), y 4) “lejanía”, fijado con dos niveles: cercana a la costa (C) y alejada de la costa (AC).

Resultados

Variables fisicoquímicas

La temperatura presentó un promedio en Sc de $25,02 \pm 0,86$ °C, siendo menor en comparación con la de Ll, en donde fue de $28,73 \pm 1,07$ °C; por su parte la salinidad exhibió menor variación entre épocas climáticas, con $31,39 \pm 0,15$ en Ll y $32,42 \pm 0,52$ en Sc. El pH no cambió entre épocas y registró valores de $8,14 \pm 0,06$ en Ll y $8,14 \pm 0,04$ en Sc. El ACP permitió observar que los factores 1 y 2 explicaron el 96,3 % del total de la varianza de la matriz de datos, abarcando el primero el 63,50 %, con carga positiva para la temperatura y negativa para la salinidad (0,70 y -0,71, respectivamente), en tanto que el segundo explicó un 32,80 %. En general, se observó un patrón característico de las épocas climáticas de la región, con salinidades menores y temperaturas mayores durante Ll, reflejándose dicha diferencia en la conformación de agrupamientos individuales (Figura 2).

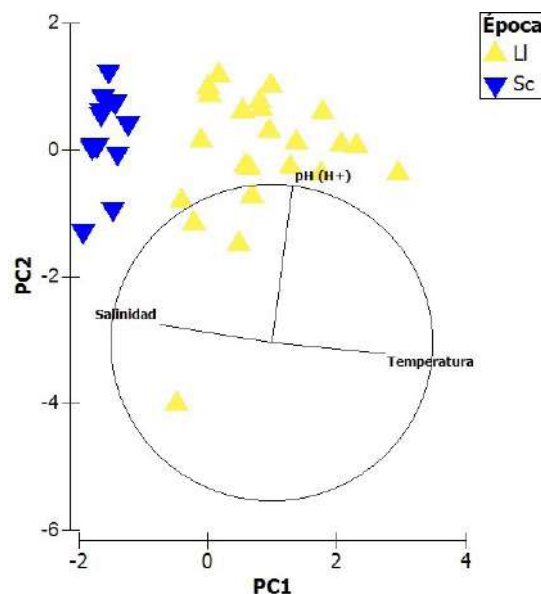


Figura 2. Análisis de componentes principales basado en la temperatura del agua, la salinidad y el pH en cada estación durante los muestreos en las dos épocas climáticas. La conductividad está incluida en el vector de salinidad, ya que presentaron una correlación del 99,01 %.

Datos meteorológicos

El climograma permitió definir que las precipitaciones más altas ocurrieron en septiembre (120 mm) y descendieron a su mínima expresión en febrero y marzo. La temperatura del aire no tuvo una variación amplia, ya que los valores registrados fluctuaron entre 29,40 °C y 29,04 °C (Figura 3), y no fue el factor determinante para caracterizar los periodos climáticos. En cuanto a los vientos, en noviembre dominaron los procedentes del norte (N), con un promedio de $1,71 \pm 1,14$ m/s, en tanto que en febrero y marzo prevalecieron los del noreste (NE), incrementándose a $3,09 \pm 2,37$ m/s (Figura 3). En ambos casos la mayor frecuencia fue la correspondiente al intervalo de 0,49-2,09 m/s (60,10 % y 43,90 %, respectivamente). Se mantuvo, entonces, la heterogeneidad en la escala temporal, con dos muestreos contrastantes de esta característica climatológica.

Microplásticos

Se recolectaron 35 muestras en las dos épocas climáticas (23 en Ll y 12 en Sc) y en todas se encontraron microplásticos, así como partículas de mesoplásticos y macroplásticos (Figura 4). Si bien se encontraron todas las categorías, las fibras no se consideraron en los resultados para evitar la sobreestimación de su abundancia, ya que en los blanqueamientos del trabajo de campo se encontraron en gran cantidad, es decir que provenían de la red manta. Entre las restantes categorías, la mayor cantidad correspondió a los fragmentos, en tanto que solo se encontraron dos partículas de tipo *pellet* en E1, una en cada época climática y para cada tamaño de partícula. Estas se tuvieron en cuenta en la determinación de las densidades, pero no en las comparaciones estadísticas dado su escaso número, el cual representaba <0,005 % comparado con el de las otras categorías morfológicas.

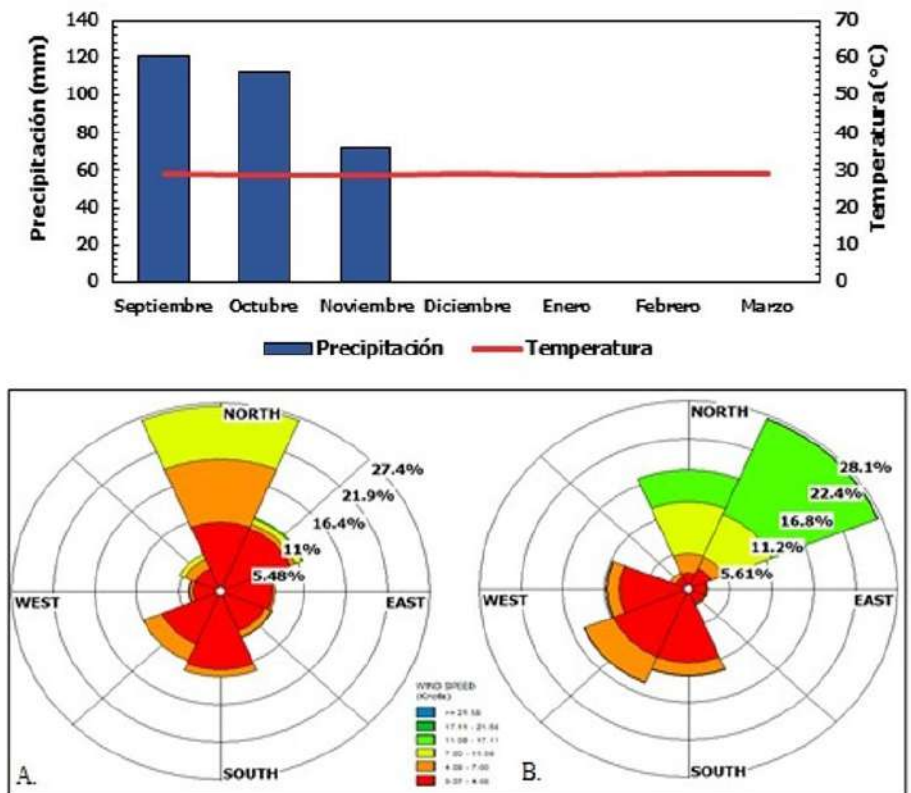


Figura 3. Climograma para la zona costera del departamento del Magdalena en el periodo entre septiembre del 2019 y marzo del 2020 y campos de vientos para la estación meteorológica del aeropuerto Simón Bolívar de la ciudad de Santa Marta en (A) noviembre del 2019 y (B) febrero y marzo del 2020

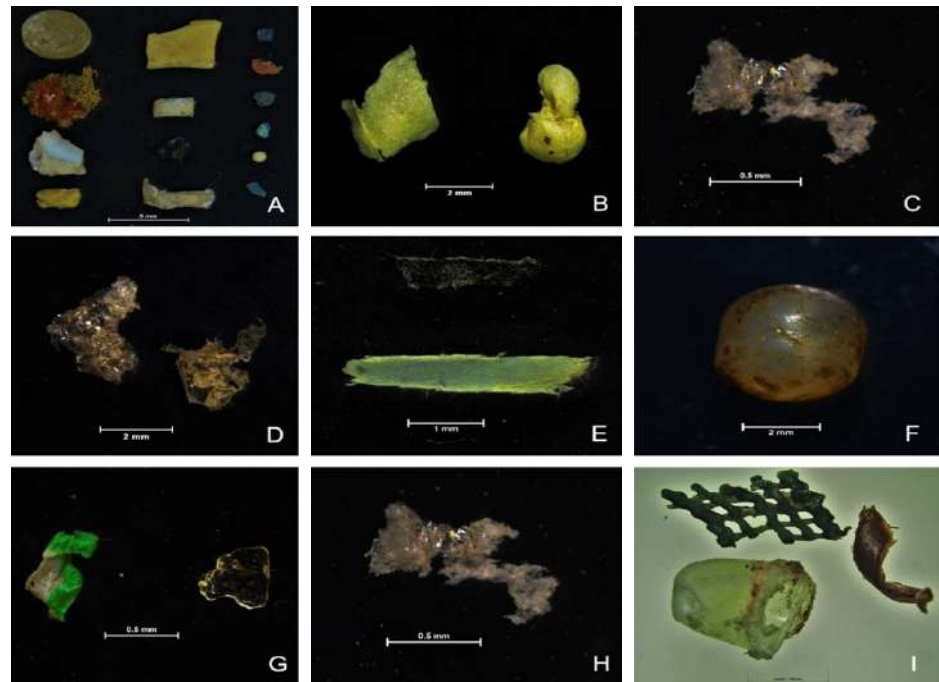


Figura 4. Microplásticos encontrados en las diferentes muestras. **A)** Fragmentos $>500 \mu\text{m}$ en E1; **B)** espumas $>500 \mu\text{m}$ en E1; **C)** espumas $<500 \mu\text{m}$ en E5; **D)** películas $>500 \mu\text{m}$ en E3; **E)** películas $<500 \mu\text{m}$ en E6; **F)** *pellets* $>500 \mu\text{m}$ en E1; **G)** películas $<500 \mu\text{m}$ en E1; **H)** espumas $<500 \mu\text{m}$ en E3; **I)** fragmentos de mesoplásticos $>5 \text{ mm}$ en E1

La densidad de partículas durante la época lluviosa varió entre 0,54 y 1,98 partículas/ m^3 , y se concentraron hacia el norte del área de estudio en las estaciones E1 y E3, ubicadas en los sectores costero de TAG y SMT, respectivamente, en tanto que los menores valores se presentaron hacia E2 en TAG, pero lejos de la costa. En la época seca la densidad disminuyó, fluctuando entre 0,13 y 0,87 partículas/ m^3 , con la mayor cantidad en los sectores costeros de TAG, SMT y EG (E1, E3 y E5, respectivamente), y disminuyó en estas mismas localidades en aquellas zonas alejadas de la costa (**Figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1578/3227>).

Durante la época de lluvias, las fracciones de $>500 \mu\text{m}$ totalizaron 5,55 partículas/ m^3 , siendo los fragmentos los de mayor cantidad, con 3,1 partículas/ m^3 . Cabe destacar que en esta época climática no se presentaron *pellets* en esta fracción. En todas las estaciones la mayor contribución correspondió a los fragmentos, exceptuando las E7 y E8, localizadas al sur del área de estudio en PC (**Tabla 1**). En el periodo seco se obtuvieron 2,16 partículas/ m^3 , y la mayor contribución también fue la de los fragmentos, con 1,23 partículas/ m^3 , lo que también se vio en las estaciones individuales, excepto en E4 y E5 (**Tabla 1**). La densidad de las fracciones de $<500 \mu\text{m}$ fue de 3,65 partículas/ m^3 durante las lluvias y de 0,86 partículas/ m^3 en época seca, siendo menor a la registrada por las partículas más grandes; los fragmentos volvieron a encontrarse en mayor cantidad, con 2,3 y 0,67 partículas/ m^3 , respectivamente (**Tabla 1**).

Hubo diferencias significativas en la densidad entre las épocas climáticas, especialmente debido a los altos niveles de lluvia. Asimismo, se encontraron diferencias para el factor de la “talla” debidas a la gran cantidad de partículas mayores a $500 \mu\text{m}$. A pesar de las variaciones numéricas entre algunas estaciones, como fue el caso de E1 de la región costera, con densidades particularmente elevadas en las dos épocas climáticas, o las densidades bajas de la época seca en las estaciones alejadas de la costa, los factores de “sector” y “lejanía” no fueron diferentes (**Tabla 2**).

Discusión de resultados

Las variables fisicoquímicas y la información climatológica tuvieron un comportamiento característico en las épocas lluviosa y seca mayores en el Caribe central colombiano, relacionado con el incremento en la temperatura superficial del agua en la primera y un aumento de la salinidad, así como la intensificación de los vientos, en la segunda, lo que concuerda con lo reportado en múltiples estudios (**Bastidas-Salamanca *et al.*, 2016; Sarmiento-Pérez *et al.*, 2018; Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - CIOH, 2020**), y confirma que las muestras fueron recolectadas bajo condiciones oceánicas y atmosféricas contrastantes.

Las densidades de microplásticos registradas están por debajo de las reportadas en el mar Negro, en el estuario del río Perlas en Hong Kong o en el norte del golfo de México y Jamaica (**Tabla 3**); en dichos casos la presencia de estos materiales se asoció con la descarga de residuos municipales e industriales, a lo que se suma el carácter semicerrado de algunas cuencas como la del mar Negro. A nivel local, a pesar de que se integraron las dos tallas consideradas (< 500 μm y > 500 μm), los valores del presente estudio fueron

Tabla 1. Densidades de microplásticos (partículas/m³) en las estaciones por época climática considerando las diferentes categorías y tallas

	>500 μm									
	Época lluviosa					Época seca				
	Fragmentos	Espumas	Películas	<i>Pellets</i>	Σ	Fragmentos	Espumas	Películas	<i>Pellets</i>	Σ
E1	0,66	0,35	0,21	0,00	1,22	0,51	0,05	0,15	0,005	0,71
E2	0,13	0,01	0,10	0,00	0,24	0,11	0,02	0,05	0,00	0,19
E3	0,66	0,10	0,07	0,00	0,83	0,14	0,06	0,08	0,00	0,28
E4	0,38	0,04	0,16	0,00	0,58	0,07	0,01	0,11	0,00	0,19
E5	0,23	0,03	0,19	0,00	0,46	0,18	0,23	0,06	0,00	0,46
E6	0,45	0,14	0,15	0,00	0,74	0,14	0,07	0,02	0,00	0,23
E7	0,23	0,01	0,46	0,00	0,70	0,08	0,00	0,02	0,00	0,10
E8	0,36	0,05	0,38	0,00	0,79	--	--	--	--	--
Media	0,39	0,09	0,21	0,00	0,69	0,18	0,06	0,07	0,0007	0,31
σ	0,20	0,11	0,14	0,00	0,29	0,15	0,08	0,05	0,002	0,21
Σ	3,10	0,74	1,71	0,00	5,55	1,23	0,44	0,49	0,005	2,16
	<500 μm									
	Fragmentos	Espumas	Películas	<i>Pellets</i>	Σ	Fragmentos	Espumas	Películas	<i>Pellets</i>	Σ
	E1	0,50	0,07	0,19	0,004	0,76	0,14	0,01	0,01	0,00
E2	0,20	0,01	0,09	0,00	0,30	0,16	0,00	0,01	0,00	0,17
E3	0,51	0,00	0,13	0,00	0,64	0,11	0,02	0,04	0,00	0,16
E4	0,14	0,00	0,17	0,00	0,30	0,09	0,01	0,02	0,00	0,12
E5	0,22	0,00	0,13	0,00	0,34	0,13	0,02	0,04	0,00	0,19
E6	0,19	0,01	0,20	0,00	0,39	0,02	0,00	0,01	0,00	0,04
E7	0,27	0,00	0,19	0,00	0,46	0,02	0,00	0,01	0,00	0,03
E8	0,28	0,01	0,14	0,00	0,43	--	--	--	--	--
Media	0,29	0,01	0,16	0,0005	0,46	0,10	0,01	0,02	0,00	0,12
σ	0,14	0,02	0,04	0,002	0,17	0,06	0,01	0,01	0,00	0,07
Σ	2,30	0,11	1,24	0,004	3,65	0,67	0,05	0,14	0,00	0,86

--: no muestreadas

inferiores a los reportados por **Garcés-Ordoñez et al.** (2021), quienes plantean que tales cantidades responden al mal manejo de los residuos sólidos y la incidencia de las aguas servidas generadas por actividades socioeconómicas y domésticas, en este caso, de la ciudad de Santa Marta (**Tabla 3**). La presencia de microplásticos en aguas costeras y alejadas de las costas del departamento de Magdalena era de esperarse, si se tiene en cuenta que estas partículas se distribuyen extensamente en todo el planeta. No obstante, la comparación entre estudios dista de ser objetiva dada la falta de estandarización de las metodologías (**Wang & Wang, 2018; Correia et al., 2019; Kutralam-Muniasamy et al., 2020**), incluidos aspectos como el tamaño del poro de la red (**Ryan et al., 2020; Tokai et al., 2021**) y la disminución exponencial de las concentraciones cuando el tamaño de la malla es mayor, lo que subestima la abundancia de partículas más pequeñas (**Covernton et al., 2019; Lindeque et al., 2020**). Por ende, una comparación directa con fuentes globales

Tabla 2. Resultados de la prueba PERMANOVA en las 35 muestras (23 Ll y 12 Sc) a partir de la matriz de semejanzas calculada con base en el coeficiente de Bray-Curtis para la densidad (partículas/m³) empleando la suma de cuadrados de tipo III con 9.999 permutaciones

Factor	g.l.	SC	Pseudo-F	P(perm)
partículas/m³				
Época	1	4407,6	3,32	0,02*
Sector	3	2310,9	0,58	0,86
Lejanía	1	92,06	6,94x10 ⁻²	0,97
Talla	1	5560,8	4,19	<0,01*

g.l.: grados de libertad; SC: suma de cuadrados; * Diferencias significativas (P(perm) <0,05)

Tabla 3. Densidades de microplásticos alrededor del mundo

Localidad	Tamaño de poro (µm)	Tamaño de partículas	Intervalo de densidad (partículas/m ³)	Referencia
Pacífico noreste	505	5 mm-505 µm	0,004-0,19	Doyle et al. (2011)
Mediterráneo centro-occidental	500	5 mm-500 µm	0,01-0,35	de Lucia et al. (2014)
Ártico	333	7,71 mm-250 µm	0,0-1,31	Lusher et al. (2015)
Mar Negro	200	0,2-500 µm	106-3280	Aytan et al. (2016)
Norte del golfo de México	335	5 mm-335 µm	4,8-18,4	di Mauro et al. (2017)
Estuario del río Perlas (Hong Kong)	333	0,355-4,749 mm	0,16-6,93	Cheung et al. (2018)
Golfo de Omán	333	5 mm-100 µm	0,07-1,14	Aliabad et al. (2019)
Puerto de Kingston (Jamaica)	335	5 mm-335 µm	0,0-5,73	Rose & Webber (2019)
Bahía de Santa Marta	500	5 mm-500 µm	0,01-8,96	Garcés-Ordoñez et al. (2021)
Caribe central colombiano	250	>500 µm	Lluvia 0,24-1,22 Seca 0,10-0,71	Presente estudio
		<500 µm	Lluvia 0,30-0,76 Seca 0,03-0,19	

y otras locales no proporciona un contraste claro, aunque sí evidencia que el problema no se circunscribe a la presencia de este material en el agua, sino que puede extenderse a los sedimentos (Cole *et al.*, 2011), organismos y ecosistemas (INVEMAR, 2017).

En varios estudios se asocia una mayor carga de microplásticos con el aporte de agua continental a través de la desembocadura de ríos o por escorrentía, por lo que la presencia de estas partículas en todas las muestras analizadas es indicativa del efecto de tales descargas, indistintamente de la época climática. El Caribe central colombiano presenta influencia de los ríos Córdoba, Toribio, Manzanares y Gaira, aunque con marcadas diferencias en cuanto al aporte, ya que el Manzanares tiene un caudal que fluctúa entre 1,88 y 8,46 m³/s y disminuye en marzo a un rango entre 0,02 a 1,12 m³/s (INVEMAR, 2008), en tanto que el del Gaira a la altura del corregimiento de Minca es, en promedio, de 2,7 m³/s (Gutiérrez *et al.*, 2017). Ambas cuencas presentan deterioro en las condiciones naturales de sus cauces y solo en la sección alta predominan los espacios naturales intercalados con áreas de cultivos permanentes y agroforestales, en tanto que en las partes media y baja, los asentamientos urbanos son frecuentes, se pierde parte de la cobertura vegetal original, y hay una mala disposición de desechos sólidos y líquidos (Plata e Ibarra, 2016), lo que lo convierte en una fuente potencial de microplásticos.

Estos dos ríos no son las únicas fuentes potenciales de partículas. Al estar hechos de una amplia variedad de polímeros con densidades y características diferentes, los plásticos se encuentran a lo largo de toda la columna de agua y son transportados largas distancias debido a la acción de corrientes y vientos (United Nations Environment Programme-UNEP, 2016). Durante las dos épocas climáticas se presentaron vientos dominantes del N y NE que podrían acarrear microplásticos del norte de Colombia, ya sea por vía aérea o por efecto de la circulación hacia el oeste de la corriente del Caribe. En las playas de Riohacha en La Guajira, Acosta-Coley *et al.* (2019b) encontraron valores cercanos a cero durante todo el año, por lo que la consideraron libre de estos residuos y propusieron como causa la fuerte influencia de las corrientes y los vientos en ese departamento, los cuales alejarían las partículas que podrían asentarse en las playas o aguas costeras hacia el SO y alcanzarían nuestra área de estudio.

Tampoco pueden descartarse como fuente de microplásticos las descargas directas provenientes del río Magdalena y de sistemas estuarinos cercanos, como es el caso de la CGSM, cuyas aguas son una mezcla de aguas del río Magdalena y de los ríos del margen occidental de la SNSM (Wiedemann, 1973). Sus desembocaduras distan 60 y 19 km del área de estudio, respectivamente, pudiendo incidir en su plataforma continental, en especial durante la época de lluvia, como consecuencia del acarreo mediante la contracorriente correspondiente al brazo costero del giro ciclónico Panamá-Colombia (GCPC) descrita por Andrade *et al.* (2003), que puede alcanzar en noviembre las aguas costeras de los departamentos de Magdalena y La Guajira debido al debilitamiento de los vientos alisios (Ricaurte-Villota & Bastidas, 2017) y al fortalecimiento de los vientos húmedos provenientes del SO (Mancera-Pineda *et al.*, 2013). Según Lebreton *et al.* (2017), este río ocupa el puesto 17 a nivel mundial en cuanto al aporte de residuos plásticos al océano, es el segundo de América Latina después del Amazonas y el primero de todo el Caribe, con una estimación de 167.000 t/año. Ahora bien, las corrientes locales asociadas a la zona costera de Pozos Colorados y la ensenada de Gaira favorecen la llegada de los microplásticos desde estas fuentes de agua dulce, pues se han descrito corrientes costa adentro con dirección N y NE que ingresan a estas bahías a través de Punta Gloria y de Punta Gaira y generan giros ciclónicos de microescala que ayudan a concentrar los microplásticos en sus cuerpos de agua (Franco-Herrera, 2005; Pinto, 2005).

Además del impacto de la dinámica hidrológica en el aporte de microplásticos al sistema costero, las variaciones en la intensidad del viento pueden favorecer también la acumulación de estos compuestos en el agua. Schönlau *et al.* (2020) han demostrado la existencia de una correlación negativa entre la velocidad del viento y la concentración de microplásticos catalogados como flotantes, lo que determina que en los periodos con

menor intensidad del viento se encuentre una mayor cantidad de partículas y concuerda con lo reportado en el presente estudio. A lo anterior se suma que, aunque se presentan vientos dominantes del N y NE a lo largo del ciclo de 24 h, éstos pueden variar en dirección e intensidad a causa de la denominada brisa de mar, que acumularía estas partículas en las aguas costeras del departamento, en especial durante días soleados o en temporadas cálidas, cuando la temperatura de la tierra es generalmente más alta que la del agua (**IDEAM & UPME, 2016**).

La distribución temporal de los microplásticos se ha abordado en diversos estudios que asocian una mayor carga con el aporte de agua continental a través de la desembocadura de ríos o por escorrentía, como lo constataron **Eo et al. (2019)** en el río Nakdong, principal río de Corea del Sur, y **Cheung et al. (2018)** en la bahía de Hong Kong; en este último caso, se obtuvo una abundancia promedio más alta en la temporada de lluvias. En el Caribe, la incidencia de los huracanes, que puede extenderse desde junio hasta noviembre, aumenta significativamente la cantidad de estas partículas como lo observaron **Pelamatti et al. (2019)** en la bahía de Banderas (México). Ello reafirma que la precipitación puede desempeñar un papel importante al lavar la superficie terrestre y transportar y descargar estas partículas terrígenas en los océanos (**Rech et al., 2014**).

Otra fuente son los propios microplásticos que se acumulan durante los periodos secos en los sedimentos de los ríos, los cuales actúan como sumideros de este material (**Leslie et al., 2017; Hurley et al., 2018; Nel et al., 2018**) y luego lo arrastran durante los periodos de inundación, cuando grandes cantidades de agua son drenadas a través de las cuencas causando un mayor flujo, lo que puede ocasionar un aumento en las concentraciones debido al reflote de las partículas (**Eo et al., 2019**). **Hale et al. (2020)** sugirieron que los cuerpos de agua costeros (bahías y estuarios) están incluso más contaminados que los ríos debido a las múltiples fuentes de entrada y a los patrones de circulación en estas cuencas semicerradas, así como a la cercanía de centros urbanos con múltiples actividades antropogénicas como la industria, el turismo, la pesca y el transporte marítimo.

Los resultados obtenidos en el presente estudio aportan más evidencia sobre la ubicuidad de la basura plástica en el Caribe central colombiano, como lo constataron también **Garcés-Ordoñez et al. (2019)** en la CGSM, **Garcés-Ordoñez et al. (2020b)** en distintas playas de la ciudad de Santa Marta y el PNNT y **Garcés-Ordoñez et al. (2021)** con plásticos flotantes a lo largo del Caribe y el Pacífico colombianos. En múltiples trabajos se ha estudiado la distribución espacial de plásticos en diferentes ambientes marinos y costeros, con resultados que dependen de las condiciones geográficas, climáticas y oceanográficas del lugar. En el golfo de Oristano (Mediterráneo centro-occidental), **de Lucia et al. (2014)** determinaron diferencias significativas en las densidades de microplásticos en estaciones dentro y fuera del golfo, con gran variación espacial entre estaciones, siendo más abundantes en los puntos alejados de la costa. Por otra parte, contrario a su hipótesis inicial, **Cheung et al. (2018)** no encontraron diferencias espaciales entre las estaciones al este y el oeste de la bahía de Hong Kong, lo que atribuyeron en parte a la escorrentía del estuario del río Perlas y a la intensa actividad humana.

El Caribe central colombiano se encuentra sometido a una gran presión antrópica por las múltiples actividades que se desarrollan en la región (portuaria, tránsito marítimo, turismo, desarrollo urbano, pesca artesanal, disposición de aguas servidas, entre otras) y que son una fuente continua de contaminación plástica por la mala gestión y el indebido manejo y disposición de estos residuos en el ambiente (**GESAMP, 2019; Díaz-Mendoza et al., 2020**). En este sentido, las regiones de alta densidad poblacional y las áreas industriales son los puntos más críticos (**Barboza et al., 2018**); de hecho, cerca del 65 % de los residuos sólidos y el 100 % de las aguas residuales domésticas de las poblaciones costeras colombianas no se gestionan adecuadamente y muchos de estos desechos se vierten directamente en los cuerpos de aguas naturales (**Garcés-Ordoñez et al., 2021**).

En este contexto, el 99,9 % de las partículas recolectadas en nuestro estudio fueron plásticos de origen secundario, presentes en las categorías de fragmentos, espumas y películas, lo que sugiere que provienen de objetos o partículas con un tamaño mayor a

5 mm que son fragmentadas por acción de la fotooxidación, la acción mecánica y la biodegradación (Gewert *et al.*, 2015; Song *et al.*, 2017; Julienne *et al.*, 2019). Steensgaard *et al.* (2017) indicaron que existe una alta probabilidad de que la mayor parte de los residuos plásticos que no tienen una buena disposición final terminen en el mar como basura marina y que sus partículas eventualmente sean dispersadas por vientos y corrientes (Ajith *et al.*, 2020); de hecho, Lebreton & Andrady (2019) demostraron mediante proyecciones que la mayoría de los residuos plásticos mal gestionados (91 %) se transportan a través de cuencas hidrográficas de más de 100 km², lo que sugiere que los ríos son vías importantes de llegada de la basura plástica al océano.

Los cuatro sectores de muestreo se encuentran influenciados directa e indirectamente por los mecanismos y factores ya mencionados: ríos, corrientes, vientos y alta actividad antropogénica. En BT, donde se ubicó la estación E1, hubo la mayor abundancia de microplásticos en las dos épocas climáticas, lo que sugiere que la presencia del emisario submarino en este sector podría ser un importante vector de descarga de partículas tanto macroplásticas como microplásticas, pues se encuentra a una profundidad aproximada de 49 m. También cabe recalcar que las aguas negras vertidas por este canal tienen un tratamiento elemental y se carece de una planta de tratamiento residual, como sucede en otras partes del mundo (Horton *et al.*, 2017; Ferreira *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Naji *et al.*, 2021). La pluma del emisario tiene periodos alternos de atrapamiento en la columna de agua y llega a la superficie en condiciones de surgencia cuando no hay estratificación (García *et al.*, 2013); a pesar de que la pluma no aflore todo el año, es muy probable que los materiales poco densos (polietileno y polipropileno) puedan vencer dicha estratificación y llegar a la superficie. Sin embargo, otra fuente de microplásticos en BT puede ser la actividad turística que se lleva a cabo en la playa principal del corregimiento de Taganga, en Playa Grande (Pupo-García, 2012), o la misma actividad pesquera de la zona (Barros & Manjarrés, 2004; Acevedo-Mendivelso *et al.*, 2020).

Cabe recalcar que el aporte continuo de basura plástica por el emisario submarino y los ríos Manzanares y Gaira, sumado a la actividad marítima y principalmente turística en los cuatro sectores de muestreo a lo largo del año y a la acción de los vientos y las corrientes (Law *et al.*, 2010), provoque su sinergia y explique la relativa homogeneidad espacial observada en este estudio en cuanto a la contribución continua de contaminantes y su eventual dispersión.

Aunque las fuentes de la contaminación plástica marina ya están bien determinadas, el conocimiento de su contribución relativa y su distribución geográfica es limitado. La carencia de estudios que describan a profundidad la dinámica de las corrientes locales, la falta de implementación de modelos oceanográficos que permitan una mejor visión de los datos, y el hecho de que estas partículas son transportadas pasivamente por complejos flujos físicos bidimensionales y tridimensionales, resultan en la alta variabilidad de las concentraciones superficiales, lo que dificulta la comprensión de la distribución espacial de las partículas plásticas y hace que las tendencias sean difíciles de discernir (Goldstein *et al.*, 2013; Law & Thompson, 2014).

Conclusiones

Las épocas climáticas difirieron en cuanto a las densidades de microplásticos observadas, con mayores valores durante la época de lluvias. Si bien no es posible especificar la fuente de estas partículas, el hecho podría relacionarse directamente con el aumento de las escorrentías de los ríos Manzanares y Gaira e, indirectamente, con la influencia de la contracorriente Panamá-Colombia que presenta su máxima expresión en aguas del Caribe colombiano durante esta época y acarrea partículas provenientes del río Magdalena y la CGSM. A estas fuentes se deben sumar los vertimientos a través del emisario submarino de Santa Marta que, indistintamente de la época, vierte aguas servidas con microplásticos en las aguas del departamento. Entre las tallas consideradas se presentaron diferencias significativas a causa de la mayor abundancia de las más grandes independientemente

de la época climática. La más alta contribución fue la de los fragmentos, con contadas excepciones, pues el rompimiento de macroplásticos genera fracciones de $>500\ \mu\text{m}$ que dan origen, a su vez, a las de $<500\ \mu\text{m}$, intensificando así el problema con la presencia de macroplásticos.

Información suplementaria

Ver información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1578/3227>

Agradecimientos

A la Universidad de Bogotá “Jorge Tadeo Lozano” por la financiación del proyecto (código 900-17-18); a Alfonso Gamero, Andrés Navarro, Juan Díaz y Mario Correal por su colaboración en el trabajo de campo y laboratorio, y a Alexandra Hernández por el trabajo en los sistemas de información geográfica.

Contribución de los autores

AFH: aportó en la estructuración de la investigación, así como en la descripción de los resultados y los análisis de la información recolectada; PIPZ: contribuyó en la formulación del proyecto de investigación, en especial en el diseño metodológico de campo y el análisis de las muestras en laboratorio; CDOR y PCTB: lideraron la elaboración de la red manta, las campañas de los muestreos de campo, el procesamiento de las muestras en el laboratorio, así como el análisis de la información integrada. Todos los autores colaboraron en la escritura del manuscrito.

Referencias

- Acevedo-Mendivelso, A.F., Cuello, F., Altamar, J.** (2020). Cambios históricos en el esfuerzo pesquero de la flota parguera de Taganga, Caribe colombiano. *Revista Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales Actualidad y Divulgación Científica*, 23(2), e1200. <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1200>.
- ACOPLÁSTICOS.** (2020). Plásticos en Colombia 2020-2021 (plásticos-química-petroquímica-cauchos-pinturas-tintas-fibras). Bogotá. Colombia. ACOPLÁSTICOS.
- Acosta-Coley, I. & Olivero-Verbel, J.** (2015). Microplastic resin pellets on an urban tropical beach in Colombia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, 435-447. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4602-7>.
- Acosta-Coley, I., Méndez-Cuadro, D., Rodríguez-Cavallo, E., de la Rosa, J., Olivero-Verbel, J.** (2019a). Trace elements in microplastics in Cartagena: A hotspot for plastic pollution at the Caribbean. *Marine Pollution Bulletin*, 139, 402-411. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.12.016>.
- Acosta-Coley, I., Durán-Izquierdo, M., Rodríguez-Cavallo, E., Mercado-Camargo, J., Méndez-Cuadro, D., Olivero-Verbel, J.** (2019b). Quantification of microplastics along the Caribbean coastline of Colombia: Pollution profile and biological effects on *Caenorhabditis elegans*. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 574-583. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.084>
- Ajith, N., Arumugam, S., Parthasarathy, S., Manupoori, S., Janakiraman, S.** (2020). Global distribution of microplastics and its impact on marine environment a review. *Environmental Sciences Pollution Research*, 27, 25970-25986. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09015-5>
- Aliabad, M.K., Nassiri, M., Kor, K.** (2019). Microplastics in the surface seawaters of Chabahar Bay, Gulf of Oman (Makran coasts). *Marine Pollution Bulletin*, 143, 125-133. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-021-13723-x>
- Anderson, M.J., Gorley, R.N., Clarke, K.R.** (2008). PERMANOVA⁺ for PRIMER: Guide to Software and Statistical Methods. PRIMER-E, Plymouth, UK, 193 p.
- Andrade, C.A., Barton, E.D., Mooers, C.N.** (2003). Evidence for an eastward flow along the Central and South American Caribbean coast. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 108 (C6), 1-16. <https://doi.org/10.1029/2002JC001549>
- Andrade, C.A.** (2015). Oceanografía dinámica de la cuenca de Colombia. Cartagena. Colombia. Alpha Editores, 205 p

- Aytan, U., Valente, A., Senturk, Y., Usta, R., Esensoy, S.F., Evren, M.R., Agirbas, E. (2016). First evaluation of neustonic microplastics in Black Sea waters. *Marine Environmental Research*, 119, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.05.009>
- Barboza, L.G.A., Vieira, L.R., Branco, V., Carvalho, C., Guilhermino, L. (2018). Microplastics increase mercury bioconcentration in gills and bioaccumulation in the liver and cause oxidative stress and damage in *Dicentrarchus labrax* juveniles. *Scientific Reports*, 8, 15655. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34125-z>
- Barnes, D.K.A., Galgani, F., Thompson, R., Barlaz, M.A. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364, 1985-1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Barros, M. & Manjarrés, L. (2004). Recursos pesqueros explotados por las pesquerías artesanales marítimas del sector Taganga-La Jorará (Dpto. del Magdalena), con énfasis en peces demersales. En: Manjarrés, L. (Ed). *Pesquerías demersales del área norte del mar Caribe de Colombia y parámetros biológico-pesqueros y poblacionales del recurso pargo*. Universidad del Magdalena, Santa Marta. p. 93-94.
- Basseling, E., Redondo-Hasselerharm, P., Foekema, E.M., Koelmans, A.A. (2019). Quantifying ecological risks of aquatic micro-and nanoplastic. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(1), 32-80. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1531688>
- Bastidas-Salamanca, M.L., Ordóñez-Zúñiga, S.A., Villota, C.R. (2016). Events of wind intensification and relaxation in the Bay of Santa Marta (Colombian Caribbean): Oceanographic implications. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 45(2), 181-196.
- Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (Eds). (2015). *Marine anthropogenic litter*. New York. USA. Springer. 447p.
- Boltovskoy, D. (1981). *Atlas del zooplancton del Atlántico Sudoccidental y métodos de trabajo con el zooplancton marino*. Mar del Plata. Argentina. Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero. 935p.
- Calderón, E.A., Hansen, P., Rodríguez, A., Blettler, M.C., Syberg, K., Khan, F.R. (2019). Microplastics in the digestive tracts of four fish species from the Ciénaga Grande de Santa Marta Estuary in Colombia. *Water, Air and Soil Pollution*, 230(11), 230-257. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4313-8>
- Carpenter, E.J. & Smith, K.L. (1972). Plastics on the Sargasso sea surface. *Science*, 175(4027), 1240-1241. <https://doi.org/10.1126/science.175.4027.1240>
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - CIOH. (2020). *Climatología de los principales puertos del Caribe colombiano-Santa Marta*. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. Dirección General Marítima. Cartagena. Colombia. Fecha de consulta: abril 6 de 2020. Disponible en: https://www.cioh.org.co/derrotero/images/PDFExternos/Climatologia_SantaMarta.pdf
- Cheung, P.K., Fok, L., Hung, P.L., Cheung, L.T. (2018). Spatio-temporal comparison of neustonic microplastic density in Hong Kong waters under the influence of the Pearl River Estuary. *The Science of the Total Environment*, 628, 731-739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.338>
- Clarke, K.R. & Gorley, R.N. (2006). *Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation*. Plymouth. UK. 2nd edition. PRIMER-E Ltd. 175p.
- Coe, J.M., Anderson, S., Rogers, D.B. (1997). Marine debris in the Caribbean region. En: Coe J.M., y Rogers. D.B. (Eds.). *Marine debris sources impacts and solutions*. New York. USA. Springer. 135p
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., Galloway, T.S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 2588-2597.
- Colton, J.B., Knapp, F.D., Burns, B.R. (1974). Plastic particles in surface waters of the northwestern Atlantic. *Science*, 185(4150), 491-497. <https://doi.org/10.1126/science.185.4150.491>
- Correa-Herrera, T., Barletta, M., Lima, A.R.A., Jiménez-Segura, L.F., Arango-Sánchez, L.B. (2017). Spatial distribution and seasonality of ichthyoplankton and anthropogenic debris in a river delta in the Caribbean Sea. *Journal of Fish Biology*, 90(4), 1356-1387. <https://doi.org/10.1111/jfb.13243>
- Correia, P.J.C., da Costa, J.P., Duarte, A.C., Rocha-Santos, T. (2019). Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: a critical review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 110, 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.029>
- Covernton, G.A., Pearce, C.M., Gurney-Smith, H.J., Chastain, S.G., Ross, P.S., Dower, J.F., Dudas, S.E. (2019). Size and shape matter: a preliminary analysis of microplastic sampling technique in seawater studies with implications for ecological risk assessment. *The Science of the Total Environment*, 667, 124-132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.346>

- Cózar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J.I., Irigoien, X., Úbeda, B., Hernández-León, S., Palma, A.T., Navarro, S., García-de-Lomas, J., Ruiz, A., Fernández-de-Puelles, M.L., Duarte, C.M. (2014). Plastic debris in the open ocean. *The Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(28), 10239-10244. <https://doi.org/10.1073/pnas.1314705111>
- Davarpanah, E. & Guilhermino, L. (2019). Are gold nanoparticles and microplastics mixtures more toxic to the marine microalgae *Tetraselmis chuii* than the substances individually? *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 181, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.078>
- de Lucia, G.A., Caliani, I., Marra, S., Camedda, A., Coppa, S., Alcaro, L., Campani, T., Giannetti, M., Coppola, D., Cicero, A.M., Panti, C., Bainsi, M., Guerranti, C., Marsili, L., Massaro, G., Fossi, M.C., Matiddi, M. (2014). Amount and distribution of neustonic micro-plastic off the western Sardinian coast (Central-Western Mediterranean Sea). *Marine Environmental Research*, 100, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2014.03.017>
- Devriese, L.I., van der Meulen, M.D., Maes, T., Bekaert, K., Paul-Pont, I., Frère, L., Vethaak, A.D. (2015). Microplastic contamination in brown shrimp (*Crangon crangon*, Linnaeus 1758) from coastal waters of the Southern North Sea and Channel area. *Marine Pollution Bulletin*, 98(1-2), 179-187. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.06.051>
- di Mauro, R., Kupchik, M.J., Benfield, M.C. (2017). Abundant plankton-sized microplastic particles in shelf waters of the northern Gulf of Mexico. *Environmental Pollution*, 230, 798-809. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.030>
- Díaz-Mendoza, C., Mouthon-Bello, J., Pérez-Herrera, N.L., Escobar-Díaz, S.M. (2020). Plastics and microplastics, effects on marine coastal areas: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10394-y>
- Doyle, M.J., Watson, W., Bowlin, N.M., Sheavly, S.B. (2011). Plastic particles in coastal pelagic ecosystems of the Northeast Pacific Ocean. *Marine Environmental Research*, 71(1), 41-52. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2010.10.001>
- Eo, S., Hong, S.H., Song, Y.K., Han, G.M., Shim, W.J. (2019). Spatiotemporal distribution and annual load of microplastics in the Nakdong river, South Korea. *Water Research*, 160, 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.053>
- Eriksen, M., Maximenko, N.A., Thie, I.M., Cummins, A., Lattin, G., Wilson, S., Hafner, J., Zeller, A.F., y Rifman, S. (2013). Plastic pollution in the South Pacific Subtropical Gyre. *Marine Pollution Bulletin*, 68, 71-76. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.12.021>
- Everaert, G., van Cauwenberghe, L., de Rijcke, M., Koelmans, A.A., Mees, J., Vandegehuchte, M., Janssen, C.R. (2018). Risk assessment of microplastics in the ocean: modelling approach and first conclusions. *Environmental Pollution*, 242, 1930-1938. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.069>
- Everaert, G., de Rijcke, M., Lonneville, B., Janssen, C.R., Backhaus, T., Mees, J., van Sebille, E., Koelmans, A.A., Catarino, A.I., Vandegehuchte, M.B. (2020). Risks of floating microplastic in the global ocean. *Environmental Pollution*, 267, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115499>
- Ferreira, P., Fonteá, E., Soares, M.E., Carvalho, F., Guilhermino, L. (2016). Effects of multi-stressors on juveniles of the marine fish *Pomatoschistus microps*: gold nanoparticles, microplastics and temperature. *Aquatic Toxicology* 170, 89-103. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2015.11.011>
- Ferreira, M., Thompson, J., Paris, A., Rohindra, D., Rico, C. (2020). Presence of microplastics in water, sediments and fish species in an urban coastal environment of Fiji, a Pacific small island developing state. *Marine Pollution Bulletin*, 153, 110991. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110991>
- Franco-Herrera, A. (2005). Oceanografía de la Ensenada de Gaira: El Rodadero, más que un centro turístico en el Caribe colombiano. Bogotá, D.C., Colombia. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. 56p
- Galloway, T.S., Cole, M., Lewis, C. (2017). Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature Ecology & Evolution*, 1(5), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0116>
- Garcés-Ordóñez, O., Castillo-Olaya, V.A., Granados-Briceño, A.F., García, M.B., Díaz, L.F.E. (2019). Marine litter and microplastic pollution on mangrove soils of the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombian Caribbean. *Marine Pollution Bulletin*, 145, 455-462. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.058>
- Garcés-Ordóñez, O., Díaz, L., Cardoso, R.P., Muniz, M.C. (2020a). The impact of tourism on marine litter pollution on Santa Marta beaches, Colombian Caribbean. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111558. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111558>

- Garcés-Ordóñez, O., Espinosa, L.F., Cardoso, R.P., Cardozo, B.B.I., dos Anjos, R.M.** (2020b). Plastic litter pollution along sandy beaches in the Caribbean and Pacific coast of Colombia. *Environmental Pollution*, 267, 115495. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115495>
- Garcés-Ordóñez, O., Mejía-Esquivia, M., Sierra-Bastidas, T., Patiño, A., Blandón, L., Espinosa, L.F.** (2020c). Prevalence of microplastic contamination in the digestive tract of fishes from mangrove ecosystem in Cispatá, Colombian Caribbean. *Marine Pollution Bulletin*, 154; 111085. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111085>
- Garcés-Ordóñez, O., Espinosa, L.F., Muniz, M.C., Pereira, L.B.S., dos Anjos, R.M.** (2021). Abundance, distribution, and characteristics of microplastics in coastal surface waters of the Colombian Caribbean and Pacific. *Environmental Science and Pollution Research* 28, 43431-43442. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13723-x>
- García, F., Palacio C., Chang, G.** (2013). Simulation of near field dilution of the submarine outfall of Santa Marta (Colombia). *Dyna*, 80 (182), 138-146.
- GESAMP.** (1991). The State of Marine Environment. London. UK. Blackwell Scientific Publication. 146p
- GESAMP.** (2019). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. Rep. Stud. GESAMP, 90, 130 p.
- Gewert, B., Plassmann, M.M., MacLeod, M.** (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 17(9), 1513-1521. <https://doi.org/10.1039/C5EM00207A>
- Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L.** (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advance*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
- Goldstein, M.C., Titmus, A.J., Ford, M.** (2013). Scales of spatial heterogeneity of plastic marine debris in the northeast Pacific Ocean. *PlosOne*. 8(11), e80020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080020>.
- Gutiérrez, L.C., Gutiérrez, Y., Noriega, O., Rangel, N., Fonseca, C., Ortega, E., García, H.** (2017). Caracterización, diagnóstico y análisis de vulnerabilidades y amenazas en el departamento del Magdalena. Santa Marta. Colombia. Corporación Autónoma Regional del Magdalena-Universidad del Atlántico. 257p
- Hale, R.C., Seeley, M., La Guardia, M.J., Mai, L., Zeng, E.Y.** (2020). A global perspective on microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(1), e2018JC014719. <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>
- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R.C., Thiel, M.** (2012). Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3060-3075. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0080-1>
- Horton, A.A., Svendsen, C., Williams, R.J., Spurgeon, D.J., Lahive, E.** (2017). Large microplastic particles in sediments of tributaries of the river Thames, UK—Abundance, sources and methods for effective quantification. *Marine Pollution Bulletin*, 114(1), 218-226. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.004>
- Hurley, R., Woodward, J., Rothwell, J.J.** (2018). Microplastic contamination of riverbeds significantly reduced by catchment-wide flooding. *Nature Geoscience*, 11(4), 251-257. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0080-1>
- IDEAM, UPME.** (2016). Atlas de viento y energía eólica de Colombia. Bogotá, D.C. Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Unidad de Planeación Minero-Energética.
- INVEMAR.** (2008). Evaluación preliminar de las amenazas naturales en la cuenca del río Manzanares con énfasis en eventos fluviotorrenciales. Informe final. Santa Marta, Colombia. INVEMAR, INGEOMINAS, ECOPELROL.
- INVEMAR.** (2017). Protocolo de muestreo y análisis de microplásticos en aguas marinas superficiales, sedimentos de playas y tracto digestivo de peces. Componente 5: diagnóstico de microplásticos en zonas costeras de Colombia, Resolución 646 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Santa Marta. Colombia. INVEMAR.
- INVEMAR.** (2018). Diagnóstico y evaluación de la calidad de las aguas marinas y costeras en el Caribe y Pacífico colombianos. Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia – REDCAM. Serie de Publicaciones Periódicas No. 4. Santa Marta. Colombia. INVEMAR. 336p

- Julienne, F., Delorme, N., Lagarde, F.** (2019). From macroplastics to microplastics: role of water in the fragmentation of polyethylene. *Chemosphere*, 236, 124409. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124409>.
- Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I., Shruti, V.C.** (2020). Review of current trends, advances and analytical challenges for microplastics contamination in Latin America. *Environmental Pollution*, 267, 115463. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115463>
- Law, K.L., Morét-Ferguson, S., Maximenko, N.A., Proskurowski, G., Peacock, E., Hafner, J., Reddy, C.M.** (2010). Plastic accumulation in the North Atlantic Subtropical Gyre. *Science*, 329 (5996), 1185-1188. <https://doi.org/10.1126/science.1192321>
- Law, K.L. & Thompson, R.C.** (2014). Microplastics in the seas. *Science*, 345(6193), 144-145. <https://doi.org/10.1126/science.1254065>
- Lebreton, C.M., van der Zwet, J., Damsteeg, J., Slat, B., Andrady, A., Reisser, J.** (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, 8, 15611. <https://doi.org/10.1038/ncomms15611>
- Lebreton, L. & Andrady, A.** (2019). Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*, 5(1),1-11. <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7>
- Lindeque, P.K., Cole, M., Coppock, R.L., Lewis, C.N., Miller, R.Z., Watts, A.J., Wilson-McNeal, A., Wright, S.L., Galloway, T.S.** (2020). Are we underestimating microplastic abundance in the marine environment? A comparison of microplastic capture with nets of different mesh-size. *Environmental Pollution*, 265, 114721. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114721>
- Lithner, D., Damberg, J., Dave, G., Larsson, A.** (2009). Leachates from plastic consumer products- Screening for toxicity with *Daphnia magna*. *Chemosphere*, 74, 1195-1200. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.022>.
- Lithner, D., Larsson, A., Dave, G.** (2011). Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *The Science of the Total Environment*, 409, 3309-3324. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.038>
- Lusher, A.L., Tirelli, V., O'Connor, I., Officer, R.A.** (2015). Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Scientific Reports*, 5 (1),1-9. <https://doi.org/10.5067/GHG1S-4FP01>
- Lusher, A.L., Welden, N.A., Sobral, P., Cole, M.** (2017). Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates. *Analytical Methods Journal*, 9 (9), 1346-1360. <https://doi.org/10.1039/C6AY02415G>
- Mancera-Pineda, J., Pinto, G., Vilardy, S.** (2013). Patrones de distribución estacional de masas de agua en la bahía de Santa Marta, Caribe colombiano: importancia relativa del upwelling y outwelling. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 42(2), 329-360. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2013.42.2.55>
- Masura, J., Baker, J., Foster, G., Arthur, C.** (2015). Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48.
- Mejía, M.** (1989). Caribe colombiano: clima y relieve. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 1(1), 13.
- Michida, Y., Chavanich, S., Cózar, C.A., Hagmann, P., Hinata, H., Isobe, A., Kershaw, P., Kozlovskii, N., Li D., Lusher, L.A., Martí, E., Mason, A.S., Mu, J., Saito, H., Shim, J.W., Syakti, D.A., Takada, H., Thompson, R., Tokai, T., Uchida, K., Vasilenko, K., Wang, J.** (2019). Guidelines for harmonizing ocean surface microplastic monitoring methods. Ministry of the Environment. Tokyo. Japan.
- Naji, A., Azadkhah, S., Farahani, H., Uddin, S., Khan, F.R.** (2021). Microplastics in wastewater outlets of Bandar Abbas city (Iran): A potential point source of microplastics into the Persian Gulf. *Chemosphere*, 262, 128039. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128039>
- Nel, H.A., Dalu, T., Wasserman, R.J.** (2018). Sinks and sources: Assessing microplastic abundance in river sediment and deposit feeders in an Austral temperate urban river system. *The Science of the Total Environment*, 612, 950-956. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.298>
- Oehlmann, J., Schulte-Oehlmann, U., Kloas, W., Jagnytsch, O., Lutz, I., Kusk, K.O., Wollenberger, L., Santos, E.M., Paull, G.C., van Look, K.J.W., Tyler, C.R.** (2009). A critical analysis of the biological impacts of plasticizers on wildlife. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364, 2047-2062. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0242>
- Pawar, P.R., Shirgaonkar, S.S., Patil, R.B.** (2016). Plastic marine debris: sources, distribution and impacts on coastal and ocean biodiversity. *PENCIL Publication of Biological Sciences*, 3(1), 40-54.

- Pelamatti, T., Fonseca-Ponce, I.A., Ríos-Mendoza, L.M., Stewart, J.D., Marín-Enríquez, E., Marmolejo-Rodríguez, A.J., Hoyos-Padilla, E.M., Galván-Magaña, F., González-Armas, R.** (2019). Seasonal variation in the abundance of marine plastic debris in Banderas Bay, México. *Marine Pollution Bulletin*, 145, 604-610. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.062>
- Pinto, G.** (2005). Patrones de distribución espacial de la concentración de nitrógeno, fósforo y sílice en la bahía de Santa Marta. Trabajo de grado. Programa de Biología Marina. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Santa Marta, Colombia.
- PlasticsEurope.** (2020). Plastics the facts 2020: an analysis of European plastics production, demand and waste data. Brussels. Belgium. PlasticsEurope. 42p
- Plata, Á. & Ibarra, D.** (2016). Percepción local del estado ambiental en la cuenca baja del río Manzanares. *Revista Luna Azul*, 42, 235-255.
- Posada, B. & Henao, W.** (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. Serie de Publicaciones Especiales No. 13, Santa Marta. Colombia. INVEMAR. 200p
- Pupo-García, L.C.** (2012). Valoración económica del uso recreativo de lugares turísticos: el caso de las bahías de Santa Marta, El Rodadero y Taganga (Colombia). *Revista de Economía del Caribe*, 10, 233-256.
- Rangel-Buitrago, N., Gracia, A., Vélez-Mendoza, A., Mantilla-Barbosa, E., Arana, V.A., Trilleras, J., Arroyo-Olarte, H.** (2018). Abundance and distribution of beach litter along the Atlántico Department, Caribbean coast of Colombia. *Marine Pollution Bulletin*, 136, 435-447. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.09.040>
- Rangel-Buitrago, N., Arroyo-Olarte, H., Trilleras, J., Arana, V.A., Mantilla-Barbosa, E., Gracia, A., Velez, A., Neal, W.J., Williams, A.T., Micallef, A.** (2021). Microplastics pollution on Colombian Central Caribbean beaches. *Marine Pollution Bulletin*, 170, 112685. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112685>
- Rech, S., Macaya-Caquilpán, V., Pantoja, J.F., Rivadeneira, M.M., Madariaga, D.J., Thiel, M.** (2014). Rivers as a source of marine litter: a study from the SE Pacific. *Marine Pollution Bulletin*, 82, 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.019>
- Ricaurte-Villota, C. & Bastidas, M.L.** (Eds.). (2017). Regionalización oceanográfica: una visión dinámica del Caribe. Serie de Publicaciones Especiales de No. 14. Santa Marta, Colombia. INVEMAR. 180p
- Richard, H., Carpenter, E.J., Komada, T., Palmer, P.T., Rochman, C.M.** (2019). Biofilm facilitates metal accumulation onto microplastics in estuarine waters. *The Science of the Total Environment*, 683, 600-608. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.331>
- Rose, D. & Webber, M.** (2019). Characterization of microplastics in the surface waters of Kingston Harbour. *The Science of the Total Environment*, 664, 753-760. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.319>
- Ryan, P.G., Suaria, G., Perold, V., Pierucci, A., Bornman, T.G., Aliani, S.** (2020). Sampling microfibres at the sea surface: the effects of mesh size, sample volume and water depth. *Environmental Pollution*, 258, 113413. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113413>
- Sarmiento-Pérez, R.A., Ortiz, R.J.C., Bejarano, A.L.F., Otero, D.L., Restrepo, L.J.C., Franco-Herrera, A.** (2018). Sea breeze in the Colombian Caribbean coast. *Atmósfera*, 31 (4), 389-406 <https://doi.org/10.20937/atm.2018.31.04.06>
- Schönlau, C., Karlsson, T.M., Rotander, A., Nilsson, H., Engwall, M., van Bavel, B., Kärrman, A.** (2020). Microplastics in sea-surface waters surrounding Sweden sampled by manta trawl and in-situ pump. *Marine Pollution Bulletin*, 153, 111019. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111019>
- Song, Y.K., Hong, S.H., Jang, M., Han, G.M., Jung, S.W., Shim, W.J.** (2017). Combined effects of UV exposure duration and mechanical abrasion on microplastic fragmentation by polymer type. *Environmental Science & Technology*, 51 (8), 4368-4376. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06155>
- Steensgaard, I.M., Syberg, K., Rist, S., Hartmann, N.B., Boldrin, A., Hansen, S.F.** (2017). From macro-to microplastics-analysis of EU regulation along the life cycle of plastic bags. *Environmental Pollution*, 224, 289-299. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.02.007>
- Sun, J., Dai, X., Wang, Q., van Loosdrecht, M.C., Ni, B.J.** (2019). Microplastics in wastewater treatment plants: detection, occurrence and removal. *Water Research*, 152, 21-37. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.050>
- Talsness, C.E., Andrade, A.J.M., Kuriyama, S.N., Taylor, J.A., vom-Saal, F.S.** (2009). Components of plastic: experimental studies in animals and relevance for human health. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364, 2079-2096. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0281>

- Teuten, E.L., Saquing, J.M., Knappe, D.R., Barlaz, M.A., Jonsson, S., Björn, A., Rowland, S.J., Thompson, R.C., Galloway, T.S., Yamashita, R., Ochi, D., Watanuki, Y., Moore, C., Viet, P.H., Tana, T.S., Prudente, M., Booyatumanond, R., Zakaria, M.P., Akkhavong, K., Ogata, Y., Hirai, H., Iwasa, S., Miukawa, K., Hagino, Y., Imamura, A., Saha, M., Takada, H.** (2009). Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364(1526), 2027-2045. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0284>
- Tokai, T., Uchida, K., Kuroda, M., Isobe, A.** (2021). Mesh selectivity of neuston nets for microplastics. *Marine Pollution Bulletin* 165, 112111. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112111>
- UNEP.** (2016). Marine plastic debris and microplastics – Global lessons and research to inspire action and guide policy change. United Nations Environment Programme. 4, 26-29.
- Vedolin, M.C., Teophilo, C.Y.S., Turra, A., Figueira, R.C.L.** (2018). Spatial variability in the concentrations of metals in beached microplastics. *Marine Pollution Bulletin*, 129(2), 487-493. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.10.019>
- Vidal, L., Molina, A., Duque, G.** (2021). Incremento de la contaminación por microplásticos en aguas superficiales de la bahía de Buenaventura, Pacífico colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 50(2), 113-132. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2021.50.2.1032>
- Wang, W. & Wang, J.** (2018). Investigation of microplastics in aquatic environments: an overview of the methods used, from field sampling to laboratory analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 108, 195-202. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.08.026>
- Wang, C., Xing, R., Sun, M., Ling, W., Shi, W., Cui, S., An, L.** (2020). Microplastics profile in a typical urban river in Beijing. *The Science of the Total Environment*, 743, 140708. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140708>
- Waters, C.N., Zalasiewicz, J., Summerhayes, C., Barnosky, A.D., Poirier, C., Galuszka, A., Cearreta, A., Edgeworth, M., Ellis, E.C., Ellis, M., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J.R., Richter, D., Steffen, W., Syvitski, J., Vidas, D., Wagreich, M., Williams, M., Zhinsheng, A., Grinevald, J., Odada, E., Oreskes, N., Wolfe, A.P.** (2016). The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science*, 351 (6269), 137. <https://doi.org/10.1126/science.aad2622>
- Wiedemann, H.** (1973). Reconnaissance of the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia: physical parameters and geological history. *Mitteilungen aus dem Instituto Colombo-Alemán de Investigaciones Científicas Punta de Betín*, 7, 85-119. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.1973.7.0.549>

Artículo original

Nuevos registros y estado del conocimiento de heterobranquios marinos (Mollusca: Gastropoda) en el departamento del Atlántico, Caribe colombiano

New records and status of knowledge of marine heterobranchs (Mollusca: Gastropoda) in the department of Atlántico, Colombian Caribbean

✉ Alexander Carvajal-Florian*, ✉ Adriana Gracia C

Programa de Biología, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad del Atlántico, Atlántico, Colombia

Resumen

La subclase Heterobranchia es una de las más diversas entre los moluscos gasterópodos; está presente en ambientes marinos, de agua dulce y terrestres, e incluye babosas intersticiales, nudibranchios, lapas intermareales, así como caracoles y babosas terrestres. Actualmente no hay un listado oficial de la diversidad de heterobranquios marinos o terrestres en el departamento del Atlántico. El objetivo principal del estudio fue contribuir al primer inventario de este grupo de gasterópodos en esta zona marino-costera del Caribe colombiano caracterizada por condiciones de alta sedimentación, turbidez y resuspensión debido a su cercanía a la desembocadura del río Magdalena. La información que se presenta se recogió en 38 salidas de campo no periódicas en varias localidades entre el 2017 y el 2021, lo que se complementó con una revisión exhaustiva de la literatura y las bases de datos. Se registró una riqueza de 17 especies distribuidas en nueve localidades del departamento. Los heterobranquios se registraron solo en 11 de las salidas de campo. En los resultados se destaca el primer registro del género *Oxynoe* en el Caribe colombiano y el segundo del género *Carminodoris* en Colombia, del cual solo se conocía un reporte en el departamento de Bolívar. Cinco especies se observaron por primera vez en esta área: tres de la familia Aplysiidae, una de Discodorididae y una de Oxynoidae. Estos datos contribuyen al conocimiento y comprensión de un importante grupo de gasterópodos distribuidos en una zona de la costa Caribe colombiana.

Palabras clave: Lista de chequeo; Aplysiidae; Discodorididae; Oxynoidae; Riqueza; Alta sedimentación.

Abstract

The subclass Heterobranchia is one of the most diverse among gastropod mollusks; it is present in marine, freshwater, and terrestrial environments and includes interstitial slugs, nudibranchs, intertidal limpets, and land snails and slugs. There is no official list of the diversity of marine or terrestrial heterobranchs for the department of Atlántico. The main objective of the study was to contribute to the first inventory of this gastropod group in this marine-coastal area in the Colombian Caribbean characterized by conditions of high sedimentation, turbidity, and resuspension generated by its proximity to the Magdalena River mouth. The information presented in this study was collected during 38 non-regular field trips in several localities between 2017 and 2021 and complemented by an exhaustive literature and database review. We registered a richness of 17 species distributed in nine Department localities. Heterobranchs were recorded only in 11 of the field trips. The results highlight the first record of the genus *Oxynoe* for the Colombian Caribbean and the second of the genus *Carminodoris* in Colombia, of which only one report was known from the department of Bolívar. We registered five species for the first time in this area: three members of the family Aplysiidae and one each of the Discodorididae and Oxynoidae families. This information contributes to the knowledge and understanding of an important gastropod group distributed in this coastal Colombian area.

Keywords: Check list; Aplysiidae; Discodorididae; Oxynoidae; Richness; High sedimentation.

Citación: Carvajal-Florian A, Gracia C A. Nuevos registros y estado del conocimiento de heterobranquios marinos (Mollusca: Gastropoda) en el departamento del Atlántico, Caribe colombiano. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):426-437, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1580>

Editor: Jaime Ricardo Cantera

***Correspondencia:**

Alexander Carvajal-Florian;
acarvajalf@mail.uniatlantico.edu.co

Recibido: 11 de octubre de 2021

Aceptado: 16 de mayo de 2022

Publicado: 28 de junio de 2022



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

Introducción

La subclase Heterobranchia consta de 8.820 especies que se distribuyen en ambientes marinos, dulce-acuícolas y terrestres (WoRMS, 2022). Este grupo presenta la mayor diversidad morfológica de todos los clados de Gastropoda e incluye desde pequeñas babosas intersticiales hasta nudibranquios coloridos de talla grande, lapas intermareales, así como caracoles y babosas terrestres (Ponder *et al.*, 2020). Heterobranchia está compuesta por las infraclases “Lower Heterobranchia” y Euthyneura, y en esta última se agrupan actualmente las babosas y liebres de mar (Bouchet *et al.*, 2017). Anteriormente las babosas de mar estaban clasificadas dentro de la infraclase Opisthobranchia, pero mediante estudios morfológicos y moleculares se comprobó que los opisthobranquios eran un grupo parafilético, por lo que ya no es aceptado (Jörger *et al.*, 2010; Camacho-García *et al.*, 2014; Galvao *et al.*, 2015); sin embargo, el nombre es un punto de referencia importante para el seguimiento de la información taxonómica del grupo. Euthyneura comprende la mayoría de los ‘opisthobranquios’ y todos los ‘pulmonados’, así como las familias Pyramidellidae, Rissoellidae y Glacidorbidae, incluidas anteriormente en “Lower Heterobranchia” (Ponder *et al.*, 2020).

Los grupos de babosas y liebres de mar comprenden los ejemplares más llamativos dentro del grupo, pues se caracterizan por una morfología, ornamentación y coloración muy distintivas. Entre las características sobresale el proceso de detorsión que desembocó en algunos grupos en una concha reducida, interna o ausente, en órganos sensoriales como los tubérculos, ceratas, tentáculos orales, y rinóforos, y en órganos locomotores como los parapodios (Ardila *et al.*, 2007; De Sisto *et al.*, 2016).

Los heterobranquios se pueden encontrar en diversas áreas y ambientes marinos alrededor del mundo. Aunque la mayoría tiene hábitos bentónicos, hay grupos de vida pelágica. Se distribuyen desde aguas someras hasta grandes profundidades, ocupando hábitats como arrecifes de coral, sustratos rocosos, fondos blandos, praderas de fanerógamas y algas (Caballer *et al.*, 2015; Googheart *et al.*, 2016).

Según García & Bertsch (2009), el número de especies de heterobranquios en el Caribe es de 329, siendo este una de las áreas con mayor riqueza de todo el Atlántico. Ardila *et al.* (2007) reportaron 86 especies de babosas y liebres de mar en el Caribe colombiano a partir de información proveniente de diferentes publicaciones y material almacenado en el Museo de Historia Natural Marina de Colombia (MHNMC) en Santa Marta.

En el país no se ha desarrollado una escuela taxonómica para este grupo de organismos, pues dada la complejidad que implica recolectar los ejemplares e identificarlos, son pocos los esfuerzos investigativos que se han desplegado para conocerlo. Específicamente en el departamento del Atlántico la riqueza de heterobranquios marinos es poco conocida; se destacan algunos registros de moluscos intermareales y de aguas someras en los estudios de Yidi & Sarmiento (2010) y Gutiérrez *et al.* (2016), así como de algunas especies encontradas en aguas profundas sobre fondos blandos de la plataforma y el talud (Gracia *et al.*, 2004) a partir de material de referencia del MHNMC.

El escaso conocimiento que se tiene sobre este grupo en el litoral del departamento del Atlántico obedece al poco esfuerzo investigativo en torno a los organismos marinos y las condiciones medioambientales de la zona, la cual se ve influenciada por la pluma de sedimentos en la desembocadura del río Magdalena a la altura de Bocas de Ceniza, que crea condiciones extremas en términos de alta sedimentación y baja luminosidad la mayor parte del año (Corporación Autónoma Regional del Atlántico-CRA, 2016; Rangel-Buitrago *et al.*, 2017), así como de una constante resuspensión de sedimentos finos, lo que limita la visibilidad y observación de los organismos.

El objetivo de este trabajo fue aportar información de línea de base (taxonómica y ecológica) sobre los heterobranquios marinos mediante observaciones en campo y la elaboración de un inventario actualizado. La información ayudará a establecer las bases para conocer la riqueza de organismos marinos en litorales que presentan condiciones extremas de alta sedimentación.

Materiales y métodos

Área de estudio

Las localidades en las que se hicieron los avistamientos y muestreos (en algunos casos) pertenecen a Puerto Velero, Caño Dulce, Puerto Caimán y Santa Verónica. Puerto Velero y Caño Dulce están protegidas por una espiga litoral que les otorga una forma de bahía donde se han podido establecer pequeños parches de fanerógamas de las especies *Syringodium filiforme*, *Halodule wrightii*, *Halophila decipiens* y *Thalassia testudinum*.

En el departamento del Atlántico el promedio anual de temperatura oscila entre los 28 y 32 °C y la humedad es del 80 al 90 % (Posada & Henao, 2008). Las variaciones estacionales muestran dos periodos de época lluviosa (de abril a mayo y de octubre a noviembre) y dos de época seca (de diciembre a marzo y de julio a septiembre). Los vientos presentan valores promedios de velocidad menores a 13 m/s, y los valores más altos están asociados con los vientos alisios durante el periodo de época seca (Rangel-Buitrago *et al.*, 2018).

La zona costera del Atlántico presenta altos niveles de sedimentación asociados al río Magdalena, el cual vierte en promedio $142,6 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$ de sedimentos al mar Caribe, lo que lo convierte en uno de los ríos con mayor flujo sedimentario de Suramérica (Restrepo-López *et al.*, 2015) y uno de los mayores aportantes de materia orgánica. La evolución de la línea de costa del departamento está fuertemente relacionada con las descargas de este río, que también influye en las características de los ecosistemas marino-costeros del área. En estos ecosistemas se puede presentar baja luminosidad, alta turbidez, alta resuspensión, y aportes de agua dulce que reducen la salinidad (Gracia *et al.*, 2021; Durán-Fuentes *et al.*, 2022). Algunas de esas características podrían influir en el desarrollo evolutivo de ecosistemas como las comunidades coralinas, así como en la presencia de algunas especies que viven asociadas a estas.

Búsqueda y recolección en campo

Se organizaron 38 salidas de campo exploratorias entre el 2017 y el 2021, tanto en periodos lluviosos como secos. Las salidas no tenían como fin la búsqueda de moluscos, sin embargo, en 11 de ellas se encontraron diversas especies de Heterobranchia. Durante las salidas se llevaron a cabo caminatas en la playa, observaciones en litorales rocosos, en acantilados y sustratos artificiales, y se cubrieron las franjas intermareal y submareal somera en las cuatro localidades del área de estudio. Además, se hizo careteo en las localidades de Puerto Velero y Caño Dulce para muestreos exploratorios bajo el agua a profundidades menores de dos metros. La búsqueda se priorizó en sustratos como fondos blandos con fanerógamas y macroalgas, y en rocas con macroalgas.

Los organismos encontrados fueron fotografiados y algunos se recolectaron para su posterior conservación. Solo algunos ejemplares de cefalaspideos, aplysidos y sacoglossos se refrigeraron en agua marina para su relajación y posterior preservación en etanol al 70 y 95 %, con el fin de utilizarlos en futuros estudios moleculares.

El listado de especies se elaboró con la información complementaria de los taxones ya registrados en el departamento y referenciados en diferentes fuentes bibliográficas (Tabla 1) y en la base de datos del MHNMC.

Resultados

Los heterobranquios hallados en el departamento del Atlántico pertenecían a 17 especies, siete de ellas registradas en las observaciones en campo (Tabla 1). Una de estas siete especies correspondió a un nuevo registro en el Caribe colombiano y cinco fueron las primeras observaciones de heterobranquios en este departamento. Las especies se encontraron distribuidas en nueve localidades, dos de ellas, *Philine infundibulum* y *Scaphander watsoni*, fueron ubicadas en aguas más allá de la plataforma continental (CA-BC y CA-PC) (Figura 1), es decir, correspondían a especies de aguas profundas halladas en ámbitos batimétricos

Tabla 1. Listado general de las especies de heterobranquios en el departamento del Atlántico

Taxones	Localidad	Profundidad (m)	Sustrato	Referencia
Orden Nudibranchia Cuvier, 1817				
Discodorididae Bergh, 1891				
<i>Carminodoris</i> sp.*	PV	1	C	Este trabajo
Orden Cephalaspidea P. Fischer, 1883				
Bullidae Gray, 1827				
<i>Bulla solida</i> Gmelin, 1791	S	30	Fb	Yidi & Sarmiento (2011)
<i>Bulla striata</i> Bruguière, 1792	PV	0,5	Fb	Gutiérrez et al. (2016); este trabajo
<i>Bulla</i> sp.	PC			NMNH (2021)
Tornatinidae P. Fischer, 1883				
<i>Acteocina lepta</i> Woodring, 1928	S	35	Fb	Yidi & Sarmiento (2011)
Haminoeidae Pilsbry, 1895				
<i>Haminoea petiti</i> (d'Orbigny, 1841)	SV	30	Fb	Yidi & Sarmiento (2011)
<i>Haminoea succinea</i> (Conrad, 1846)	SV	50	Fb	Yidi & Sarmiento (2011)
<i>Haminoea</i> cf. <i>succinea</i> (Conrad, 1846)	CD	0	Ma	Este trabajo
Philinidae Gray, 1850 (1815)				
<i>Philine infundibulum</i> Dall, 1889	CA-PC	651	Fb	SIBM (2021)
Scaphandridae G.O. Sars, 1878				
<i>Scaphander watsoni</i> Dall, 1881 (= <i>Scaphander watsoni rehderi</i>)	CA-BC, CA-PC	206-651	Fb	Gracia et al. (2004), SIBM (2021)
Orden Aplysiida				
Aplysiidae Lamarck, 1809				
<i>Aplysia brasiliana</i> Rang, 1828*	CD, PV, PCa, SV	0,5-1	Fb, Ma	Este trabajo
<i>Aplysia cervina</i> (Dall & Simpson, 1901)*	PV	0,5	F, Fb	Este trabajo
<i>Aplysia</i> cf. <i>cervina</i> (Dall & Simpson, 1901)	PCa	0	Ma	Este trabajo
<i>Bursatella leachii</i> Blainville, 1817*	CD, PV	0-1	F, Fb	Este trabajo
Orden Pteropoda Cuvier, 1804				
Cavoliniidae Gray, 1850 (1815)				
<i>Cavolinia gibbosa</i> (d'Orbigny, 1835)	SV	55	Fb	Yidi & Sarmiento (2011)
<i>Cavolinia inflexa</i> (Lesueur, 1813)	S	30	Fb	Yidi & Sarmiento (2011)
<i>Cavolinia uncinata</i> (d'Orbigny, 1835)	BC	100	Fb	Yidi & Sarmiento (2011)
<i>Diacria major</i> (Boas, 1886)	BC	100	Fb	Yidi & Sarmiento (2011)
Superorden Sacoglossa				
Oxynoidae Stoliczka, 1868 (1847)				
<i>Oxynoe</i> sp.*	CD	0,5	F, R	Este trabajo

Localidades: ver Figura 1. Sustratos: C: concreto, F: fanerogamas, Fb: fondos blandos, Ma: macroalgas, R: rocas. Las especies señaladas con un asterisco (*) corresponden a las primeras observaciones para el departamento

que iban desde los 206 hasta los 651 m de profundidad. Entre las especies encontradas en las actividades de campo, la de mayor número de ejemplares fue *Bursatella leachii*, en la localidad de Caño Dulce, con grupos de hasta diez individuos.

Entre los sustratos, en los fondos blandos se registró una mayor riqueza, con 14 especies, seguidos de las macroalgas y las fanerógamas, con tres especies cada uno. Además, se registró una especie en sustrato artificial (*Carminodoris* sp.) hallada en muros de concreto a 1 m de profundidad.

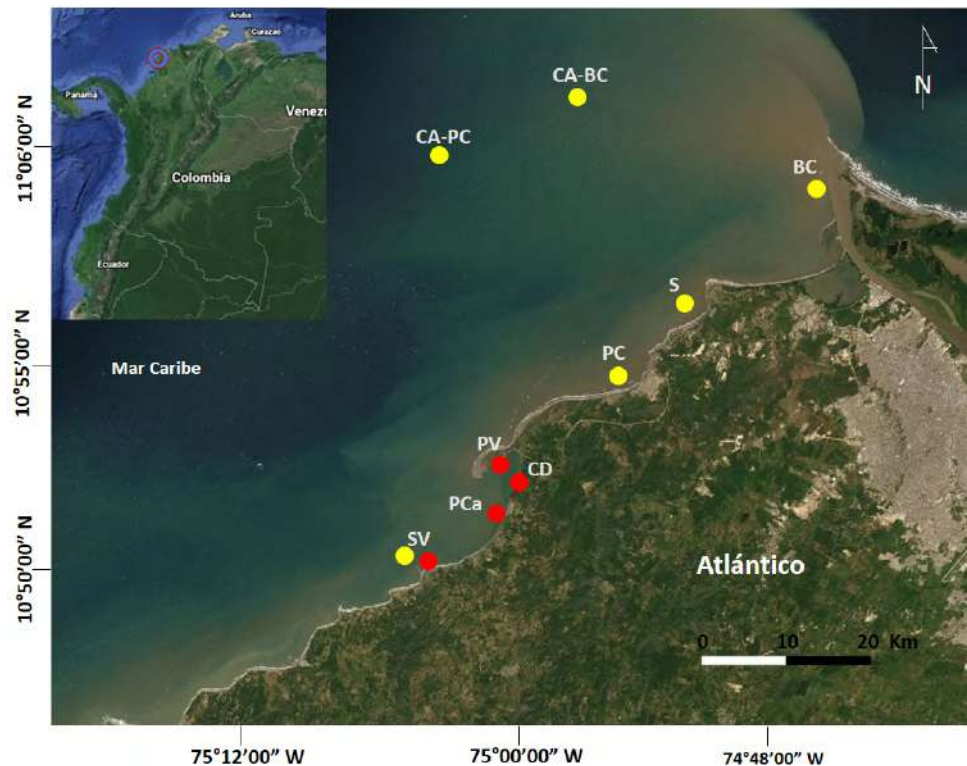


Figura 1. Distribución de las localidades recopiladas en la literatura (círculos amarillos) y las muestreadas en el presente trabajo (círculos rojos).

CA-BC: costa afuera de Bocas de Ceniza, CA-PC: costa afuera de Puerto Colombia, BC: Bocas de Ceniza, S: Salgar, PC: Puerto Colombia, PV: Puerto Velero, CD: Caño Dulce, PCa: Puerto Caimán, SV: Santa Verónica

A continuación se presenta una síntesis de las especies observadas por primera vez en el departamento del Atlántico. El orden taxonómico responde a la clasificación de los gasterópodos hecha por **Bouchet et al.** (2017).

Carminodoris sp. (**Figura 2a-c**)

Material observado en campo: un ejemplar vivo en la Marina de Puerto Velero (septiembre 27 de 2019), adherido a un muro de concreto a 1 m de profundidad que estaba colonizado por otros organismos como ascidias, anémonas, corales y esponjas.

Características morfológicas: cuerpo aplanado y ovalado de aproximadamente 7 cm de longitud, de color café oscuro en el centro de la parte dorsal del notum y café claro en sus bordes. Notum cubierto por tubérculos ovalados de borde circular, con tamaños mayores en la parte central del manto y menores hacia los bordes. Además, las bases de los tubérculos presentaban un anillo de color blanco. Las branquias eran de color café oscuro con el borde apical blanco y aspecto plumoso y rinóforos carnosos y de color rojizo en las bases, con una porción apical plumosa de color café oscuro terminada en una punta de color blanco.

Comentarios: este género lo reportaron por primera vez en el Caribe colombiano, en las islas del Rosario frente a Cartagena, **Zarate et al.** (2019); el espécimen no fue identificado a nivel de especie debido a que poseía características morfológicas distintas a las de las dos ya registradas en el Caribe: *C. hansrosaorum* (reportada originalmente como *Haplodoris hansrosaorum* por **Domínguez et al.** en el 2006 en las costas de Brasil) y *C. madibenthos* (reportada originalmente como *H. madibenthos* por **Ortega** en el 2016 en las costas de Martinica). El ejemplar encontrado en las islas del Rosario comparte características morfológicas con el observado en este trabajo y según **Zarate et al.** (2019),

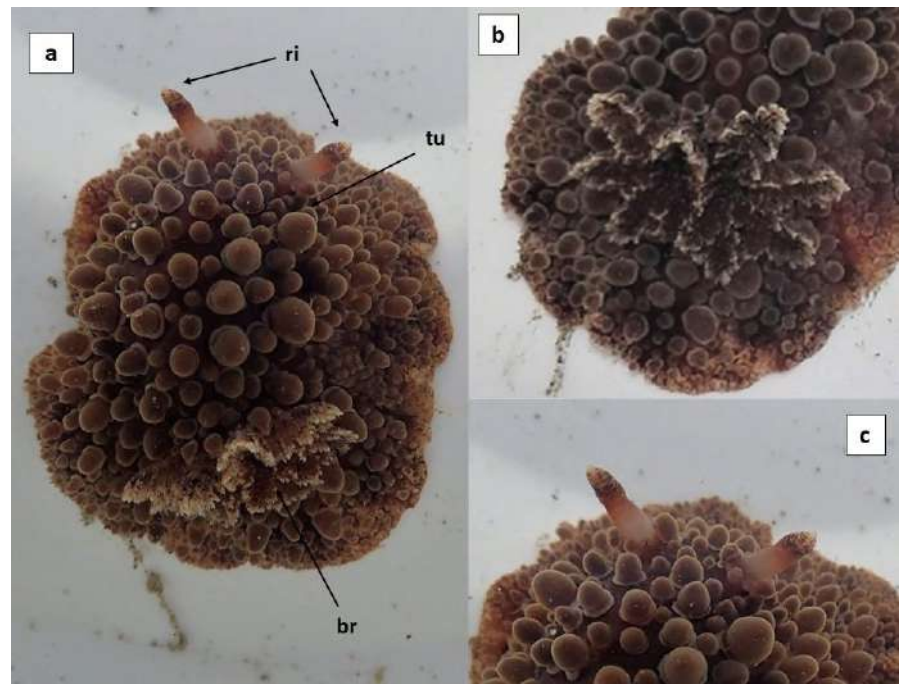


Figura 2. *Carminodoris* sp. a) vista dorsal; b) detalles de las branquias; c) detalles de los rinóforos. ri: rinóforos; tu: tubérculos; br: branquias; longitud: 7 cm

podría tratarse de una nueva especie. Debido a que el organismo no fue recolectado, no se pudieron estudiar más a fondo otras características morfológicas distintivas como los tentáculos orales, la rádula y el sistema reproductor.

Bursatella leachii Blainville, 1817 (**Figura 3a**)

Material recolectado: un ejemplar vivo de aproximadamente 8 cm de longitud, atrapado en un trasmallo de pescadores en la localidad de Caño Dulce (abril 5 de 2021) (**Figura 3a**).

Material observado en campo: ocho ejemplares en fondos blandos en la localidad de Caño Dulce (febrero 24 de 2019); otros 10 ejemplares, aproximadamente, en fondos blandos con fanerógamas en la localidad de Caño Dulce (abril 27 de 2019). Un ejemplar en fondos blandos de la zona intermareal en la localidad de Puerto Velero (noviembre 29 de 2019).

Distribución: *Bursatella leachii* es una especie circumtropical que se distribuye en tres océanos y el mar Mediterráneo. En el Atlántico occidental se encuentra en el golfo de México, el mar Caribe (en países como Cuba, Costa Rica, Panamá, Venezuela) y las costas del sur de Brasil (Valdés *et al.*, 2006; Caballer *et al.*, 2015, WoRMS, 2021). En Colombia ha sido reportada en el Parque Nacional Natural Tayrona (PNNT) y en La Guajira (Ardila *et al.*, 2007).

Comentarios: esta especie fue observada en grandes grupos durante eventos de apareamiento y desove en aguas someras de hasta 1 m. Las cadenas de huevos se observaron adheridas a fanerógamas de la especie *S. filiforme* y a algunas macroalgas. Al igual que *Aplysia brasiliana*, los avistamientos de *B. leachii* fueron más frecuentes entre febrero y junio.

Aplysia brasiliana Rang, 1828 (**Figura 3b**)

Material observado en campo: un ejemplar vivo y uno muerto en la playa de Puerto Caimán (febrero 24 de 2019), tres ejemplares vivos en fondos blandos a 1 m de profundidad en la localidad de Puerto Velero (marzo 27 de 2019), un ejemplar vivo en

la zona intermareal sobre macroalgas en la localidad de Santa Verónica-Cajacopi (abril 14 de 2019), y dos ejemplares muertos en la playa de la localidad de Caño Dulce (abril 5 de 2021).

Distribución: desde las aguas templadas al norte del océano Atlántico hasta las costas del sur de Brasil, incluidos el golfo de México y el mar Caribe en países como Costa Rica, Venezuela, Aruba y Bermudas (Zamora-Silva & Naranjo-García, 2008; OBIS, 2021). En Colombia esta especie se ha registrado en el PNNT y el golfo de Morrosquillo (Ardila *et al.*, 2007).

Comentarios: en las salidas de campo se observó esta especie con mayor frecuencia entre febrero y junio, principalmente en sustratos blandos y macroalgas en las localidades de Puerto Velero, Santa Verónica, Puerto Caimán y Caño Dulce. En estas dos últimas se han observado ejemplares muertos en la playa arrastrados por el fuerte oleaje, y otros nadando en aguas someras.

Aplysia cervina (Dall & Simpson, 1901) (Figura 3c)

Material observado en campo: un ejemplar vivo en fondos blandos con fanerógamas en la localidad de Puerto Velero (abril 23 de 2017), y un ejemplar vivo nadando en aguas someras en la localidad de Puerto Velero (marzo 27 de 2019).

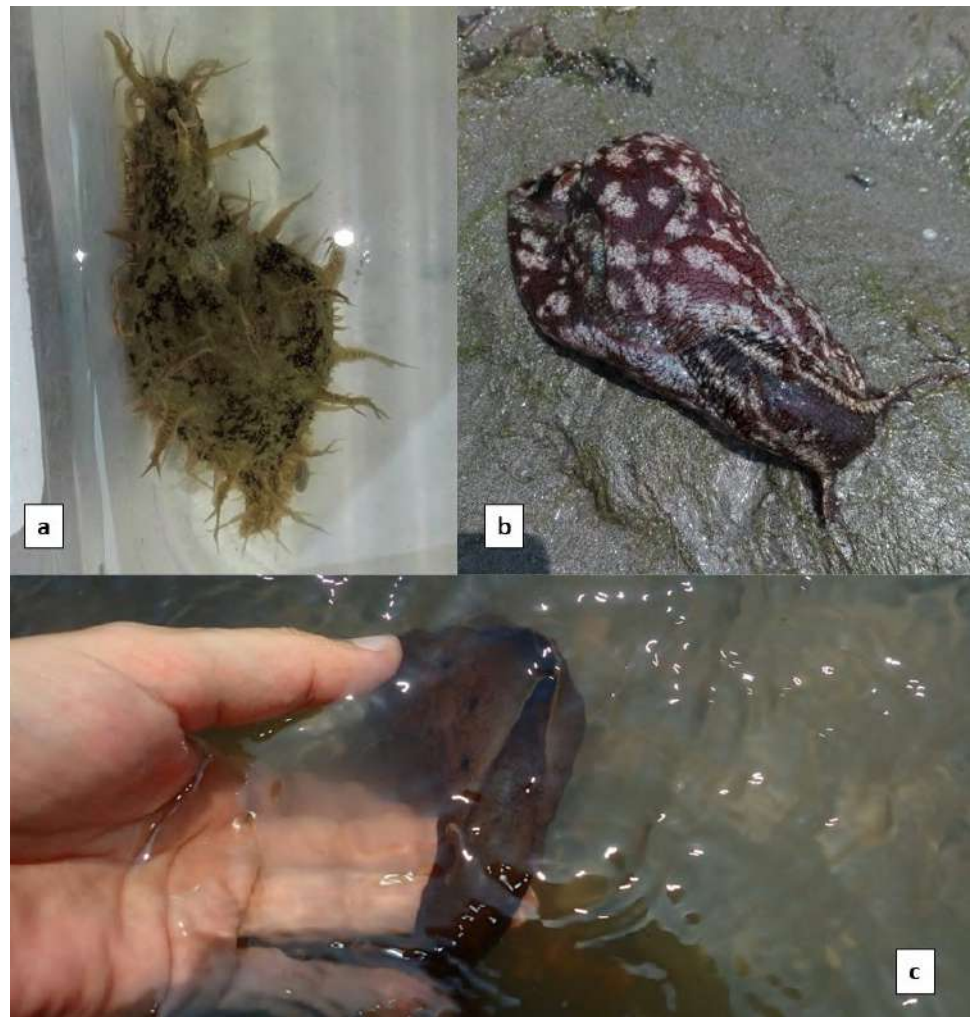


Figura 3. Ejemplares de la familia Aplysiidae. **a)** *Bursatella leachii* (8 cm); **b)** *Aplysia brasiliana* (15 cm); **c)** *Aplysia cervina* (10 cm)

Distribución: *Aplysia cervina* se encuentra en el sur de la Florida, el golfo de México, países del Caribe como Cuba y Venezuela, las costas del sur de Brasil y Argentina (Rivero *et al.*, 2003; Galvao *et al.*, 2015; OBIS, 2021; WoRMS, 2021). En Colombia esta especie se ha reportada en el PNNT (Ardila *et al.*, 2007).

Comentarios: las observaciones de esta especie fueron menos frecuentes que las de *A. brasiliensis* y se restringieron a una localidad (Puerto Velero). El nado observado en el ejemplar de *A. cervina* era de poco alcance; se desplazaba cerca de la zona intermareal con oleaje moderado y con presencia de macroalgas.

Oxyne sp. (Figura 4a-c)

Material recolectado: un ejemplar vivo sobre roca con algas del género *Caulerpa* en la localidad de Caño Dulce (julio 12 de 2021) (Figura 4a-b).

Material observado en campo: un ejemplar vivo sin cola sobre fanerógamas en la localidad de Caño Dulce (enero 12 de 2021) (Figura 4c).

Características morfológicas del material recolectado: cuerpo de color verde, alargado, de aproximadamente 2,3 cm de longitud, con una porción ovalada en la región central y una cola larga cuya longitud correspondía a la mitad de su cuerpo. Rinóforos largos y diferenciados con manchas de color café claro y blanco. Parapodios grandes que se conectan en la parte dorsal cubriendo la masa visceral y la concha. Asimismo, papilas cónicas de color blanco sobre los parapodios. Cola ubicada detrás de la cavidad del manto, que posee una línea gruesa de color blanco con manchas café en la parte dorsal.

El ejemplar observado en campo mostró diferencias morfológicas con respecto al material recolectado, ya que los parapodios tenían un mayor número de papilas (llegando a cubrir aproximadamente el 90 % del cuerpo del animal) con pequeños puntos de color verde oscuro. Además, el ejemplar no poseía cola, que pudo haber perdido por autotomía, lo que ha sido documentado en este género como modo de defensa en situaciones de estrés (Lewin, 1970; Marín & Ros, 2004).



Figura 4. *Oxyne* sp. a) ejemplar recolectado sobre sustrato natural en algas del género *Caulerpa*; b) detalles morfológicos del ejemplar recolectado; c) detalles morfológicos del ejemplar no recolectado. co: cola; pa: parapodios; ri: rinóforos. Longitud: a-b) 2,3 cm, c) 1 cm

Comentarios: en el Caribe colombiano no hay reportes de este género, del cual solo se conocen cuatro especies registradas en el Atlántico y el mar Caribe: *O. antillarum* en Brasil (**Padula**, 2008), Venezuela (**Caballer et al.**, 2015), Curazao y Panamá (**Krug et al.**, 2018), Honduras (**Caviedes et al.**, 2019), golfo de México y Jamaica (**WoRMS**, 2021); *O. azuropunctata* en Honduras (**Caviedes et al.**, 2019) y el golfo de México (**WoRMS**, 2021); *O. struthioe* en Curazao y *O. ilani* en Bahamas (**Krug et al.**, 2018). En estas localidades las especies han sido reportadas en sustratos rocosos y algas del género *Caulerpa*, siendo esta última su nicho natural.

Discusión

En este estudio se presenta el primer registro en el Caribe colombiano del género *Oxynoe*; el espécimen encontrado presenta características morfológicas externas que se asemejan a la especie *O. antillarum*, la única que cuenta con una distribución cercana a Colombia, en el área de Centroamérica (Panamá) y Suramérica (Venezuela y Brasil) (**Padula**, 2008; **Caballer et al.**, 2015; **Krug et al.**, 2018). Los miembros de este género presentan una gran plasticidad fenotípica entre individuos de una misma especie, lo cual hace necesarias las descripciones de sus estructuras internas, como la rádula y el aparato reproductor e, incluso, análisis moleculares (**Krug et al.**, 2018). Todo ello debe tenerse en cuenta para continuar el estudio de este grupo de animales.

Además, se registró la segunda observación del género *Carminodoris* en el Caribe colombiano, el cual solo se conocía en el departamento de Bolívar (**Zarate et al.**, 2019); a pesar de que ambos especímenes exhiben características morfológicas externas similares, no se pudieron relacionar debido a que en este estudio no fue posible recolectar el ejemplar por motivos logísticos. Este nudibranchio se observó en sustratos de una marina internacional, por lo que en futuros estudios será importante recoger material y hacer el seguimiento de esta fauna para verificar si corresponde a una especie nativa o exótica.

Las tres especies de aplisioformas, *A. brasiliana*, *A. cervina* y *B. leachii*, presentaron un patrón de temporalidad en cuanto a los avistamientos y la época reproductiva (en el caso de *B. leachii*), entre febrero y junio, que coincidió con el primer periodo lluvioso en el Caribe colombiano y el departamento del Atlántico, el cual va de abril a mayo, lo que conlleva una disminución de los vientos alisios y del oleaje asociado a este (**Rangel-Buitrago et al.**, 2018). Esta información es preliminar, por lo que se requiere una observación sistemática en el tiempo para establecer dicho patrón, así como estudios que ayuden a entender el comportamiento de los aplisioformas en los periodos secos y lluviosos en el área de estudio.

Con las cinco nuevas observaciones de babosas de mar presentadas en este trabajo, se aumenta el número de especies conocidas del departamento del Atlántico. Esta información se suma a los inventarios recientes de moluscos y otros grupos de organismos como medusas, corales, anémonas, ctenóforos, equinodermos, ascidias y peces (ver **Durán-Fuentes et al.**, 2018; **Durán-Fuentes et al.**, 2020; **Gracia & Rangel-Buitrago**, 2020; **Gracia et al.**, 2021; **Durán-Fuentes et al.**, 2021; **Durán-Fuentes et al.**, 2022), que aportan información sobre la presencia de diversas especies nativas y otras posiblemente exóticas en el área de estudio. Ello permitirá establecer la verdadera riqueza en esta parte del Caribe colombiano, considerada anteriormente como poco diversa y de bajo interés por la influencia del río Magdalena.

En cuanto a los estudios documentados y revisados en la bibliografía sobre el departamento, estos se centran en proyectos de estudio de la macrofauna de la plataforma continental, con registros de heterobranquios a profundidades mínimas de 30 m y máximas de 651 m (**Gracia et al.**, 2004; **Yidi & Sarmiento**, 2011), por lo que el presente trabajo es el primero en aportar información sobre el grupo en la zona intermareal y en aguas someras de hasta aproximadamente 2 m de profundidad.

Un fenómeno observado en la localidad de Caño Dulce fue la extracción indirecta de algunas especies de aplisioformas como *B. leachii* y *A. brasiliana* por parte de pescadores. Estos organismos, atrapados durante las faenas de pesca en las redes de trasmallo,

se abandonan en la playa donde finalmente mueren, lo que se debe a la creencia de los pescadores de que estas especies son venenosas por la tinta oscura (morada) que expulsan. Esta situación también se repite con medusas, otros moluscos y equinodermos. Nuestras observaciones reflejan la importancia de conocer la fauna y darle un mejor manejo, sobre todo en los entornos donde se realizan actividades de pesca y se promueve el turismo.

Conclusiones

Se aportó un 29,4 % de nueva información al conocimiento sobre la riqueza de heterobranquios marinos en el departamento del Atlántico, incluidas cinco nuevas observaciones de especies en el área de estudio y el primer registro del género *Oxynoe* en el Caribe colombiano. Además, se agregaron las localidades de Caño Dulce, Puerto Velero y Puerto Caimán al ámbito de distribución conocido de las especies de heterobranquios en el departamento. Es importante ampliar el área de estudio para explorar otras localidades, profundidades, y sustratos; incluso debe recolectarse material biológico para establecer los cimientos de una colección de referencia formal de este grupo de organismos. Estos hallazgos permitirán diseñar estrategias para un mejor manejo de la diversidad marina con la ayuda de investigadores, autoridades ambientales y la población general.

Contribución de los autores

ACF: financiación del proyecto, actividades de campo, identificación del material, análisis y escritura de la información; AGC: financiación del proyecto, actividades de campo, identificación del material, análisis y escritura de la información.

Conflicto de intereses

Los autores declaramos no tener conflicto de intereses.

Agradecimientos

Al Grupo de Investigación en Geología, Geofísica y Procesos Marino-Costeros (GGPMC) de la Universidad del Atlántico; al Dr. Nelson Rangel-Buitrago por su apoyo en las actividades de campo; a la gerencia de la Marina Puerto Velero por permitirnos acceder a sus instalaciones; a Karen Begambre por su acompañamiento y colaboración en las actividades de campo, a la comunidad de pescadores de Caño Dulce, así como a los evaluadores por sus aportes para mejorar el manuscrito.

Referencias

- Ardila, N.E., Báez, D.P., Valdés, A. (2007). Babosas y Liebres de mar (Mollusca: Gastropoda: Opisthobranchia) de Colombia. *Biota Colombiana*, 8(2), 185-197.
- Bouchet, P., Rocroi, J.P., Hausdorf, B., Kaim, A., Kano, Y., Nützel, A., Parkhaev, P., Schrödl, M., Strong, E. (2017). Revised classification, nomenclator and typification of gastropod and monoplacophoran families. *Malacologia*, 61(1-2), 1-526.
- Caballer, M., Ortea, J., Rivero, N., Carias, G., Malaquias, M., Narciso, S. (2015). The opisthobranch gastropods (Mollusca: Heterobranchia) from Venezuela: an annotated and illustrated inventory of species. *Zootaxa*, 4034(2), 201-256.
- Camacho-García, Y.E., Pola, M., Carmona, L., Padula, V., Villani, G., Cervera, J.L. (2014). Diversity and distribution of the Heterobranch sea slug fauna on the Caribbean of Costa Rica. *Cahiers de Biologie Marine*, 55, 109-127.
- Caviedes, V., Camacho-García, Y.E., Cervera, J.L., Carrasco, J.C. (2019). Diversity and distribution of sea slugs (Mollusca: Gastropoda: Heterobranchia) in two sites of the Caribbean coast of Honduras. *Cahiers de Biologie Marine*, 60, 269-282.
- Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA). (2016). Plan De Acción Cuatrienal PAC 2016-2019. Atlántico frente al cambio climático.
- De Sisto, M., Crescini, R., Villalba, W., Ríos, B., Gómez, V., Mata, Y. (2016). Sacoglossos (Opisthobranchia: Sacoglossa) del estado Nueva Esparta y Los Frailes, Venezuela. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87, 42-48.

- Domínguez, M., García, F., Troncoso, J.** (2006). A new species of *Hoplodoris* Bergh, 1880 (Gastropoda: Opisthobranchia: Nudibranchia) from the Atlantic Ocean. *The Nautilus*, 120(4), 150-155.
- Durán-Fuentes, J., Gracia, A., Osorio, C., Cedeño-Posso, C.** (2018). Aporte al conocimiento de las medusas (Cnidaria: Medusozoa) en el departamento del Atlántico (Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42(162), 49-57.
- Durán-Fuentes, J. & Gracia, A.** (2020). *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz, 1865 (Ctenophora: Lobata) in a Colombian coastal lagoon. *Regional Studies in Marine Science*, 35, 101248.
- Durán-Fuentes, J., Gracia, A., Santodomingo, N.** (2021). Occurrence of the azooxanthellate coral *Phyllangia pequegnatae* (Scleractinia: Caryophylliidae) in the Colombian Caribbean Sea: hidden diversity or another invasive species? *Marine Biodiversity*, 51(34), 1-7.
- Durán-Fuentes, J., Gracia, A., González, R.** (2022). Sea anemones (Cnidaria, Anthozoa, Actiniaria) in high sedimentation environments influenced by the Magdalena River (Colombian Caribbean). *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 94(1), e20190862. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120190862>
- Galvao, H., Araujo, A., Azevedo, V., Mierelles, C., Matthews-Cascon, H.** (2015). Sea slugs (Gastropoda: Heterobranchia) from a poorly known area in North-east Brazil: filling gaps in Atlantic distributions. *Marine Biodiversity Records*, 8, 1-11.
- García, F.J. & Bertsch, H.** (2009). Diversity and distribution of the Gastropoda Opisthobranchia from the Atlantic Ocean: A global biogeographic approach. *Scientia Marina* 73(1), 153-160.
- Goodheart, J.A., Ellingson, R.A., Vital, X.G., Galvão, H.C., McCarthy, J.B., Medrano, S.M., Bhave, V.J., García-Méndez, K., Jiménez, L.M., López, G., Hoover, C.A., Awbrey, J.D., De Jesus, J.M., Gowacki, W., Krug, P.J., Valdés, A.** (2016). Identification guide to the Heterobranch sea slugs (Mollusca: Gastropoda) from Bocas del Toro, Panama. *Marine Biodiversity Records*, 9(1),1-56.
- Gracia, A., Ardila, N.E., Díaz, J.M.** (2004). Gastropods collected along the continental slope of the Colombian Caribbean during the INVEMAR-Macrofauna campaigns (1998-2001). *Iberus*, 22(1), 43-75.
- Gracia, A. & Rangel-Buitrago, N.** (2020). The invasive species *Perna viridis* (Linnaeus, 1758 - Bivalvia: Mytilidae) on artificial substrates: A baseline assessment for the Colombian Caribbean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 152, 1-6.
- Gracia, A., Durán-Fuentes, J., Santodomingo, N., Rangel-Buitrago, N.** (2021). Artificial structures as biological “influencers”: Hydrozoa and Anthozoa diversity in a Colombian Caribbean marina. *Marine Pollution Bulletin*, 173, Part B, 1-7.
- Gutiérrez, L.C., Borja, R., Troncoso, W.** (2016). Componente biológico de la unidad ambiental costera (UAC) del río Magdalena, complejo Canal del Dique – sistema lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta. CRA-UDEA. 136 p.
- Jörger, K.M., Stöger, I., Kano, Y., Fukuda, H., Kneibelsberger, T., Schrödl, M.** (2010) On the origin of Acochlidia and other enigmatic Euthyneuran gastropods, with implications for the systematics of Heterobranchia. *BMC Evolutionary Biology* 10, 323–342.
- Krug, P.J., Berriman, J.S., Valdés, A.** (2018). Phylogenetic systematics of the shelled sea slug genus *Oxynoe* Rafinesque, 1814 (Heterobranchia: Sacoglossa), with integrative descriptions of seven new species. *Invertebrate Systematics*, 32, 950–1003.
- Lewin, R.** (1970). Toxin Secretion and Tail Autotomy by Irritated *Oxynoe panamensis* (Opisthobranchiata; Sacoglossa). *Pacific Science*, 24, 356-358.
- Marín, A., Ros, J.** (2004). Chemical defenses in Sacoglossan Opisthobranchs: Taxonomic trends and evolutive implications. *Scientia Marina*, 68, 227-241.
- MolluscaBase eds.** (2021). MolluscaBase. *Aplysia cervine* (Dall & Simpson, 1901). Fecha de consulta: septiembre 8 de 2021. Disponible en: World Register of Marine Species at: <http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=420562>.
- MolluscaBase eds.** (2021). MolluscaBase. *Bursatella leachii* Blainville, 1817. Fecha de consulta: septiembre 8 de 2021. Disponible en: World Register of Marine Species at: <http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=138759>
- MolluscaBase eds.** (2021). MolluscaBase. *Oxynoe antillarum* Mörch, 1863. Fecha de consulta: septiembre 8 de 2021. Disponible en: World Register of Marine Species at: <http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=420566>
- MolluscaBase eds.** (2021). MolluscaBase. *Oxynoe azuropunctata* K. R. Jensen, 1980. Fecha de consulta: septiembre 8 de 2021. Disponible en: World Register of Marine Species at: <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=420567>.

- National Museum of Natural History (NMNH).** (2021). Search the Department of Invertebrate Zoology Collections. Fecha de consulta: entre enero y julio de 2021. Disponible en: <https://collections.nmnh.si.edu/search/iz/>
- Ocean Biogeographic Information System (OBIS).** (2021). Distribution records of *Aplysia brasiliensis* Rang, 1828. Fecha de consulta: septiembre 9 de 2021. Disponible en: <https://obis.org/taxon/160029>
- Ocean Biogeographic Information System (OBIS).** (2021). Distribution records of *Aplysia cervina* (Dall & Simpson, 1901). Fecha de consulta: septiembre 9 de 2021. Disponible en: <https://obis.org/taxon/420562>
- Ortega, J.** (2016). Una segunda especie atlántica del género *Hoplodoris* Bergh, 1880 (Mollusca: Nudibranchia) colectada en Martinica, Antillas Menores. *Revista de la Academia Canaria de Ciencias*, 28, 201-208.
- Padula, V.** (2008). Notes on the morphology of *Elysia subornata* and *Oxynoe antillarum* (Mollusca, Opisthobranchia, Sacoglossa) from the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Strombus*, 15(2), 19-25.
- Ponder, W., Lindberg, D., Ponder, J.** (2020). Biology and Evolution of the Mollusca. Volumen one, 1st edition. CRC Press. 924p.
- Posada, B. & Henao, W.** (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. Santa Marta, Colombia. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 13.
- Rangel-Buitrago, N., Gracia, A., Vélez-Mendoza, A., Mantilla-Barbosa, E., Arana, V., Trilleras, J., Arroyo-Olarte, H.** (2018). Abundance and distribution of beach litter along the Atlantic Department, Caribbean coast of Colombia. *Marine Pollution Bulletin*, 136, 435–447.
- Restrepo-López, J., Ortiz-Royero, J., Otero-Díaz, L., Ospino-Ortiz, S.** (2015). Transporte de sedimentos en suspensión en los principales ríos del Caribe colombiano: magnitud, tendencias y variabilidad. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(153), 527-546.
- Rivero, N., Martínez, R., Pauls, S.** (2003). Especies de *Aplysia* (Mollusca, Opisthobranchia, Aplysiidae) de las costas de Venezuela. *Acta Biológica Venezuelica*, 23(1), 23-32.
- Sistema de Información sobre Biodiversidad Marina (SiBM).** (2021). Registros biológicos marinos. Fecha de consulta: enero y julio de 2021. Disponible en: <https://siam.invemar.org.co/sibm-busqueda-avanzada>
- Valdes, A., Hamann, J., Behrens, D.W., Dupont, A.** (2006) Caribbean sea slugs. A field guide to the Opisthobranch mollusks from the tropical northwestern Atlantic. Gig Harbor, Washington: Sea Challengers Natural History Books. 289 p.
- World Register of Marine Species (WoRMS).** (2022). Heterobranchia. Fecha de consulta: abril 23 de 2022. Disponible en: <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=14712>
- Yidi, E. & Sarmiento, V.** (2011). Colombian Seashells from the Caribbean Sea. Italy. L'Informatore Picensino. 384 p.
- Zamora-Silva, A. & Naranjo-García, D.** (2008). Los opistobranquios de la Colección Nacional de Moluscos. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 79, 333-342.
- Zarate, C., Coneo-Gómez, Sh., Puyana, M.** (2019). First record of the genus *Carminodoris* Bergh, 1889 (Gastropoda: Opisthobranchia: Nudibranchia: Doridoidea: Discodorididae) in the Colombian Caribbean. *Bulletin of Marine and Coastal Research*, 48(2), 33-43.

Artículo original

Relación histórica de dos pioneros de la biogeografía tropical en la cordillera de los Andes: Alexander von Humboldt y Francisco José de Caldas

Historical account of two pioneers of tropical biogeography in the Andes: Alexander von Humboldt and Francisco José de Caldas

 Alberto Gómez-Gutiérrez

Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Artículo de posesión como Miembro de Número, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

Los perfiles biogeográficos producidos en 1802 y 1803 por Alexander von Humboldt y Francisco José de Caldas pueden considerarse como infografías sincrónicas, aunque disímiles. Ambas síntesis gráficas habrían surgido de un dibujo fundacional: la nivelación barométrica que Humboldt trazó cuando viajaba de Cartagena a Santafé por el río Magdalena, antes de su primer encuentro con Caldas. Se postula aquí que este perfil barométrico de Humboldt es la imagen que, una vez compartida, desencadenó un estimulante contrapunto y llevó a ambos viajeros a elaborar perfiles propiamente fitogeográficos -no solo geográficos-, centrados en los volcanes Chimborazo e Imbabura, respectivamente. Este artículo presenta evidencias epistolares e iconográficas que apoyan tal apreciación, y discute las influencias recíprocas de estos dos viajeros naturalistas, así como la asimetría que se presentó en su difusión y apropiación en la historia de la ciencia y la biogeografía.

Palabras clave: Biogeografía; Nivelación barométrica; Alexander von Humboldt; Francisco José de Caldas; Cordillera de los Andes.

Abstract

We postulate here that the biogeographical profiles produced in 1802 and 1803 by Alexander von Humboldt and Francisco José de Caldas should be understood as synchronic, albeit dissimilar, infographics. Both graphic syntheses would have emerged from a foundational drawing: the barometric leveling that Humboldt drew when he traveled from Cartagena to Santafé along the Magdalena River, before his first meeting with Caldas. It is postulated that this barometric profile by Humboldt is the image that, once shared, triggered a stimulating counterpoint, and led both travelers to elaborate proper phyto-geographical -not just geographical- profiles centered on the Chimborazo and Imbabura volcanoes, respectively. We show epistolary and iconographic evidence to support this assessment and discuss the reciprocal influences of these two naturalist travelers, as well as the asymmetry in their diffusion and appropriation in the history of science and biogeography.

Keywords: Biogeography; Barometric leveling; Alexander von Humboldt; Francisco José de Caldas; Andes Mountains.

Citación: Gómez-Gutiérrez A.
Relación histórica de dos pioneros de la biogeografía tropical en la cordillera de los Andes: Alexander von Humboldt y Francisco José de Caldas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):438-459, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1679>

Editor: Elizabeth Castañeda

Correspondencia:
Alberto Gómez-Gutiérrez;
alberto.gomez.gutierrez@gmail.com

Recibido: 27 de abril de 2022

Aceptado: 23 de mayo de 2022

Publicado: 28 de junio de 2022



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

Caldas, al igual que Forster, Willdenow y Goethe, es una figura importante en el desarrollo de las ideas de Humboldt sobre la geografía de las plantas [que] estaban bien desarrolladas cuando [el prusiano] conoció a Caldas. Sin embargo, pasaron varias semanas juntos, durante las cuales Caldas intercambió sus conocimientos sobre la vegetación, el clima y la geografía de los Andes centrales por las ideas conceptuales de Humboldt sobre la geografía vegetal y sus conocimientos (y los de Bonpland) sobre la clasificación de las plantas. Estas discusiones, y las excursiones que hicieron juntos en la región, pueden haber cristalizado la decisión de Humboldt de utilizar los Andes como la región ideal para ilustrar sus ideas (por ejemplo, en el perfil del Chimborazo).

Stephen T. Jackson (2009, pp. 13-14).

A mediados del siglo pasado, Pablo Vila i Dinarès (1881-1980), geógrafo, pedagogo y catedrático español radicado en Colombia y Venezuela, publicó en esta misma *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* una primera aproximación a lo que él denominó “los orígenes eurocriollos de la geobotánica”.¹ En su texto reivindicaba la simultaneidad (o eventual colaboración) en torno al concepto pionero de la biogeografía que fue propuesto a comienzos del siglo XIX en el norte de Suramérica por Alexander von Humboldt (1769-1859) y Francisco José de Caldas (1768-1816).

En la historia de la ciencia, la coincidencia de hallazgos se ha estudiado bajo el concepto de “descubrimientos múltiples”, en la medida en que han sido planteados por investigadores independientes (Merton, 1963).² Este concepto contrasta con la teoría heroica que ha pretendido asociar determinados hallazgos a la mente de un único individuo. Dos casos emblemáticos de descubrimientos múltiples y eventualmente simultáneos en la ciencia son el de Isaac Newton (1643-1727) y Gottfried Leibniz (1646-1716) en el cálculo infinitesimal, y el de Charles Darwin (1809-1882) y Alfred Russel Wallace (1823-1913) en sus postulados sobre la evolución de las especies por selección natural.

El grado de reconocimiento público de esta simultaneidad y protagonismo ha variado, pero es evidente que el imaginario popular registra preferentemente relaciones biunívocas individuales entre los descubrimientos y sus postulantes, con algunas excepciones notables como la de James Watson (1928-) y Francis Crick (1916-2004) en torno al descubrimiento de la estructura en doble hélice de la molécula del ADN, aun dejando usualmente de lado al tercer premio Nobel por este hallazgo, Maurice Wilkins (1916-2004), así como a Rosalind Franklin (1920-1958) y a Linus Pauling (1901-1994), quienes participaron muy de cerca en este descubrimiento. En efecto, Wilkins mostró a Crick la foto número 51 tomada por Franklin en su laboratorio de difracción de rayos X, y en consecuencia, el mérito de haber inspirado a Watson y Crick para su modelo de la estructura del ADN se le debe a Rosalind Franklin.

Antes de entrar a considerar el caso del binomio Humboldt-Caldas postulado por el profesor Vila hace más de seis décadas como referente pionero de la biogeografía, y atendiendo a sus hipótesis, debe anotarse que, en efecto, la simultaneidad o sincronicidad de una teoría puede resultar de influencias recíprocas de lo que se podría proponer metafóricamente en el dominio de la botánica como una “polinización cruzada”. El impacto de las ideas de un científico sobre las ideas de uno o varios de sus pares es hoy cada vez más posible en un mundo globalizado, pero podía ya ocurrir en el pasado en función de encuentros personales o epistolares, o bien en función de lecturas compartidas. La fertilización de la imaginación es y ha sido posible en la ciencia gracias a la interacción, o interrelación, que Humboldt mismo denominó en su idioma materno *Wechselwirkung*, en la medida en que, decía el prusiano, todo está interconectado.

Sin embargo, la ciencia de la biogeografía —o el estudio de las distribuciones de los organismos en el espacio y el tiempo—,³ se remite usualmente a un solo referente individual popular y representativo: Alexander von Humboldt. Este naturalista ha sido considerado como el pionero solitario de esta teoría (su “inventor”, dirían algunos), seguido en orden

cronológico, según sus respectivas fechas de nacimiento y publicación (Ebach, 2015; Williams & Ebach, 2008; Lomolino *et al.*, 2006; Lomolino *et al.*, 2004) por Friedrich Stromeyer (1776-1835) con su *Commentatio inauguralis sistens historiae vegetabilium geographiae specimen* (1800), Augustin Pyramus de Candolle (1778-1841) con un *Essai élémentaire de géographie botanique* (1820), Hewett C. Watson (1804-1881) con su obra en cuatro volúmenes *Cybele Britannica: or British plants and their geographical relations* (1847-1859), y Alfred Russel Wallace (1823-1913) con *The geographical distribution of animals* (1876).⁴

La obra que ha situado a Humboldt como pionero de la biogeografía fue publicada entre 1805 y 1807 en París con el título de *Essai sur la géographie des plantes*. El prusiano reconoce en su prefacio algunos momentos preliminares decisivos de su descubrimiento asociados a Georg Forster (1754-1794), a quien habría comunicado “el primer esbozo de una Geografía de las Plantas” desde 1790 (Humboldt & Bonpland, [1805] 1807, p. VI), seguido de Augustin P. de Candolle y Louis-François Ramond de Carbonnières (1755-1827), que le habrían proporcionado “material interesante sobre la geografía de las plantas de los Altos Alpes [y] sobre la flora de los Pirineos” (*Ibidem*, p. IX). Humboldt cita también de manera explícita a su amigo y maestro Carl Ludwig Willdenow (1765-1812). Según Humboldt, los eruditos franceses le habrían cedido algunas mediciones y correcciones a diferentes escalas para la primera versión impresa del *Tableau physique* publicada en Europa (*Ibidem*, p. VIII), tal y como lo registró para el barón Ramond de Carbonnières:

Pero tal vez nadie esté mejor cualificado para trabajar con éxito en la geografía de las plantas alpinas de Europa que el Sr. Ramond, quien durante tantos años ha escalado las más altas cumbres de los Pirineos y quien combina la capacidad de unir los conocimientos geognósticos, botánicos y matemáticos con las observaciones filosóficas de la naturaleza (Humboldt & Bonpland, [1805] 1807, p. 71).⁵

Alexander von Humboldt dejó de lado en este relato los trabajos del abate Jean-Louis Giraud-Soulavie (1751-1813), quien ya había publicado un perfil biogeográfico que informaba sobre las variaciones del clima y la vegetación en función de la altitud en su obra de siete volúmenes titulada *Histoire naturelle de la France méridionale* (1780-1784), con énfasis en los olivos, las vides y los castaños —en orden barométrico ascendente—, todo ello por debajo de los límites de los “grandes árboles alpinos” (Giraud-Soulavie, 1782) (Figura 1).⁶ En América del Norte, Humboldt cita el precedente de Benjamin Smith Barton (1766-1815), médico y viajero “que trabaja incesantemente en la zoología, la botánica y la lingüística de los indios, [y] se dedica actualmente a estas mismas investigaciones para las regiones templadas de los Estados Unidos” (Humboldt & Bonpland, [1805] 1807, p. 79). No hay una sola referencia humboldtiana a los trabajos preliminares sobre biogeografía de América Central o América del Sur, como argumentaré más adelante.

Pero volvamos por un momento al reconocimiento escrito de Humboldt sobre su comunicación preliminar a Georg Forster de su “primer esbozo de una Geografía de las Plantas” ya en 1790; este reconocimiento requiere dos aclaraciones: 1) Forster, su primer coetáneo en el ámbito de la geografía vegetal (según su propio reporte), era hijo de Johann Reinhold Forster (1729-1798), naturalista y pastor luterano prusiano al que Georg había acompañado en el segundo viaje de James Cook (1728-1779) por el océano Pacífico entre 1772 y 1775; 2) a su regreso a Inglaterra, Forster (el padre) publicó sus *Observations made during a voyage round the world, on physical geography, natural history, and ethic philosophy* (1778), en las que incluyó una de las primeras representaciones sistemáticas de diversas regiones bióticas, apoyando el planteamiento de Georges Louis Leclerc, conde de Buffon (1707-1778) —postulado actualmente denominado Ley de Buffon—, según el cual las regiones aisladas contienen plantas y animales que varían en función de su distancia respecto a un hipotético nodo original. Así, el “primer esbozo” comunicado en 1790 por Alexander von Humboldt a su amigo Georg Forster, podría haber surgido de una inspiración propiamente forsteriana. De hecho, el propio Reinhold Forster complementó la ley de Buffon con un concepto novedoso, señalando la tendencia decreciente de la diversidad vegetal desde el

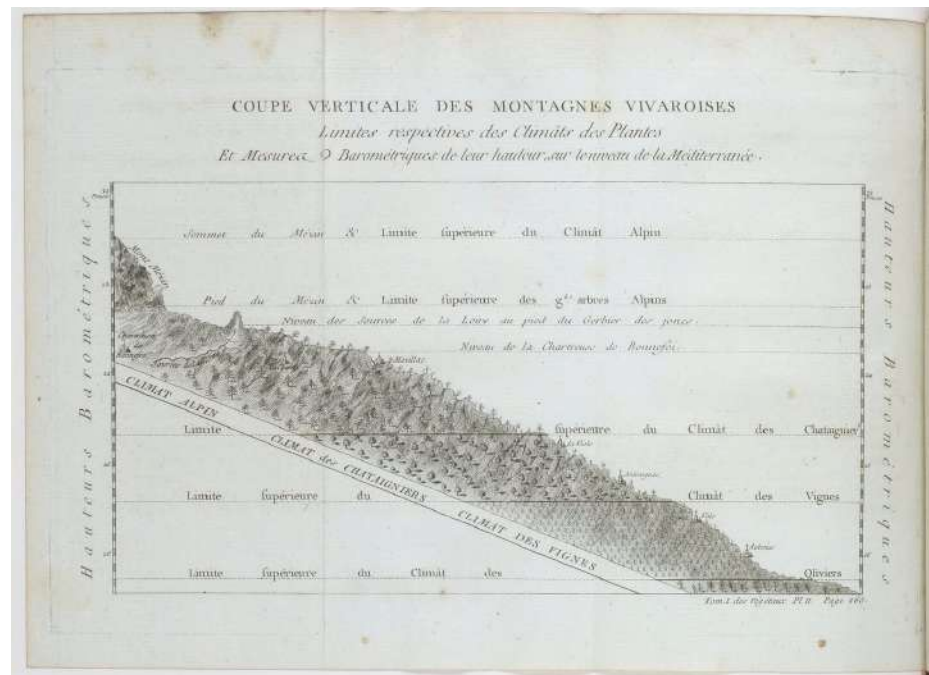


Figura 1. Jean-Louis Giraud-Soulavie. Coupe verticale des montagnes vivaraises. Limites respectives des climats des plantes et mesures barométriques de leur hauteur, sur le niveau de la Méditerranée. (Giraud-Soulavie, J. L. (1782, I, lámina II, 264-265), en <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k10415877/f9.item> –Bibliothèque Nationale de France).

ecuador hacia los polos en función de la variación de la temperatura según la latitud. Todo esto lo había publicado ya desde 1778 el padre de su joven amigo (**Lomolino et al., 2004; Forster, 1778**).⁷

Además, éste no fue el único antecedente para Humboldt en su propia patria y en sus años de juventud previos a su viaje a América. También hay que tener en cuenta las lecciones aprendidas de Willdenow, uno de sus principales contactos botánicos y su mentor en Berlín antes (y después) de su viaje americano, a quien Humboldt cita explícitamente en su Prefacio al *Essai sur la géographie des plantes*: “Consulté los otros clásicos del Sr. Willdenow. Era importante comparar los fenómenos de la vegetación ecuatorial con los de nuestro suelo europeo” (**Humboldt & Bonpland, [1805] 1807, p. IX**).⁸

Al lado de los Forster y de Willdenow, hay que valorar en profundidad la influencia de Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832) en la representación estética de las ideas biogeográficas de Humboldt. En efecto, Goethe, a quien Humboldt visitó al menos dos veces antes de viajar a América, ya había publicado dos obras de referencia sobre la “Naturphilosophie” y la botánica: *Einfache Nachahmung der Natur* (1789) y *Die Metamorphose der Pflanzen* (1790). En ellas, así como en sus conversaciones personales con los hermanos Humboldt y con Friedrich Schiller (1759-1805) en Jena, Goethe insistió en la importancia de la observación directa, íntima y sensible de los fenómenos naturales, conectando razón y emoción, poesía y estética, en lo que se ha definido como “empirismo delicado: observación – reflexión – asociación” (**Buttimer, 2012, p. 26**).

El vínculo de Humboldt con Goethe en este ámbito es evidente, y una de sus pruebas post-americanas más significativas es que Goethe, al recibir el ejemplar impreso de *Ideen zu eine Geographie der Pflanzen* (1807), que el propio Humboldt le había dedicado, elaboró y correspondió a su autor una versión alternativa del “*Naturgemälde*” o “*Tableau physique*”, centrada en el Chimborazo, comparando la geografía de Europa con la de América (**Figuras 2 y 3**):

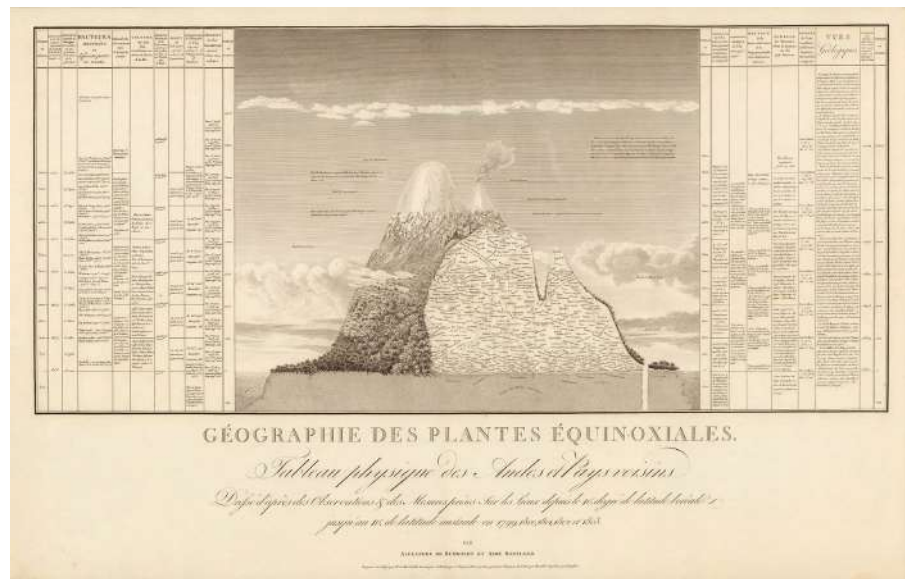


Figura 2. Alexander von Humboldt. Géographie des plantes équinoxiales. Tableau physique des Andes et pays voisins. Dressé d’après des observations & des mesures prises sur les lieux depuis de 10° degré de latitude boréale jusqu’au 10° degré de latitude australe en 1799, 1800, 1801, 1802 et 1803 [...]. (Humboldt, A. (1807), en: https://www.davidrumsey.com/luna/servlet/detail/RUMSEY~8~1~280014~90053203:Geographie-des-Plantes-Equinoxiales?sort=pub_list_no_initialsort%2Cpub_date%2Cpub_list_no%2Cseries_no&qvq=q:humboldt;sort:pub_list_no_initialsort%2Cpub_date%2Cpub_list_no%2Cseries_no;lc:RUMSEY~8~1&mi=13&trs=351.)



Figura 3. Johann Wolfgang von Goethe. Tableau comparatif des altitudes de l’Ancien et du Nouveau Monde. Goethe, J. W. (1807), en https://www.davidrumsey.com/luna/servlet/detail/RUMSEY~8~1~289894~90068519:View--Esquisse-des-Principales-Haut?sort=pub_list_no_initialsort%2Cpub_date%2Cpub_list_no%2Cseries_no&qvq=q:humboldt;sort:pub_list_no_initialsort%2Cpub_date%2Cpub_list_no%2Cseries_no;lc:RUMSEY~8~1&mi=11&trs=351#.

He leído el volumen varias veces con gran atención y he empezado, incluso sin el prometido diagrama transversal, a imaginarme un paisaje en el que, a una escala de 4.000 toesas (aprox. 8.000 m) por página, se esbozan las alturas de las montañas europeas y americanas una al lado de la otra; también se esbozan las líneas de nieve y la vegetación. Le adjunto una copia de este boceto, en parte por diversión, en parte en serio, y le pido que haga correcciones en él con pluma y con colores si quiere, y también que haga algunas anotaciones en esta página y me la devuelva lo antes posible (Goethe, 1807, citado en Buttimer, 2012, p. 28).

Años más tarde, en una carta a la cuñada de Schiller, Caroline von Wolzogen (1763-1847), Humboldt dejó constancia clara de la influencia de Goethe en su percepción y representación de la naturaleza:

En las selvas del Amazonas, como en las cumbres de los Andes, tuve la sensación de que la vida misma se infiltraba en las rocas, las plantas y los animales, así como en el amplio pecho de la humanidad, como animada de polo a polo por un único espíritu. *En todas partes sentí profundamente la poderosa influencia que tenían ahora esas relaciones forjadas en Jena, y – gracias a la perspectiva de Goethe sobre la naturaleza – adquirí prácticamente nuevos órganos de percepción* (Humboldt, 1806, citado en Buttimer, 2012, pp. 25-28).⁹

Otro precursor alemán fundamental para la biogeografía humboldtiana es Eberhard August Wilhelm von Zimmermann (1743-1715) con su *Specimen zoologiae geographicae quadrupedum* (1777), también mencionado explícitamente por Humboldt en su *Essai* de 1807:

La obra clásica del Sr. Zimmerman indica la patria de los animales, según la diferencia de las alturas que habitan. Sería interesante fijar en un perfil las diferentes alturas a las que se elevan bajo una misma latitud (Humboldt & Bonpland, [1805] 1807, pp. 138-139).

En el borrador manuscrito del *Essai sur la géographie des plantes* que Humboldt envió a José Celestino Mutis (1732-1808) desde Guayaquil en febrero de 1803, mientras viajaba de Lima a Acapulco en medio de su periplo americano por territorios colonizados y descolonizados de los imperios español y británico, respectivamente.¹⁰ La obra de Zimmermann aparece ya como una referencia clave en zoogeografía: “Esta escala de animales es fragmento de un mapa semejante al que representa los vegetales de los Andes y es parte de una obra con que se completará la excelente *Geographia animalium*, que publicó Mr. Zimmerman” (Humboldt, [1803] 1809, p. 163). Mutis fue el director de la Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada desde 1783 y, a la postre, el naturalista europeo establecido en el siglo XVIII en América del Sur más conocido, como lo calificó el taxónomo sueco Carl Linneo (1707-1778).¹¹

Siguiendo una referencia de Francisco José de Caldas –uno de los naturalistas, matemáticos y geógrafos autodidactas neogranadinos que conoció a Humboldt en el primer semestre de 1802–,¹² incluida en su *Memoria sobre el plan de un viaje de Quito a la América septentrional* enviada a José Celestino Mutis entre abril 21 y mayo 6 de 1802, puede deducirse que Humboldt ya le había referido a Caldas personalmente los trabajos de Zimmermann sobre zoogeografía, ya que el payanés afirma, en la sección “Zoología” de su *Memoria*: “El señor Barón me ha dicho que un sabio, cuyo nombre no tengo en mente, ha comenzado a trabajar en este asunto: sus observaciones, sus ideas perfeccionarían las nuestras, y nuestros trabajos serían apreciados como los primeros de esta especie en América”.¹³

Sin embargo, en medio de todas las referencias explícitas de Humboldt a trabajos biogeográficos anteriores o simultáneos en Estados Unidos y Europa, Caldas brilla por su ausencia. Por alguna razón, Humboldt quiso contar con Mutis como par, enviándole su primer manuscrito y su primer diseño gráfico sobre la geografía de las plantas a través de Caldas dejando absolutamente de lado a este ilustrado neogranadino –sin mención alguna de los trabajos biogeográficos que había compartido ya con el payanés– en el proceso de elaboración de la teoría cuyo primer manuscrito conocido firmaría en febrero de 1803, mientras esperaba la salida del barco que llevaría su expedición a Acapulco. El propio Humboldt se refirió a este momento en su publicación *Essai sur la géographie des plantes*:

Este *Tableau* lo dibujé por primera vez en el puerto de Guayaquil, en febrero de 1803, cuando regresaba de Lima por el Mar del Sur, y cuando me disponía a navegar hacia Acapulco. Envié una copia de este primer boceto al señor Mutis en Santa Fe de Bogotá, quien me honra con una particular amabilidad. Nadie estaba en mejores condiciones que él para pronunciarse sobre la exactitud de mis observaciones, y para ampliarlas con las suyas propias, obtenidas a lo largo de 40 años de viajes por el Reino de la Nueva Granada [...] *Ningún otro botánico tuvo más oportunidades de hacer observaciones importantes sobre la geografía de las plantas, pues durante la recolección de éstas hizo siempre mediciones altimétricas y ha subido muchas veces a las altas cumbres de las cordilleras [...]* (Humboldt & Bonpland, 1805 [1807], pp. 44-45).¹⁴

En el manuscrito original de esta obra, enviado a los editores parisinos del *Essai* en 1805 con la letra de Bonpland y varias correcciones de Humboldt al margen,¹⁵ puede observarse que Mutis fue alabado más adelante, y luego rebajado y minimizado. Después de afirmar que “nadie estaba en mejor posición que él para juzgar la exactitud de mis observaciones, y para ampliarlas con sus propias observaciones obtenidas en el espacio de 40 años de viajes en el reino de la Nueva Granada”, Humboldt incluyó una frase muy significativa, que luego tachó y eliminó de la versión definitiva publicada en París y Tubinga: “Este gran botánico que, a pesar de su distancia de Europa, siguió los progresos de nuestra física [y *que combina los vastos conocimientos de un naturalista con los de un distinguido geómetra*], el señor Mutis observó [...]” (Humboldt, 1805/1806, ff. 8-9).¹⁶ Solo la botánica debía asociarse con Mutis, nada de “geometría distinguida” ni de geografía en la mente de su par: Mutis no debía ser exaltado como uno de los precursores en el campo de la biogeografía por Humboldt. La “geografía” de las plantas debía introducirse como un asunto prusiano original, en el que solo podían tener cabida algunos precursores más o menos relevantes elegidos en Europa. Tampoco se menciona a Caldas como “distinguido geómetra”, aunque este payanés había sido ya alabado como tal por el prusiano. Así lo reportó el propio Caldas en una carta a su amigo y pariente Santiago Arroyo: “Llegamos a Ibarra, comimos con [Humboldt, quien] se dirigió públicamente a mí y me dijo: ‘He visto sus preciosos trabajos en astronomía y geografía. Me los han enseñado en Popayán. He visto las alturas correspondientes tomadas con tal precisión que la mayor diferencia [con las mías] no es más de cuatro segundos’” (Caldas, [1802a, pp. 130-131).

En agradecimiento a Mutis, Humboldt le dedicó este primer manuscrito de Guayaquil, como consta en su subtítulo original, publicado en español por Caldas en la página 121 de la edición del 23 de abril del *Semanario del Nuevo Reyno de Granada* (1809): “Dedicado con la más profunda gratitud al ilustre Patriarca de los Botánicos, Don José Celestino Mutis, por Federico Alexandro Barón Humboldt”. Pero esta inscripción sería efímera, y los “sentimientos del más profundo reconocimiento” se desvanecerían del corazón de Humboldt en medio de las brumas vespertinas de su viaje transatlántico de regreso a casa, ya que la primera edición impresa del *Essai* en Francia, en 1807, sería finalmente dedicada a los botánicos Antoine-Laurent de Jussieu (1748-1836) y René Desfontaines (1750-1833), y su primera edición alemana a Johann Wolfgang von Goethe. Sin embargo, debe señalarse que Humboldt y Bonpland dedicarían a Mutis, sí, pero posteriormente, justo antes de morir en 1808, el primer volumen de sus *Plantes équinoxiales*:¹⁷ un reconocimiento por sus trabajos botánicos, no geográficos y mucho menos *biogeográficos*.

Más allá de esta descortesía de Humboldt hacia Mutis obliterándolo de su dedicatoria inicial, el mencionado geógrafo Vila i Dinarès centró su crítica en el desprecio adicional de Humboldt hacia Caldas, y afirmó en su artículo que, cuando Caldas comentó al prusiano su propio método hipsométrico, “el Barón debió darse cuenta de que aquel criollo se hallaba en el camino de establecer las relaciones existentes entre las plantas, su temperatura y la altitud, lo cual no dejó de sorprenderle”. Y prescribe Vila: “Ambos se encontraron en la vía de los mismos estudios geobotánicos” (Vila, 1960, p. XVII-XVIII). Podemos afirmar hoy –con suficiente perspectiva– que Humboldt y Caldas se encontraron sobre este asunto, muy sorpresivamente, en un silencio explícito; ambos en silencio en medio de la muy característica elocuencia decimonónica: un silencio, pues, muy elocuente.

Un elemento especialmente paradójico que señaló Vila es que Humboldt había escrito una carta desde Lima, el 25 de noviembre de 1802, al astrónomo y matemático francés Jean-Baptiste Joseph Delambre (1749-1822) –y no a un botánico– solo seis meses después de su despedida de Caldas tras haber trabajado con él codo a codo en Quito. En esta carta Humboldt se refiere a “Mutis, [el] presidente de la [Audiencia de Quito,] Montúfar, [y] no a Caldas”, a pesar de afirmar en esta carta que “no hay vegetal del que no podamos indicar la roca que habita y la altura en toesas a la que se eleva; hasta tal punto que la geografía de las plantas tendrá en nuestros manuscritos datos muy exactos” (Vila, 1960, p. XVII). Este tema, como puede deducirse de la conversación Humboldt-Caldas ya referida sobre la zoogeografía de Zimmerman, pudo haber sido tratado por ambos en los días de su convivencia en el primer semestre de 1802, con la hipotética consecuencia de que Caldas, como dice Joaquín Acosta en su nota al pie de la impresión en París de la *Memoria sobre el plan de un viaje* de Caldas en 1849, procediera a “fecundar[lo] a su modo” (Caldas, 1802b, p. 559).

Ahora bien, antes de esta eventual fecundación caldasiana de un metafórico gameto conceptual humboldtiano, hay que considerar al menos cuatro párrafos preliminares de la sección “Botánica” de la *Memoria* de Caldas, que son críticos para sustentar el grado de originalidad de sus propias elaboraciones prácticas y teóricas antes de la eventual hibridación de sus ideas con las del viajero prusiano:

Yo siempre he visto con fastidio una carta en que no se leen sino nombres de pueblos miserables. Mas vale ver en ella el lugar, la patria de una planta, de un mineral, de una especie de animales, de una fuente termal, etc., que ese montón de nombres barbaros que apenas podemos pronunciar. En este momento ¡que bello, que interesante sería poner al frente de la *Flora de Bogota* una carta botánica del reino!, que así quiero llamar una carta en que, suprimiendo tanto pueblo oscuro, tantos arroyos de ninguna consideracion, se sustituyeren en su lugar las plantas útiles a las artes, al comercio, a la salud. ¡Qué placer ver de una ojeada la patria del cacao, del té, de la nuez moscada, del almendron, de la quina, etc.! ¡Que bella fachada para el templo de Flora! En el discurso de este viaje se podia empezar a echar los fundamentos de este vasto edificio.

En este género he trabajado mucho, y el fruto mas precioso que he sacado es cierto habito de ver, de medir y de diseñar los paisés con facilidad. Mis materiales para la carta de la Plata á Popayan, la topografía de esta y los del camino para Quito, se pueden añadir a la de nuestro viaje, que completaremos con mis trabajos sobre la parte alta del Magdalena, desde Tocayma hasta su origen. De este modo, sin mendigar nada, podremos presentar la carta de un gran círculo, en cuya circunferencia esten Santa Fé, Popayan, Quito, Guayaquil, Sonzonate, Méjico, Veracruz, Habana, Puerto-Rico, Cartagena, Honda, Santa Fé.

Nada he manifestado al Sr. Baron de estos materiales, á excepcion de la carta de Timaná, que es uno de mis primeros ensayos. Una de las cosas que he notado en los trabajos geograficos de este sabio, es que mezcla lo cierto con lo dudoso, que, deseoso de abrazarlo todo, diseña allado de un retazo digno de d’Anville, otro por simples relaciones de gentes ignorantes. No soy el Zoilo de este grande hombre, detesto el vicio de deprimir los trabajos ajenos, pero es preciso decir la verdad, y creo que los geógrafos posteriores tendran que corregir bastante, no en los lugares que haya examinado este viajero célebre, sino en los que esten levantados por puras relaciones. Siento esta mezcla, y deseo que en su publicacion se separe con alguna nota lo dudoso de lo cierto. De otro modo no podremos conocer los progresos que ha hecho la geografía con este viaje al rededor del mundo. Nosotros distinguiremos, ó hablando con verdad, no presentaremos en este ramo sino lo cierto, lo que háyamos visto por nuestros propios ojos, y no dudo que haremos dar un paso á nuestra geografía, que aun está en la cuna.

[...] ¡Qué curioso, qué digno de Mutis sería notar las elevaciones en que se crian las plantas y, al tiempo que en la soberbia *Flora de Bogota*, se diga: habita en Quito se añade de un modo preciso: á tantas toesas de elevacion sobre el mar! Las muchas ocasiones que se nos van a presentar de hacer este género de observaciones pueden dar a esta idea toda la perfeccion de que es capaz. El barómetro se sostiene en el límite de la nieve a 16 pulgadas, en el mar a 28 ó cerca: la diferencia son 12 pulgadas. *¿No sería nuevo y al mismo tiempo hermoso dividir en 12 zonas, de una pulgada en el barómetro de ancho cada una, toda la parte de la tierra que es capaz de vegetar? ¿No sería nuevo asignar á cada planta sus límites, y de un modo lacónico y exacto decir: habita en la zona primera, habita desde la tercera hasta la quinta y así de las demas? Yo he proyectado unas nivelaciones barométrico-botánicas semejantes á las que el Sr. baron de Humboldt ha construido con solo el objeto de dar idea de las diversas alturas del*

terreno. Las divido en doce zonas que no seran iguales en anchura, porque las superiores irian gradualmente aumentando su elevacion, y coloco en cada una las plantas que vegetan en ella. Si alguna crece en dos, tres ó mas, se pone en la inferior y en la última, y esto anuncia que prospera en las intermedias. Esta idea me toca, la creo nueva y digna de ensayarse (Caldas, 1802c, pp. 553-556).¹⁸

Caldas no le había “manifestado al Sr. Baron [nada] de estos materiales” (a excepción del mapa de Timaná), y había “proyectado unas nivelaciones barométrico-botánicas semejantes á las que el Sr. baron de Humboldt ha construido *con solo el objeto de dar idea de las diversas alturas del terreno*”.¹⁹ Quiere decir esto que Caldas consideraba, con fundamento —y hasta esa fecha en el primer semestre de 1802—, que Humboldt solo había elaborado nivelaciones barométricas, no *barométrico-botánicas*. Y, en efecto, no se conoce ningún diseño gráfico, ninguna iconografía relacionada con la geografía de las plantas en los manuscritos prusianos antes de sus primeros encuentros con Caldas, aunque Humboldt había hecho ya varias observaciones manuscritas sobre la fitogeografía en sus diarios a partir de 1799. Este hecho se puede corroborar enfrentando de un lado las primeras nivelaciones geográficas americanas de Humboldt, tal y como aparecen grabadas en su publicación de 1802 “Barometrische Nivellirung der Gegend zwischen Cartagena und Santa Fé” (Humboldt, 1802a),²⁰ y del otro el “Tableau physique” hecho y coloreado a mano que Humboldt envió a Mutis a través de las manos de Caldas en febrero de 1803.

Se debe considerar en este punto la importancia del diseño y aplicación de un modelo que el propio Caldas consideraba “nuevo” (y original) en aquella época, a partir de su primer transecto fitogeográfico expuesto a Mutis como proyecto propio en el primer semestre de 1802, con una división “en 12 zonas de una pulgada en el barómetro de ancho cada una, [de] toda la parte de la tierra que es capaz de vegetar”. Este precepto caldasiano sería perfeccionado con nuevas colectas botánicas y observaciones barométricas en el segundo semestre de 1802, y finalmente dibujado sobre el papel en el segundo semestre de 1803 siguiendo estrictamente los principios definidos por Caldas en su *Memoria sobre el plan de un viaje*, incluso después de tener bajo sus ojos el “Tableau physique” de Humboldt el 6 de abril de 1803, como se puede constatar en el **materi al suplementario** de este artículo, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1679/3230>, en el que se registra la relación entre los dos escenarios formales de referencia para la biogeografía caldasiana y humboldtiana, esto es, los volcanes Imbabura (**Figura 4**) y Chimborazo (**Figura 5**), respectivamente.

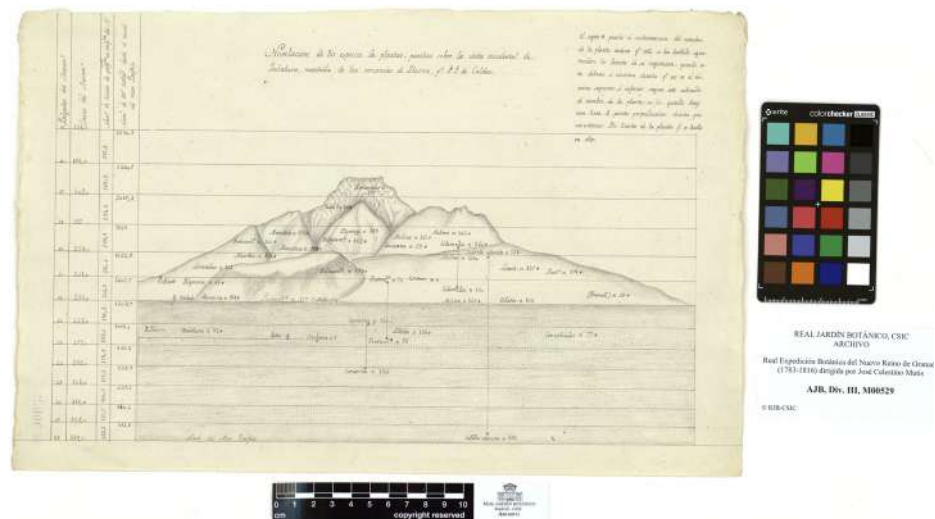


Figura 4. Francisco José de Caldas. Nivelación de 30 especies de plantas, sobre la vista occidental de Imbabura, montaña de las cercanías de Ibarra. (Caldas, F. J. [1803], Real Jardín Botánico de Madrid, CSIC, Archivo, AJB, Div. III, M00529.)

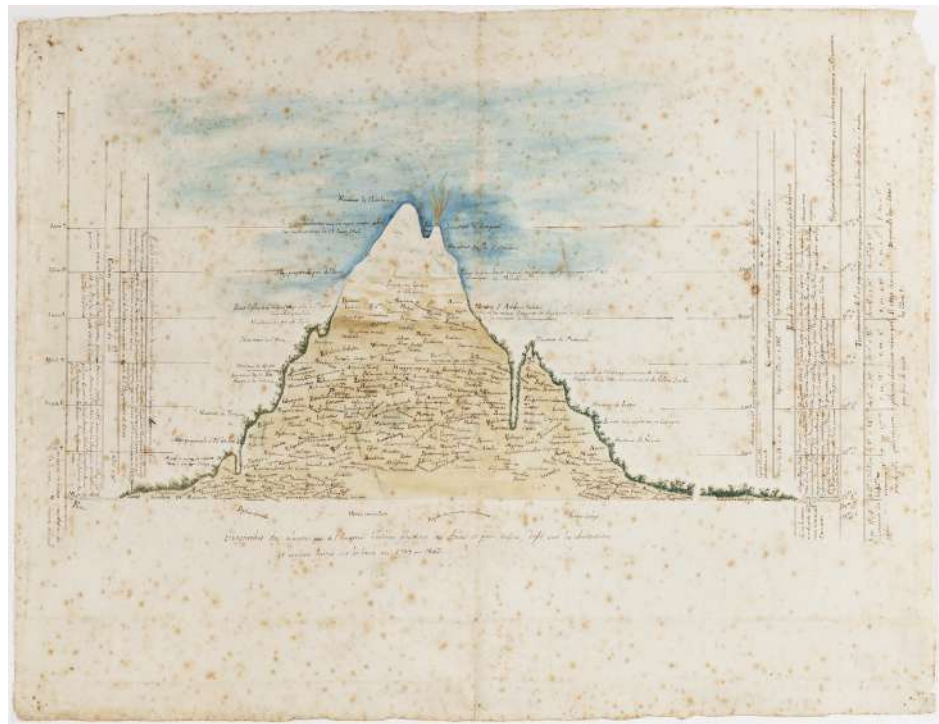


Figura 5. Alexander von Humboldt. *Géographie des plantes près de l'équateur*. (Humboldt. A. (1803), Museo Nacional de Colombia, reg. 1204.)

Mientras la biogeografía humboldtiana se ha basado en su mayor parte en las referidas ediciones francesas y alemanas publicadas en 1807 con el *Essai sur la géographie des plantes* y las *Ideen zu einer Geographie der Pflanzen*, ambas como productos impresos del manuscrito de 1803 que Humboldt envió a José Celestino Mutis desde Guayaquil y que iba acompañado del “Tableau physique des régions équinoxiales”, la biogeografía caldasiana icónica se remonta a uno de sus dibujos manuscritos originales –aunque sin fecha–, titulado “Nivelación de 30 especies de plantas, en la vista occidental del Imbabura, montaña cercana a Ibarra, por F. J. de Caldas”. Este pictograma se conserva en los archivos del Real Jardín Botánico de Madrid (**Figura 4**).²¹

Sincronicidades y asimetrías

Los hallazgos y postulados sincrónicos de Humboldt y Caldas que se relacionan en el **material suplementario**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1679/3230>, pertenecen esencialmente al período que va de 1801 a 1803. Pero la coincidencia conceptual y experimental de estos dos viajeros tuvo lugar en un espectro operativo más amplio que se inició en la década de 1790 y se prolongó hasta finales de la primera década del siglo XIX, cuando Caldas se involucró en las batallas por la independencia de Nueva Granada hasta desembocar en su ejecución sumaria por el ejército español en Santafé el 29 de octubre de 1816 (**Tabla 1**).

La dimensión iconográfica de las elaboraciones geográficas de Humboldt y Caldas, basadas exclusivamente en las fuentes primarias disponibles, se puede postular formalmente como el inicio de las biogeografías humboldtiana y caldasiana, y resultado de las nivelaciones exclusivamente geográficas del terreno que Humboldt dibujó en su viaje por el virreinato neogranadino en 1801, antes de su primer encuentro con Caldas. El perfil geográfico de Humboldt de Cartagena a Santafé es así, muy probablemente, la infografía que, una vez compartida, desencadenó el contrapunto, y estimuló a ambos viajeros a proceder a perfiles fitogeográficos más allá de las nivelaciones geográficas. Caldas

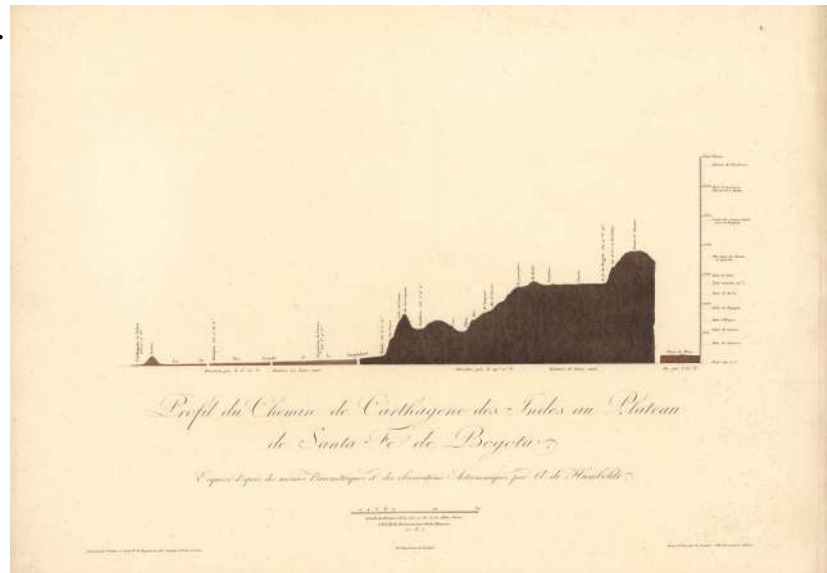
Tabla 1. Cronología de los trabajos biogeográficos y otros episodios en la vida de Alexander von Humboldt y Francisco José de Caldas.

Fecha	Alexander von Humboldt	Francisco José de Caldas
1790	Viaje a Inglaterra con Georg Forster	
1793	<i>Flora Fribergensis</i>	
1796-1801	Mediciones y registros	Mediciones y registros
1801	<i>Nivellement barométrique de Carthagène-Sta Fe</i>	<i>Medición de la altura de Guadalupe</i>
	Mediciones y registros	Viajes en el Nuevo Reino de Granada y de Popayán a Quito: mediciones y registros
1802	Mediciones y registros	<i>Memoria sobre el plan de un viaje</i>
		Mediciones y registros
		<i>Nivelación de 7 especies: Santafé - Quito</i>
1803	<i>Tableau physique des Andes</i> (manuscrito)	<i>Nivelación de 30 especies en el Imbabura</i>
	<i>Géographie des plantes</i> (manuscrito)	<i>Nivelación de oro y platino</i>
1804-1805	Ponencias orales - Institut de France (París)	<i>Determinación del término de la vegetación (13 especies) en las cercanías del ecuador</i>
		Mediciones y registros
		Nivelación de las quinas
1807	<i>Essai sur la géographie des plantes / Ideen zu eine Geographie der Pflanzen</i>	Materiales para la <i>Memoria sobre la quina</i>
	<i>Tableau physique des Andes / Naturgämalde</i>	
	<i>Ideen zu eine Geographie der Pflanzen</i>	
1808	<i>Plantæ æquinoctiales</i>	
1809		Comentarios sobre la <i>Geografía de las plantas</i> de Humboldt
		<i>Perfiles fitogeográficos Quito-Santafé</i>
1816		Caldas es fusilado por el ejército español
1817	<i>De distributione geographica plantarum</i>	
1851	<i>Physicalischer Atlas Heinrich Berghaus</i>	

fue explícito en esta intención que, en su opinión, como señalamos anteriormente, era original. Su propia percepción, que data del primer semestre de 1802, se postulará aquí en consecuencia como un *leit-motiv*: “Yo he proyectado unas nivelaciones barométrico-botánicas semejantes á las que el Sr. baron de Humboldt ha construido con solo el objeto de dar idea de las diversas alturas del terreno. [...]. Esta idea me toca, la creo nueva y digna de ensayarse” (Caldas, 1802c, p. 556).

Caldas insinuó, acaso deliberadamente, el origen humboldtiano de esta inspiración para sus posteriores elaboraciones que llamó precisamente “nivelaciones”,²² con base en el esquema gráfico cartesiano titulado por Humboldt como “Nivellement barométrique du terrain depuis Carthagene à S[an]ta Fe” (1801). Pero está claro que Humboldt, hasta ese momento, no había concebido aún ninguna iconografía biogeográfica —o biogeografía iconográfica—: su “Profil du chemin de Carthagene des Indes au plateau de Santa Fé de Bogotá” (Figura 6a), como tituló más tarde su “Nivellement”, no incluye ni una sola planta, tal y como puede constatarse en su primer y preliminar grabado titulado “Barometrische Nivellirung der Gegend zwischen Cartagena und Santa Fé”, publicado en el volumen 10, número 3, de la revista *Allgemeine geographische Ephemeriden* en 1802 (Figura 6b), cuando aún transitaba por Suramérica, basado en un manuscrito original no disponible hoy.

a).



b).

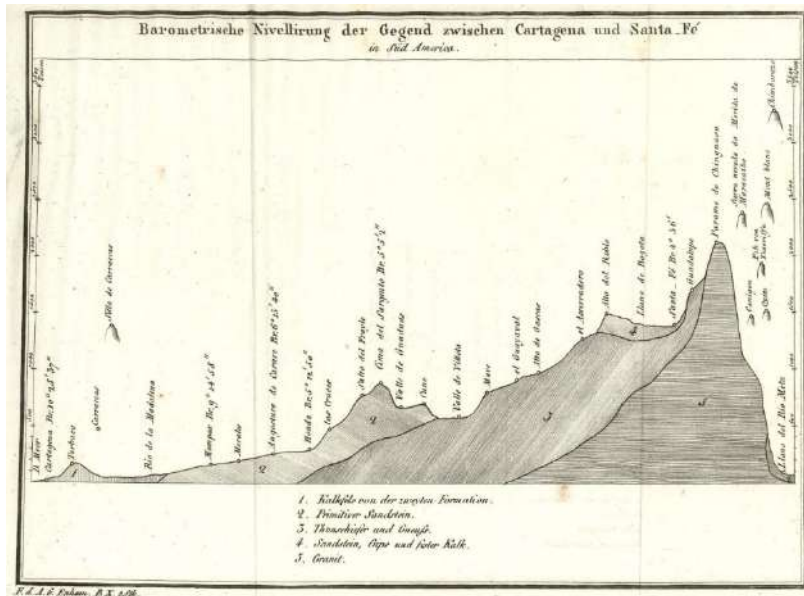


Figura 6. a). Alexander von Humboldt. Profil du chemin de Carthagène des Indes au plateau de Santa Fé de Bogota. (Humboldt, A. (1814), en <https://www.davidrumsey.com/luna/servlet/detail/RUMSEY~8~1~292854~90064435:VI--Profil-du-chemin-de-Carthagene-?qvq=w4s:/where%2FCartagena%2Bde%2BIndias%2B%252528Colombia%252529%2F;lc:RUMSEY~8~1&mi=0&trs=1#>)
b). Alexander von Humboldt. Barometrische Nivellirung der Gegend zwischen Cartagena und Santa Fé. (Humboldt, A. (1802), en https://zs.thulb.uni-jena.de/rsc/viewer/jportal_derivate_00207057/Allg_geogr_Ephemeriden_1802_10_%200291a.tif).

Tampoco hay plantas registradas en un boceto del volcán Pichincha que fue visitado por Humboldt y Caldas a finales del mes de mayo de 1802,²³ cuando se hallaban aún en función de “perfiles geográficos” (Figura 7),²⁴ sin emprender todavía los “perfiles fitogeográficos” del año 1803 como el del Chimborazo en Humboldt (firmado en febrero) y el de la “Nivelación de las plantas” de Caldas (firmado en abril).

Dos copias manuscritas contemporáneas del “Nivellement” original de Humboldt en el trayecto Cartagena-Santafé, fueron tomadas entre julio y septiembre de 1801 en Santafé y Popayán por dos parientes ilustrados de Caldas –Santiago Arroyo (1773-1845) y Antonio

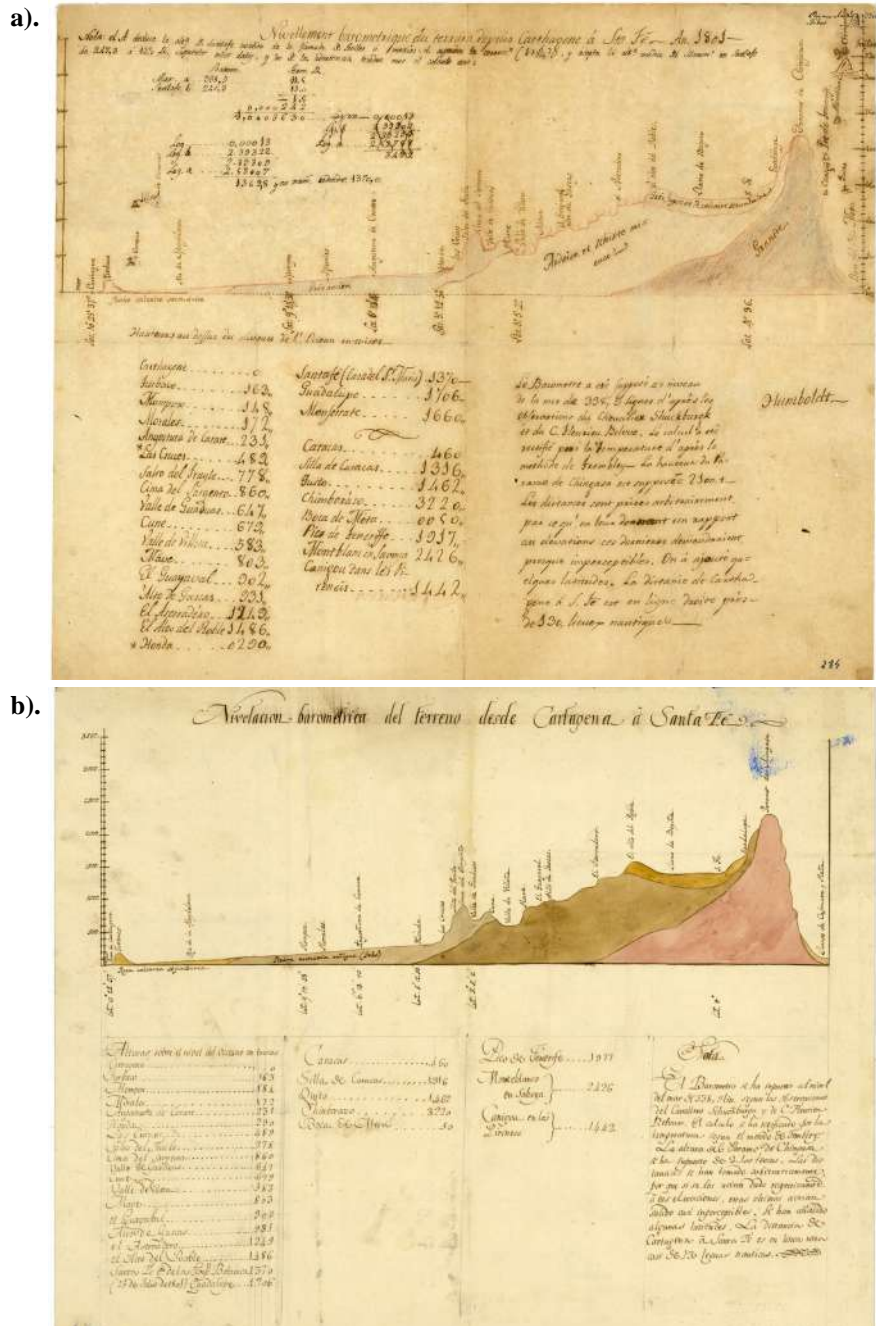


Figura 8. a). Alexander von Humboldt. Nivellement barométrique du terrain depuis Carthagene à S[an]ta Fe. (Anónimo) (1801), Archivo Cartográfico y de Estudios Geográficos del Centro Geográfico del Ejército, Ministerio de Defensa de España, Ar.J-T.7-C.1_10Bis). **b).** Alexander von Humboldt. Nivellement barométrique du terrain depuis Carthagene à S[an]ta Fe. ([Anónimo] (1801), Archivo Cartográfico y de Estudios Geográficos del Centro Geográfico del Ejército, Ministerio de Defensa de España, Ar.J-T.7-C.1_10).

En el mismo ámbito de la geografía, y luego de la biogeografía, Caldas había publicado en un periódico local de Santafé, en el segundo semestre de 1801, su “Medición de la verdadera altura de Guadalupe”, que Humboldt habría tenido ocasión de leer durante su estancia en la casa de José Celestino Mutis, ya que este artículo se publicó en julio de ese mismo año, en

el curso del primer mes de su estadía con Bonpland en la Sabana de Bogotá. Una segunda publicación de un miembro ilustrado en el círculo cercano de Caldas,²⁵ aparecería en el mismo periódico –el *Correo Curioso*, número 35, de octubre de 1801–, cuando Humboldt ya había dejado Santafé y estaba llegando a Popayán; sin embargo, no hay evidencia de que este segundo trabajo neogranadino de 1801, bajo el título “Discurso sobre el calendario rural del Nuevo Reyno”, fuera leído por el prusiano. En este, el anónimo compatriota de Caldas se refirió específicamente a los determinantes biogeográficos que interesarían cada vez más tanto a Humboldt como a Caldas: “La caña de azúcar, que se dá en tierras calientes, pide un terreno ligero, migoso y vegetal [...]. Las turmas ó papas (*Solanum tuberosum*, Linn), que hacen principal alimento de la tierra fría [...]. El trigo se cultiva en las tierras frías y en algunas templadas” (Anónimo, 1801, en Lozano & Azuola, 1801, No. 35, p. 137).

Se desprende de estas evidencias que al menos Caldas y alguno de sus compatriotas estaban bien preparados para interactuar con Humboldt en el campo de la biogeografía. Pero como no quedó prueba suplementaria de esta eventual interacción en esos días, podría decirse que Caldas, en particular, se retrajo tímidamente de cualquier polémica abierta con el naturalista prusiano hasta que publicó la traducción al español de la *Geografía de las plantas* en el *Semanario del Nuevo Reyno de Granada* en 1809, casi ocho años después de haberlo conocido personalmente. El *Semanario*, una juiciosa publicación semanal propia, con 52 números en 1808, 52 números en 1809, y una serie de *Memorias* en 1810, fue una revista oportuna pero muy discreta en la periferia de los nodos centrales de la ilustración europea de la época, puesto que circulaba principalmente en Nueva Granada. Aun así, como afirma el historiador Mauricio Nieto, esta revista científica “se publicó en un período decisivo para la historia política de España y sus colonias; y es significativo que, en medio de la crisis del imperio español, exist[iera] una publicación periódica que pretend[ía] difundir, entre un grupo de criollos, los conocimientos que se considera[ba]n útiles para el buen gobierno y la prosperidad de la Nueva Granada” (Nieto Olarte, 2008, p. 1). Humboldt disponía de mejores medios, tanto financieros como académicos, para socializar sus teorías en dos altos centros de la ciencia y la sociedad: París y Berlín.

Esta asimetría en la circulación y los medios de producción de conocimiento puede ser metaforizada con el recurso iconográfico de dos retratos elaborados en los primeros años del siglo XIX: por un lado, el lienzo al óleo de Humboldt, de 1,26 x 0,92 metros, pintado en 1806 por Friederich Georg Weitsch (1758-1828), que representa un abundante escenario de plantas naturales frente al río Orinoco, con un barómetro, varios especímenes recolectados y un diario botánico en la mano (**Figura 9a**); por el otro, el retrato simple de la cara de Caldas, pintado en miniatura (7,5 x 6,5 cm) por un artista anónimo en Quito en una fecha aún indeterminada, hacia 1803 (**Figura 9b**).

Solo diez años después del fusilamiento de Caldas por el ejército español en 1816, Humboldt tomó la decisión de referirse, finalmente, a sus trabajos sobre geografía vegetal, aunque solo fuera en un prospecto preliminar para un libro que nunca se publicaría. En este prospecto del año 1826, Humboldt sumergió (podríamos decir, hundió) a Caldas en una larga lista de 56 naturalistas que habían trabajado en el nuevo campo del que supuestamente solo él había sido pionero (**Figura 10**): “En los últimos 15 años, [los siguientes botánicos] han abordado cuestiones relativas a esta ciencia, o bien han aportado materiales que ampliarían sus límites” (Humboldt & Kunth, 1826).²⁶ Pero hay un error, voluntario o involuntario, en este reconocimiento tardío, ya que Humboldt, un cuantificador usualmente muy preciso, tenía que ser conciente de que Caldas había trabajado en barometría botánica desde al menos principios de 1802, es decir 24, y no “15”, años antes de 1826. Se puede sugerir que Humboldt se anticipó una vez más a Caldas (y a su espíritu crítico) en función de la prioridad de su publicación del *Essai sur la géographie des plantes* en 1807, puesto que Caldas lo había antecedido al menos cinco años con sus propias mediciones en la cordillera de los Andes, y luego, en 1802, con sus elaboraciones sobre “nivelaciones barométrico-botánicas semejantes á las que el Sr. baron de Humboldt [había] construido con solo el objeto de dar idea de las diversas alturas del terreno. [Una idea que tocaba a Caldas, y que él creyó] nueva y digna de ensayarse” (Caldas, 1802d, p. 556).

a).



b).



Figura 9. a). Friederich Georg Weitsch (1806), 1,26 x 0,92 m. Alexander von Humboldt. (Weitsch, F. G. (1806), en https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Alexandre_humboldt.jpg). b). Anónimo (c. 1803), 7,5 x 6,5 cm. Francisco José de Caldas. (Anónimo (c. 1803), Museo Casa de la Independencia - Casa del Florero, reg. 3355.)

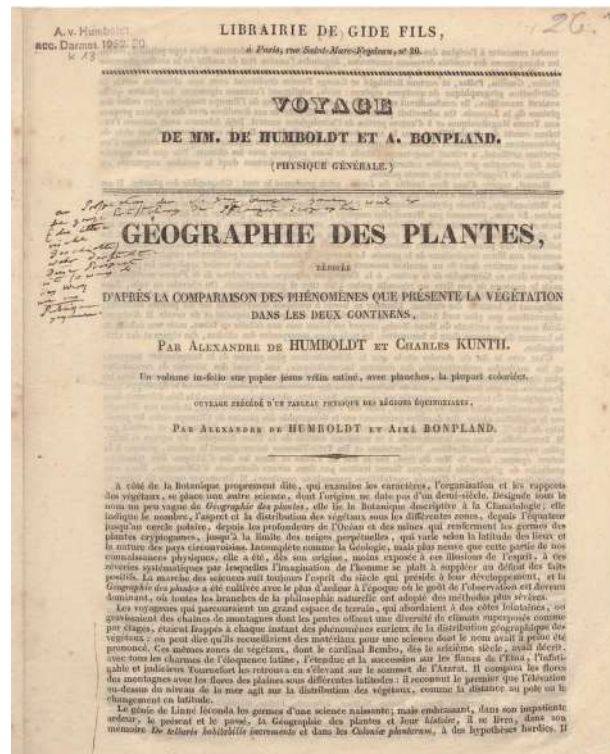


Figura 10. Alexander von Humboldt y Carl Kunth. Géographie des plantes redigée d'après la comparaison des phénomènes que presente la végétation dans les deux continens (1826). (Alexander von Humboldt y Carl Kunth. Géographie des plantes - Prospecto (1826), Staatsbibliothek zu Berlin Preußischer Kulturbesitz, Nachl. Alexander von Humboldt, gr. Kasten 13, Nr. 26, Bl. 1-2 [Comunicado por Ulrich Paessler], en https://digital-beta.staatsbibliothek-berlin.de/werkansicht?PPN=PPN838243452&PHYSID=PHYS_0001&view=picture-toolbox&DMDID=DMDLOG_0001.)

Hasta este punto, y teniendo en cuenta lo registrado en el **material suplementario**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1679/3230>, nuestras argumentaciones y cuestionamientos en este artículo pueden resumirse como sigue: 1) Caldas registró claramente su idea sobre la nivelación de las plantas (idea que él mismo consideraba original cuando cohabitaba con Humboldt y Bonpland en Quito) en cartas a Mutis en los meses de abril y mayo de 1802, y particularmente en su *Memoria sobre el plan de un viaje de Quito a la América septentrional*; 2) Caldas reportó a Mutis la medición de altitudes en el volcán de Imbabura tomada antes del 8 de agosto de 1802; 3) Caldas reportó a Mutis sus colecciones de plantas en las faldas del Imbabura el 23 de septiembre de 1802; 4) Caldas reportó a Humboldt desde Otavalo, el 17 de noviembre de 1802, sus trabajos geográficos y botánicos en los territorios del norte de Quito; 5) Humboldt informó al astrónomo y matemático francés Jean-Baptiste Joseph Delambre, en una carta fechada en Lima el 25 de noviembre de 1802, que “no hay vegetal del que no podamos indicar la roca en que habita y la altura en altitudes a que se eleva; hasta tal punto que la geografía de las plantas *tendrá* en nuestros manuscritos datos muy exactos” (Humboldt, 1802b, 205).²⁷ Cabe entonces preguntarse: ¿fue el informe de Caldas desde Otavalo, el 17 de noviembre de 1802, un estímulo para Humboldt en la inmediata configuración y posterior remisión del perfil biogeográfico del Chimborazo que el prusiano dedicó y envió a Mutis en Santafé desde Guayaquil –a través de Caldas– en febrero de 1803?

En un informe de actividades de Caldas a las autoridades del Virreinato de Santafé en el 30 de septiembre de 1808 (cinco años después de los hechos mencionados), Caldas anota que, en el segundo semestre de 1803, formó “un perfil barométrico desde el Océano hasta las nieves eternas de Imbabura” (Caldas, 1808, citado en Bateman & Arias de Greiff, 1978, p. 276). Con esta precisión, la fecha de ejecución del perfil del Imbabura puede fijarse después del 21 de noviembre de 1803, ya que el pueblo de Yntac –visitado por Caldas en esa fecha–, está debidamente georreferenciado en él. Y aunque el dibujo fitogeográfico de Caldas centrado en el volcán de Imbabura habría sido elaborado a finales de 1803 (o a principios de 1804), cuando ya había recibido en sus manos el esquema del Chimborazo de Humboldt en abril de 1803, se puede sostener que el perfil fitogeográfico de Imbabura de Caldas es un producto original e independiente surgido de las actividades que él mismo había explicitado desde la configuración de su *Memoria sobre el plan de un viaje* en el segundo trimestre de 1802, y luego específicamente en el 8 de agosto de ese mismo año en una carta a Mutis, donde Caldas le decía: “La vegetación, que hace mi primer objeto, no guarda las leyes del nivel que he observado constantemente en todos los cerros elevados que conozco y he escalado” (Caldas, 1802e, p. 193).

En efecto, antes de este informe epistolar específico del 8 de agosto, Caldas había ya propuesto a Mutis en un texto anterior firmado el 21 de abril de 1802, en medio de su *Memoria sobre el plan de un viaje*, la idea príncipes de su diseño: “¿No sería nuevo y al mismo tiempo hermoso dividir en 12 zonas, de una pulgada en el barómetro de ancho cada una, toda la parte de la tierra que es capaz de vegetar? ¿No sería nuevo asignar á cada planta sus límites, y de un modo lacónico y exacto decir: habita en la zona primera, habita desde la tercera hasta la quinta, y así de las demás?” (Caldas, 1802, citado en Acosta, 1849, p. 556). Esta idea príncipes tenía antecedentes experimentales, como el que Caldas refería en un cuaderno inédito de 1802, cuando consignó los siguientes párrafos, escritos el 28 de julio, mientras permanecía en Tabacundo:

En todos los lugares por donde he transitado en este pequeño viaje como en el que hice en [1]801 de Popayán a Quito, he notado con el mayor cuidado la calidad de las harinas y la elevación del suelo que las produce, y creo poder señalar el término superior en que vegeta esta preciosa planta con la utilidad del agricultor [...]. Este asunto me ha parecido importante y merece ser mirado en detalle. En todas las regiones con temperaturas tan diferentes como las que hay [entre] Santafé y Quito, he observado que el trigo no se cultiva por debajo de las 22 pulgadas del barómetro, es decir, por encima de las 1100 toesas [...] no vegeta con alegría en las regiones situadas bajo este término [...]. Sabemos que la humedad y el calor son los agentes más poderosos para la vegetación, y que éstos

aumentan en proporción inversa con la elevación del terreno sobre el mar. ¿Será el trigo del número de las plantas que no vegetan con felicidad [en] los trópicos, a una presión atmosférica distinta de las 22 pulgadas del barómetro? En Europa se cultiva en algunas elevaciones muy cortas y en América no se empieza a encontrar sino a 1100 toesas sobre el nivel del mar. ¿Se elevará el término en que prospera en las proximidades de la línea?” (Caldas, 1802f, ff. 1-27).

La idea complementaria de Caldas sobre el efecto de la latitud en la geografía de las plantas está claramente definida en este manuscrito inédito de Caldas de 1802: una noción que Humboldt solo definiría e ilustraría adecuadamente en 1817, quince años después, en su *De distributione geographica plantarum* (Humboldt, 1817). El mismo día 28 de julio de 1802, Caldas anotó en su manuscrito inédito que presentaba “una nivelación de los pueblos que están en el camino de Quito y Santa Fe, desde los 0° 14' de latitud sur hasta los 4° 36' 0' de latitud boreal”, como complemento de sus reflexiones. Esta “nivelación” puede corresponder a la “frívola” sincrónica enviada por Caldas a Mutis cuando el barón envió al director de la Expedición Botánica –de la mano del Marqués de Selva Alegre y de la suya propia– su *Essai sur la géographie des plantes* manuscrito en los primeros meses de 1803.

Con base en todas estas evidencias, hay que subrayar que el perfil fitogeográfico de Imbabura fue trazado por Caldas a finales de 1803, o a principios de 1804, y que el “asunto”, como lo llamó en Tabacundo en su diario de viaje inédito en el segundo semestre de 1802, o la “idea princeps” como la he llamado a partir de sus comunicaciones escritas con Mutis en el primer semestre de ese mismo año, más de seis meses antes de recibir el perfil biogeográfico de Humboldt centrado en el Chimborazo, ya se estaba estructurando en su mente varios meses antes de conocer al prusiano al norte de Ibarra el 31 de diciembre de 1801.

También se puede postular en el cierre, al comparar los perfiles del Imbabura y del Chimborazo, que, para diseñar el suyo, Caldas persistió –más de seis meses después de haber visto el dibujo manuscrito de Humboldt– en su idea preliminar de dividirlo en 12 pulgadas, y que no replicó ningún elemento gráfico adicional de la acuarela del prusiano. Una aproximación a todas luces novedosa, tanto como lo fue el énfasis del payanés en las plantas útiles: una dimensión de la biogeografía caldasiana analizada recientemente por **González-Orozco & Porcel** (2021), aplicando hoy sus regiones fitogeográficas y extrapolándolas a la agricultura, en una aproximación muy significativa desde el punto de vista social a estudios publicados hace más de doscientos años que cobran vigencia en la actualidad.

Conclusiones

Los perfiles biogeográficos producidos en 1802 y 1803 por Alexander von Humboldt y Francisco José de Caldas pueden postularse como infografías sincrónicas, aunque disímiles. Ambas síntesis gráficas habrían surgido de un dibujo fundacional: la nivelación barométrica que Humboldt trazó cuando viajaba de Cartagena a Santafé por el río Magdalena, antes de su primer encuentro con Caldas. Este perfil barométrico de Humboldt es muy probablemente la imagen que, una vez compartida, desencadenó un estimulante contrapunto y llevó a ambos viajeros a elaborar perfiles propiamente fitogeográficos –no solo geográficos– centrados en los volcanes Chimborazo e Imbabura, respectivamente. El presente artículo presenta evidencias epistolares e iconográficas que apoyan esta apreciación, y en un artículo sucesivo en preparación, titulado “Del Magdalena al Chimborazo: iluminación neogranadina de un transcurso prusiano”, se discutirán las influencias recíprocas específicas de estos dos viajeros naturalistas en el periodo 1801-1803, tanto como la asimetría que se presentó en su difusión y apropiación en la historia de la ciencia y la biogeografía.

En todo caso, se puede concluir con fundamento que la nueva dimensión científica de la biogeografía tropical de las plantas postulada simultáneamente por Humboldt y Caldas, parece haber nacido en los Andes.

Información suplementaria

Ver información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1679/3230>

Agradecimientos

El autor desea agradecer la muy gentil colaboración de Esther García Guillén y José Luis Fernández Alonso en el Real Jardín Botánico de Madrid, y la atenta lectura, los comentarios y aportes de Ulrich Paessler en la Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. Las elaboraciones preliminares de este texto sobre los fundamentos documentales de la biogeografía en los escritos y dibujos de Francisco José de Caldas fueron presentadas en sucesivos seminarios en Colombia (2016-2019), París (2016), Berlín (2019) y Quito (2019), y publicadas en las memorias correspondientes de circulación restringida. En estos seminarios mutidisciplinarios, numerosos asistentes incidieron en el desarrollo de las ideas finales presentadas en este artículo. El último de estos encuentros académicos fue liderado por Mark Thurner y Jorge Cañizares-Esguerra, quienes a su vez compartieron con el autor (en comunicaciones formales e informales) comentarios particularmente útiles sobre la precedencia en la historia de la ciencia.

Conflicto de intereses

El autor reporta de manera explícita que no presenta conflicto de intereses en su análisis de la relación histórica del viajero prusiano y el naturalista payanés, y presenta este artículo debidamente basado en fuentes primarias.

Referencias

- Acosta, J.** (ed.). (1849). *Francisco José de Caldas. Semanario de la Nueva Granada*. París: Lasserre.
- Anónimo.** (1801). “Discurso sobre el calendario rural del Nuevo Reyno”. Lozano, J. T., Azuola, J. L. (eds.). *Correo curioso de Santafé de Bogotá*, (33-38), 129-152.
- Bateman, A., Arias de Greiff, J.** (eds.). (1978). *Cartas de Caldas*. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Bourguet, M.N.** (2002). “Landscape with numbers: natural history, travel and instruments in the late eighteenth and early nineteenth centuries”, en M. N. Bourguet, C. Licoppe, H. O. Sibum (eds.), *Instruments, travel and science: Itineraries of precision from the seventeenth to the twentieth century*. London: Routledge.
- Buttimer, A.** (2012). “Alexander von Humboldt and planet earth’s green mantle”. *Cybergeo: European Journal of Geography. Epistémologie, Histoire de la Géographie, Didactique*, document 616. Fecha de consulta: 18 de abril de 2022. Disponible en: Anónimo <https://journals.openedition.org/cybergeo/25478>
- Caldas, F.J.** (1801), en Anónimo, Archivo del Ejército de Tierra de Madrid, Ar.J-T.7-C.1_10Bis.
- Caldas, F.J.** (1801a-c), en: Bateman, A., Arias de Greiff, J. (eds.). (1978). *Cartas de Caldas*. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Caldas, F.J.** (1802a-c, e), en: Bateman, A., Arias de Greiff, J. (eds.). (1978). *Cartas de Caldas*. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Caldas, F.J.** (1802d). “Memoria sobre el plan de un viaje proyectado de Quito a la América septentrional, presentada al célebre director de la Real Expedición Botánica de la Nueva Granada, don José Celestino Mutis”, en Acosta, J. (ed.). (1849). *Francisco José de Caldas. Semanario de la Nueva Granada*. París: Lasserre, pp. 546-567.
- Caldas, F.J.** (1802f). “Relación de un viaje a Ybarra y demás pueblos circunvecinos al Nordeste de Quito hecho en 1802”. Manuscrito inédito, ff. 1-27. Biblioteca General, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Caldas, F.J.** (1808). “[Carta a José Ramón Leyva, Santafé, septiembre 30]”, en: Bateman, A., Arias de Greiff, J. (eds.). (1978). *Cartas de Caldas*. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 274-286.
- Ebach, M.C.** (2015). *Origins of biogeography: the role of biological classification in early plant and animal geography*. Dordrecht: Springer.
- Forster, J.R.** ([1778] 2004). “Excerpts from Observations made during a voyage round the world, on physical geography, natural history, and ethic philosophy”, en M. V. Lomolino, D. F. Sax, J. H. Brown (eds.). *Foundations of biogeography. Classic papers with comments*. Chicago/London: Chicago University Press, pp. 19-27.
- Forster, J.R.** (1778). *Observations made during a voyage round the world, on physical geography, natural history, and ethic philosophy*. London: G. Robinson, Fecha de consulta: 18 de abril de 2022. Disponible en: <https://archive.org/details/NHM6732>

- Giraud-Soulavie, J.L.** (1780-1784). *Histoire naturelle de la France méridionale. Seconde partie. Les végétaux. Tome premier. Contenant les principes de la Géographie physique du règne végétal, l'exposition des climats des Plantes, avec des Cartes pour en exprimer les limites.* Paris: Quillau.
- Goethe, J.W.** (1807). “[Carta a Alexander von Humboldt, Weimar, abril 3]”, en Buttimer, A. (2012). “Alexander von Humboldt and planet earth’s green mantle”. *Cybergeo: European Journal of Geography. Epistémologie, Histoire de la Géographie, Didactique*, document 616, p. 28.
- Gómez-Gutiérrez, A.** (2016). “Alexander von Humboldt y la cooperación transcontinental en la Geografía de las plantas: una nueva apreciación de la obra fitogeográfica de Francisco José de Caldas”. *Internationale Zeitschrift für Humboldt-Studien*, 17(33), 22-49. Disponible en: <https://www.hin-online.de/index.php/hin/article/view/238>
- Gómez-Gutiérrez, A.** ([2018] 2022). *Humboldtiana neogranadina*. Bogotá: Cesa – Pontificia Universidad Javeriana – Universidad de los Andes – Universidad del Rosario – Universidad Eafit – Universidad Externado de Colombia. Fecha de consulta: 18 de abril de 2022. Disponible en: <https://sandbox.makinaeditorial.com/humboldt/public/#book>
- González-Orozco, C., Porcel, M.** (2021). “Two centuries of changes in Andean crop distribution”. *Journal of Biogeography*, 48(8), 1972-1980.
- Guhl, E.** (ed.). (1985). *Alexander von Humboldt. Ideas para una geografía de las plantas*. Bogotá: Jardín Botánico José Celestino Mutis.
- Guhl, F.** (2022). *En busca del origen*. Bogotá: Villegas Editores, Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Ediciones Uniandes.
- Humboldt, A.** ([1803] 1809). “Geografía de las plantas”, en Caldas, F. J. (ed.). *Semanario del Nuevo Reyno de Granada*. Santafé: Bruno Espinosa de los Monteros, (16-21), 121-163. Disponible en: https://catalogoenlinea.bibliotecanacional.gov.co/client/es_ES/search/asset/132629
- Humboldt, A.** (1802a). “Barometrische Nivellirung der Gegend zwischen Cartagena und Santa Fé”. *Allgemeine geographische Ephemeriden* X (3), 210-212.
- Humboldt, A.** (1802b). “[Carta a Jean-Baptiste Joseph Delambre, Lima, noviembre 25]”, en Moheit, U. (comp.) (1993). *Alexander von Humboldt. Briefe aus Amerika, 1799-1804*. Berlin: Akademie Verlag.
- Humboldt, A.** (1806). “[Carta a Caroline von Wolzogen, Berlín, mayo 14]”, Buttimer, A. (2012). “Alexander von Humboldt and planet earth’s green mantle”. *Cybergeo: European Journal of Geography. Epistémologie, Histoire de la Géographie, Didactique*, document 616, p. 27.
- Humboldt, A.** [1805/1806]. “Essai sur la géographie des plantes”. Manuscrito (Ms456). Bibliothèque Centrale, Musée National d’Histoire Naturelle, París.
- Humboldt, A., Bonpland, A.** ([1805] 1807). *Essai sur la géographie des plantes; accompagné d’un tableau physique des régions équinoxiales, fondé sur des mesures exécutées depuis le dixième degré de latitude boréale, jusqu’au dixième degré de latitude australe, pendant les années 1799, 1800, 1801, 1802 et 1803*. Paris: Levrault, Schoell et Compagnie.
- Humboldt, A., Kunth, C.** (1826). *Géographie des plantes* [Prospecto], en: Staatsbibliothek zu Berlin Preußischer Kulturbesitz, Nachl. Alexander von Humboldt, gr. Caja 13, Carpeta 26.
- Jackson, S.T.** (2009). “Introduction: Humboldt, ecology and the cosmos”, en S. T. Jackson (ed.). *Alexander von Humboldt and Aimé Bonpland. Essai on the geography of plants*. Chicago: The Chicago University Press, pp. 1-46.
- Lomolino, M. V., Riddle, B. R., Brown, J. H.** (2006). *Biogeography*. Sunderland: Sinauer.
- Lomolino, M. V., Sax, D. F., Brown, J. H.** (2004). *Foundations of biogeography. Classic papers with comments*. Chicago/London: The Chicago University Press.
- Merton, R.K.** (1963). “Resistance to the systematic study of multiple discoveries in science”. *European Journal of Sociology*, 4(2), 237-282.
- Nieto-Olarte, M.** (2008). *Orden natural y orden social: ciencia y política en el Semanario del Nuevo Reyno de Granada*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Silva, R.** (2002). *Los ilustrados de Nueva Granada, 1760-1808. Genealogía de una comunidad de interpretación*. Medellín: Eafit.
- Silva, R.** (2021). *El viajero y sus sombras: Francisco José de Caldas, 1790-1816, Popayán - Quito - Santafé*. Bogotá: Crítica.
- Vila, P.** (1960). “Caldas y los orígenes eurocriollos de la geobotánica”. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 11(42), XVI-XX.
- Williams, D.M., Ebach, M.C.** (2008). *Foundations of systematics and biogeography*. New York: Springer.

Notas

¹ El geógrafo Pau Vila i Dinarès, de origen catalán, había llegado a Colombia en 1915, un año después de la fundación del Gimnasio Moderno al cual fue vinculado por un grupo de liberales colombianos para hacerse cargo de su dirección. Tres años después se vio obligado a regresar a España por problemas de salud de su mujer Emília Comaposada. Durante las dos décadas siguientes las actividades geográficas e intelectuales llevadas a cabo por Pau Vila durante la Segunda República se extendieron a diferentes ámbitos, incluyendo la traducción castellana de la *Géographie Universelle* de Vidal de la Blache y Lucian Gallois. A partir de 1929 empezó a publicar el *Resum de Geografia de Catalunya*, compuesto por nueve pequeños volúmenes, el último de los cuales apareció en 1935. Tras el advenimiento de la Segunda República española, Vila fue nombrado vicepresidente de la “Ponencia de estudio de la estructura comarcal de Cataluña”, integrada por destacados políticos, geógrafos e intelectuales catalanes de la época. La derrota de la República abrió en su vida un largo período de exilio. Así, en 1939, a sus 58 años, reemprendió sus vínculos profesionales con Colombia. El presidente de la República de Colombia, Eduardo Santos, le nombró catedrático de geografía de la Escuela Normal Superior de Bogotá, en donde, fruto de la actividad docente llevada a cabo en este país en 1945 publicó el libro *Nueva Geografía de Colombia*. Un año más tarde, el gobierno venezolano le propuso organizar y dirigir el Departamento de Geografía e Historia del Instituto Pedagógico de Venezuela en Caracas, que le ocupó su actividad profesional hasta su jubilación. En 1960 se publicó en la *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* el artículo referido, mientras aparecía el primer volumen de la *Geografía de Venezuela* complementado cinco años más tarde por el segundo de tres que Vila configuró antes de regresar a Barcelona, en donde se radicó a partir de 1961. Durante los últimos años de su vida, fue objeto de numerosos homenajes, premios y condecoraciones entre los que es preciso mencionar la Orden de Andrés Bello que le concedió el presidente de la República de Venezuela en 1971, el Premio de Honor de las Letras Catalanas que le fue otorgado en 1976 y el doctorado honoris causa que le dio la *Universitat Autònoma de Barcelona*. Pau Vila ha sido considerado como uno de los principales renovadores de la actividad pedagógica en la Cataluña del primer tercio del siglo XX, así como el introductor y difusor en Cataluña de la Escuela Regional Francesa de geografía. Véase: Nadal Piqué, F. “Pau Vila i Dinarès”. DB-e. Madrid: Real Academia de la Historia. Fecha de consulta: 24 de abril de 2022. Disponible en: <https://dbe.rah.es/biografias/5489/pau-vila-i-dinares>

² Véase también una lista de “multiple discoveries” desde el siglo III a. C. al siglo XXI. Fecha de consulta: 24 de abril de 2022. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_multiple_discoveries#cite_note-1

³ Brown University, “Biogeography”. Fecha de consulta: 18 de abril de 2022. Disponible en: <https://biomed.brown.edu/Courses/BIO48/29.Biogeography.HTML#:~:text=Biogeography%20is%20the%20study%20of,have%20shaped%20the%20current%20distribution>

⁴ Además de los textos citados, para una interesante aproximación a los trabajos biogeográficos de Wallace en la vertiente del río Negro medio siglo después del paso de Humboldt y Bopland por esta misma región, véase Guhl, 2022.

⁵ Para la traducción al español de esta cita directamente de la versión alemana de las *Ideen zu eine Geographie der Pflanzen*, véase Guhl, 1985, p. 58.

⁶ Para una revisión de los trabajos botánicos y barométricos de Giraud-Soulavie, véase Bourguet, 2002, pp. 97-126.

⁷ Las premisas de Forster incluyeron los siguientes conceptos pioneros: “La vegetación que viste nuestra Tierra, varía considerablemente en cada país que hemos visitado durante nuestra circunnavegación [...]. La diferencia de suelos y climas provoca más variedades en las plantas tropicales de las islas del sur que en cualquier otra [...]. Esto, sin embargo, como toda regla, no deja de tener excepciones, y las variedades que surgen de estos mismos suelos presentan a veces diferencias incluso allí, aunque demasiado tenues para ser notadas. Un clima frío, o una exposición elevada, convierten al árbol en arbusto, y viceversa. La vegetación que viste nuestra Tierra varía considerablemente en cada país que hemos visitado durante nuestra circunnavegación [...]. La diferencia de suelos y climas hace que haya más variedades en las plantas tropicales de las islas del sur que en cualquier otra [...]. Esto, sin embargo, como toda regla, no deja de tener excepciones, y las variedades que surgen de estos mismos suelos presentan a veces diferencias incluso allí, aunque demasiado tenues para ser notadas. Un clima frío, o una exposición elevada, convierten al árbol en un arbusto, y viceversa” [todas las traducciones al español a partir de las obras originales en inglés, francés o alemán son del autor del presente artículo]. Véase: Lomolino, Sax, Brown, 2004, pp. 19-27; Forster, 1778, pp. 160-161 y 176-177.

- ⁸ Humboldt pudo referirse a la obra de Willdenow titulada *Phytographia* (1794).
- ⁹ Cursivas añadidas.
- ¹⁰ Para una descripción detenida del itinerario de Alexander von Humboldt en América entre 1799 y 1804, véase Gómez Gutiérrez, 2018 (<https://sandbox.makinaeditorial.com/humboldt/public/#book>).
- ¹¹ Para una referencia a la vida y obra de José Celestino Mutis centrada en sus estudios botánicos del género *Cinchona*, véase la edición especial publicada por la *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Fecha de consulta: 18 de abril de 2022. Disponible en: <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/issue/view/95>
- ¹² Para una relación reciente en esta misma revista sobre la vida y obra de Francisco José de Caldas, véase: <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/issue/view/30/31>. Fecha de consulta: 18 de abril de 2022.
- ¹³ De hecho, Joaquín Acosta Pérez (1800-1852), un neogranadino contemporáneo de Humboldt en París en los años veinte y luego en los años cuarenta del siglo XIX, al reeditar una selección de artículos del *Semanario del Nuevo Reyno de Granada* (1808-1810) de Caldas bajo el título de *Semanario de la Nueva Granada* (1849), con un número importante de manuscritos inéditos del payanés incluyendo la *Memoria sobre el plan de un viaje de Quito a la América septentrional* (1802), registró en una nota a pie de página states la siguiente opinión: “Probablemente Zimmermann - Por este pasaje se deduce el ardor con que la imaginación científica de Caldas se apoderaba de todas las especies que oía en sus conversaciones con el baron de Humboldt para fecundarlas a su modo”. Véase Acosta, 1849, pp. 546-567, p. 559.
- ¹⁴ Cursivas añadidas.
- ¹⁵ Este manuscrito se preserva como parte del documento Ms456 en el Archivo Histórico de la Biblioteca Central del Musée National d’Histoire Naturelle de Paris.
- ¹⁶ La frase incluida en cursivas en los corchetes aparece tachada en el manuscrito original.
- ¹⁷ Para una revisión de la transformación de las dedicatorias de Humboldt en las versiones sucesivas en español, francés y alemán de la geografía de las plantas entre 1803 y 1807, véase Gómez Gutiérrez, 2016.
- ¹⁸ Cursivas añadidas.
- ¹⁹ Cursivas añadidas.
- ²⁰ Además de esta fuente impresa de 1802, dos copias manuscritas preliminares de esta “Nivelación barométrica” dibujada por Humboldt en 1801 fueron enviadas a Caldas por sus amigos Antonio Arboleda (1770-1825) y Santiago Pérez de Arroyo (1775-1845), establecidos en Popayán y Santafé en esos días. Véase “Nivellement barométrique du terrain depuis Carthagene á S[an]ta Fe” (1801), en: a- Archivo del Ejército de Tierra de Madrid, Ar.J-T.7-C.1_10, y b- Archivo del Ejército de Tierra de Madrid, Ar.J-T.7-C.1_10Bis.
- ²¹ Real Jardín Botánico de Madrid, AJB, Division III, M00529.
- ²² Por ejemplo, “Nivelación de algunas plantas que cultivamos en las cercanías del Ecuador” (1802); “Nivelación de 30 especies en el Imbabura” (1803); “Nivelación de las quinas” (1804).
- ²³ Para el reporte de Caldas sobre esta ascensión con Humboldt y Bonpland al volcán Pichincha, véase la “[Carta a José Celestino Mutis, Quito, junio 21]” (Bateman & Arias de Greiff, 1978, pp. 182-183).
- ²⁴ Véase: Humboldt, A. Volcan ou Rucu-Pitchincha (1802), tinta sobre papel, 16 x 26 cm, Staatsbibliothek zu Berlin – Preussischer Kulturbesitz (Biblioteca Estatal de Berlín - Alemania). Nachl. Alexander von Humboldt (Tagebücher), VIIbb/c, f. 412r. En: https://digital.staatsbibliothek-berlin.de/werkansicht?PPN=PPN779884310&PHYSID=PHYS_0806&view=overview-toc&DMDID=DMDLOG_0001
- ²⁵ Un análisis contextualizado del círculo ilustrado de Caldas en el paso del siglo XVIII al siglo XIX puede verse en Silva (2002; 2021): ambas obras constituyen un estudio comprensivo del proceso de formación y estrechos vínculos del primer grupo de intelectuales modernos en los territorios de la actual Colombia.
- ²⁶ Comunicado por Ulrich Paessler.
- ²⁷ Cursivas añadidas.

Artículo original

Peces del complejo lagunar Peregrinos, río Caquetá, municipio de Solano, Caquetá, Colombia

Fishes of the Peregrinos lagoon complex in Caquetá River, municipality of Solano, Caquetá, Colombia

✉ Mónica Sirley Celis-Granada*, ✉ Lina María Correa-Guarnizo,
✉ Alexander Velasquez-Valencia, ✉ Diego Ossa-Calderón, ✉ Yuliana Chala-Velásquez

Semillero de investigación en Ictiología Andino Amazónica-SICAa, Grupo de Investigación en Fauna Silvestre, Centro de Investigación de la Biodiversidad Andino Amazónica-INBIANAM, Universidad de la Amazonia, Florencia, Colombia

Resumen

Con el propósito de registrar la diversidad de peces del complejo lagunar Peregrinos ubicado en el municipio de Solano, Caquetá, se hizo una evaluación ecológica rápida entre el 30 de octubre y el 2 de noviembre del 2018 y el 30 de marzo y el 11 de abril del 2021. Los especímenes se recolectaron durante muestreos diurnos y nocturnos en 12 hábitats fluviales utilizando diferentes artes de pesca. Se capturaron 1.527 individuos distribuidos en siete órdenes, 35 familias y 153 especies. El orden Characiformes fue el de mayor riqueza, con el 47,7 %, y mayor número de familias. Los órdenes Cyprinodontiformes y Synbranchiformes solo registraron una especie en todo el muestreo. La familia Characidae registró el mayor número de especies, con 28 (18,3 %), siendo la más abundante *Hyphessobrycon* sp1, con 19,7 %. En 50 taxones solo se registró un individuo de, entre otras especies, *Leporinus fasciatus*, *Chilodus punctatus*, *Heros severus*, *Plagioscion squamosissimus* y *Helogenes marmoratus*. Se determinó que 17 de las especies son migratorias y el 54,9 % es de uso ornamental o de consumo. El hábitat con la mayor riqueza fue la laguna dos (70 especies). El estudio indicó que el complejo cuenta con 34,6 % de los peces reportados en el Sistema de Información de la Biodiversidad (SIB), además, se incluyeron nuevos registros en la colección ictiológica del Museo de Historia Natural de la Universidad de la Amazonia, Colombia (UAM).

Palabras clave: Conservación; Diversidad; Hábitats fluviales; Riqueza.

Abstract

To record the diversity of fishes present in the lagoon complex Peregrinos located in the municipality of Solano, Caquetá, we conducted a rapid ecological evaluation from October 30 to November 2, 2018, and from March 30 to April 11, 2021. The specimens were collected during day and night samplings in 12 river habitats using different fishing gear. We captured 1.527 individuals distributed in seven orders, 35 families, and 153 species. The order Characiformes had 47.7% of the total species richness and the highest number of families. Orders such as Cyprinodontiformes and Synbranchiformes recorded each only one species from the entire sample. The family Characidae had the highest number of species (28; 18.3%), as well as the most abundant species, *Hyphessobrycon* sp1 with 19.7 %. Only one individual was collected for 50 taxa, among them *Leporinus fasciatus*, *Chilodus punctatus*, *Heros severus*, *Plagioscion squamosissimus*, and *Helogenes marmoratus*. Seventeen species are migratory and 54.9% have commercial value as ornamental or food. The habitat with the greatest richness was lagoon two (70 species). Our study indicated that the complex has 34.6% of the fish reported in the SIB; besides, new records were included in the ichthyological collection of the *Museo de Historia Natural - Universidad de la Amazonia*, Colombia (UAM).

Keywords: Conservation; Diversity; River habitats; Richness.

Citación: Celis-Granada MS, Correa-Guarnizo LM, Velasquez-Valencia A, *et al.* Peces del complejo lagunar Peregrinos, río Caquetá, municipio de Solano, Caquetá, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):460-469, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1596>

Editor: Arturo Acero

***Correspondencia:**

Mónica Sirley Celis-Granada;
monicacelis64@gmail.com

Recibido: 10 de noviembre de 2021

Aceptado: 26 de mayo de 2022

Publicado: 28 de junio de 2022



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

Introducción

La cuenca amazónica tiene numerosos cuerpos de agua que conforman y dan origen a las diferentes zonas hidrográficas, constituidas principalmente por los ríos Caquetá, Putumayo y Amazonas, y es considerada la región con el mayor número de especies (764) comparada con otros sistemas fluviales (**DoNascimento et al.**, 2021). El río Caquetá ocupa el 43 % de la región amazónica y aproximadamente 203.914 km² corren por territorio colombiano. El río presenta islas, chorros, playas, remansos, angosturas, regadales, rápidos y sistemas lagunares con una gran riqueza de especies de peces (**Rodríguez-Fernández**, 1992; **Maldonado-Ocampo & Bogotá-Gregory**, 2007).

Según el Sistema de Información de la Biodiversidad (SIB), hasta el 2020 se habían registrado 404 especies en el departamento de Caquetá, de las cuales 179 corresponden a diferentes hábitats fluviales del municipio de Solano según datos de la Fundación Puerto Rastrojo (FPR), el Museo de Historia Natural (ICN-MHN) de la Universidad Nacional de Colombia, el Museo de Historia Natural (UAM) de la Universidad de la Amazonia, el Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH) y la Colección Zoológica de la Universidad del Tolima (CZUT) (**SIB**, 2021). En las publicaciones científicas sobre los afluentes del suroriente del río Caquetá, se destacan el río Yará, con 45 especies y 5 géneros (**Herrera-Collazos et al.**, 2020), y el río Mesay, con 79 especies (**Bejarano et al.**, 2006), así como la serranía de Chiribiquete (**Mojica et al.**, 2017), con 60. En el bajo Caguán, **De Souza et al.** (2019) registraron 204 especies en el muestreo del IR30 en algunos caños, lagunas, ríos y zonas de bosque inundado del municipio de Solano y 150 especies en un caño y una laguna en Cartagena del Chairá. Asimismo, se amplió la distribución de *Pseudorinelepis genibarbis* para el río Caquetá con individuos recolectados en la laguna Peregrinos (**Celis-Granada et al.**, 2019).

La laguna Peregrinos es importante en la zona baja del río Caquetá porque proporciona una variedad de microhábitats para numerosas especies de peces que utilizan estos ambientes para la alimentación, el crecimiento, el desove y como refugio (**Goulding**, 1980; **Yáñez-Arancibia et al.**, 1998; **Díaz-Ruiz et al.**, 2000; **Lasso et al.**, 2013; **Mesa & Lasso**, 2013; **Cala-Cala**, 2019). Sin embargo, el municipio de Solano, donde se ubica la laguna, acumula el 2,7 % de las alertas nacionales por pérdida del bosque amazónico debida a la tala indiscriminada, la minería ilegal y el establecimiento de sistemas productivos pecuarios y agrícolas (**Murcia et al.**, 2010; **Guzmán**, 2018; **IDEAM**, 2020). Estas actividades tienen un impacto negativo en el estado de conservación de los hábitats fluviales y su biota asociada, y causan un deterioro progresivo y acelerado de la integridad biótica, reduciendo la calidad del agua y produciendo la degradación de las cuencas hídricas (**Mugodo et al.**, 2006; **Rodríguez-Olarte et al.**, 2007; **Ortega et al.**, 2010; **Mojica et al.**, 2012; **Boivin et al.**, 2016; **Pinaya et al.**, 2016; **Castillo et al.**, 2017; **Peña et al.**, 2017).

Dado que en la actualidad no hay un listado de las especies presentes en el complejo lagunar y que las estrategias de manejo y conservación de los ecosistemas acuáticos y su fauna solo pueden plantearse con información clara de estas comunidades, nuestro objetivo fue documentar la diversidad de peces presente en el complejo lagunar Peregrinos del río Caquetá, municipio de Solano, así como hacer una aproximación taxonómica del estado del conocimiento de la diversidad íctica de este río y fortalecer la colección biológica del Museo de Historia Natural UAM de la Universidad de la Amazonia.

Materiales y métodos

El complejo lagunar Peregrinos se localiza en la inspección La Maná de la vereda Peregrinos en el municipio de Solano, departamento de Caquetá, Colombia. Su ubicación es estratégica en el área de conectividad biológica entre el Parque Nacional Natural Serranía de Chiribiquete y el Parque Nacional Natural La Paya (Putumayo). Asimismo, está conectado con el río Caquetá y cuenta con 233 ha de espejo de agua y tres lagunas naturales (www.pidamazonia.com). Las lagunas se encuentran en las coordenadas 00°05,302'S y 074°34,357'W, 00°03,449'S y 074°34,647'W, 00°04,086'S y 074°35,513'W (**Figura 1**).

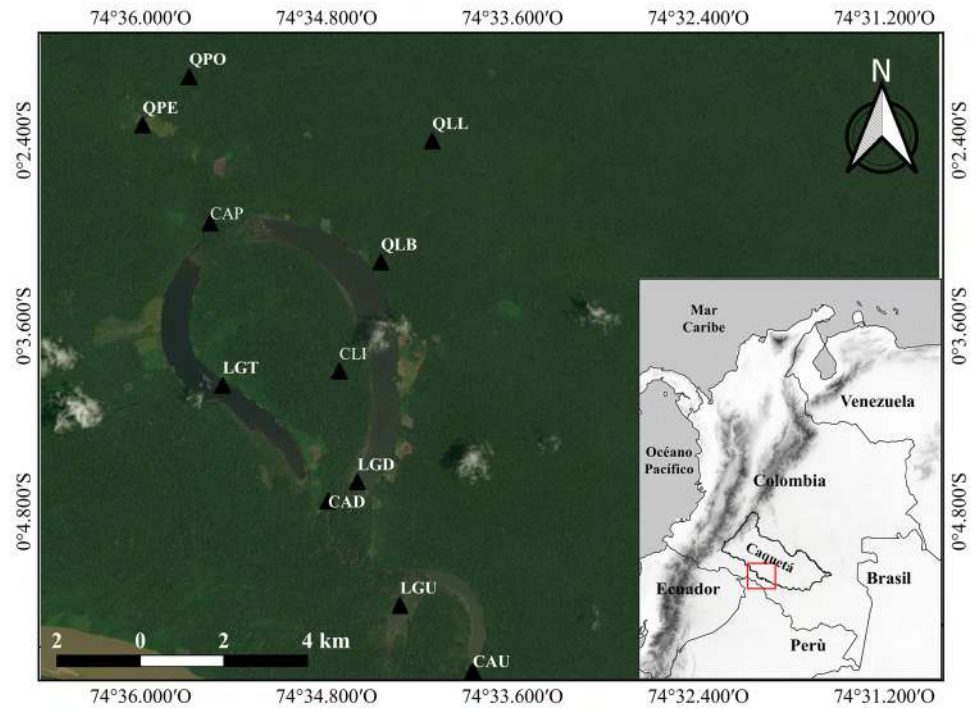


Figura 1. Área de estudio en el complejo lagunar Peregrinos, Solano, Caquetá, Colombia

En el complejo lagunar hay diferentes hábitats fluviales como caños y quebradas; se caracteriza por presentar un pH ácido (6,72), baja conductividad eléctrica (3 $\mu\text{S}/\text{cm}$), una temperatura del agua de 24,84 °C y alta transparencia; su color oscuro está determinado por la presencia de compuestos húmicos liberados por plantas en suelos que permanecen empantanados largo tiempo (Galvis *et al.*, 2006; Celis-Granada *et al.*, 2019). La comunidad vegetal está compuesta por vegetación sumergida de árboles, palmas, hierbas acuáticas y arbustos que se agrupan principalmente en las familias Fabaceae, Arecaceae, Malvaceae, Salicaceae y Lecythidaceae (Álvarez-Bermeo *et al.*, 2018).

Para la recolección de los especímenes se seleccionaron 12 hábitats fluviales correspondientes a tres lagunas (laguna uno (LGU), laguna dos (LGD) y laguna tres (LGT)), cinco caños (caño uno (CAU), caño dos (CAD), caño Peregrinos (CAP), caño la Isla (CLI) y caño Isla Grande (CIG)) y cuatro quebradas (La Loma (QLL), Loma Baja (QLB), La Pedregosa (QPE) y La Polvorosa (QPO)) (Figura 1). Los muestreos se realizaron entre el 20 de octubre y el 2 de noviembre del 2018 y el 30 de marzo y el 11 de abril del 2021. Con el fin de registrar la mayor diversidad de peces, se hicieron muestreos diurnos y nocturnos combinando artes de pesca pasivas (calandrios y mallas) y activas (jamas, red de arrastre, atarrayas y pesca eléctrica). Las artes de pesca se usaron según la profundidad, sustrato y morfología del hábitat fluvial y en cada localidad se estableció un transecto de longitud variable en función del ancho medio del punto de muestreo, con una longitud de muestreo de 200 m de cauce, procurando abarcar la mayor cantidad de microhábitats (Mojica *et al.*, 2014; Rodríguez-Olarte & Barrios, 2014).

Los peces capturados fueron anestesiados con eugenol (40 mg/L) para su registro fotográfico en vivo y posterior fijación con formaldehído al 10 %. Los ejemplares con más de 15 cm de longitud se inyectaron con esta disolución en la cavidad abdominal, en las branquias y en las masas musculares. Los especímenes se transportaron al laboratorio del Centro de Investigación de la Biodiversidad Andino Amazónica de la Universidad de la Amazonia (INBIANAM), allí fueron lavados, separados y posteriormente preservados en etanol al 70 % (Mojica *et al.*, 2005). Una vez preservados los ejemplares, se

determinó su género utilizando la clave taxonómica de **Van der Sleen & Albert** (2017). La validez de los géneros y especies se corroboró en **DoNascimento** (2021) y **Froese & Pauly** (2022). Las sinonimias se revisaron en la página web del Catálogo de Peces de la Academia de Ciencias de California (<http://calacademy.org/>), consultada en mayo del 2022, y en Amazon Fish (<http://www.amazon-fish/es>). Para la determinación de la especie, se utilizó la clave taxonómica de **Queiroz et al.** (2013). El listado de especies se organizó según la clasificación taxonómica de **Reis et al.** (2003), en la que las familias siguen un orden sistemático y los géneros y especies están listados alfabéticamente. Los especímenes recolectados están bajo el permiso marco de recolección de la Universidad de la Amazonia-Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible No. 01140 de 2016 y se encuentran depositados en la Colección Ictiológica del Museo de Historia Natural (UAM-P).

Para determinar el estado de conservación de cada especie, se revisó la *Red List of Threatened Species* de la **International Union for Conservation of Nature - IUCN**, el libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia (**Mojica et al.**, 2012), la Resolución 1912 para especies silvestres amenazadas (**Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible**, 2017) y la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre (**CITES**, 2021). Además, se registró el uso y el tipo de migración (**Zapata & Usma**, 2013; **DoNascimento et al.**, 2021). Por último, la información se organizó siguiendo el formato de DarwinCore para su publicación en el Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia.

Resultados

Se capturaron 1.527 individuos distribuidos en ocho órdenes, 35 familias y 153 especies. El orden Characiformes presentó la mayor abundancia ($n=1.112$), con el mayor número de familias (16) y especies (73), es decir, el 47,7 % del total de la riqueza registrada; el segundo orden fue Siluriformes, con el 31,4 % de las especies y 10 familias. Cuatro órdenes solo registraron una familia y Myliobatiformes y Synbranchiformes presentaron el menor número de individuos (**Tabla 1**).

El mayor número de individuos por familia correspondió a Characidae ($n=707$) y Cichlidae ($n=141$). Tres familias registraron menos de cinco individuos y las familias Sciaenidae, Cetopsidae y Chilodontidae un solo individuo en todo el muestreo. En cuanto al número de especies por familia, Characidae presentó el mayor registro, con 28 especies, seguida por Cichlidae con 18, Loricariidae con 14, Callichthyidae con 12, en tanto que siete familias registraron una sola especie (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1596/3228>).

Tabla 1. Número de individuos, familias y especies y porcentaje de las especies de peces por taxón capturadas en el complejo lagunar de Peregrinos, río Caquetá, municipio de Solano, Caquetá Colombia

Orden	Número de individuos	Familias	Especies	%
Beloniformes	11	1	1	0,65
Characiformes	1.122	16	73	47,70
Cichliformes	142	2	19	12,40
Cyprinodontiformes	15	1	1	0,65
Gymnotiformes	16	3	8	5,23
Myliobatiformes	7	1	2	1,31
Siluriformes	210	10	48	31,40
Synbranchiformes	4	1	1	0,65
Total	1.527	35	153	100

Con relación a las especies, se encontró que la más abundante fue *Hyphessobrycon* sp1 (**Figura 2**), con 301 individuos que representaron el 19,7 % del total de los individuos recolectados. *Hemigrammus unilineatus* y *Apistogramma* sp2 (**Figura 3**) también fueron abundantes, con 104 y 83 individuos, respectivamente. Cien especies (12,05 %) presentaron abundancias inferiores a cinco individuos, entre las que se destacan *Erythrinus erythrinus* (0,26 %), *Bario steindachneri* (0,2 %), *Pseudanos trimaculatus* (0,13 %) y *Myloplus asterias* (0,07 %).

La mayor riqueza se registró en la laguna dos, con 70 especies (45,7 %), la laguna uno y el caño Isla Grande registraron la misma riqueza, con 45 especies, pero con diferencias en el número de individuos: 344 y 151, respectivamente. Los hábitats fluviales con el menor número de especies e individuos fueron la quebrada La Loma (6 y n=17), la quebrada La Polvorosa (11 y n=18) y caño uno (12 y n=65). En la quebrada La Loma se registró la mayor dominancia, representada por *Hemigrammus* sp2, y la mayor equitatividad, en la quebrada La Polvorosa (0,96).



Figura 2. *Hyphessobrycon* sp1 recolectada en el complejo lagunar Peregrinos, Solano, Caquetá, Colombia



Figura 3. *Apistogramma* sp2 recolectada en el complejo lagunar Peregrinos, Solano, Caquetá, Colombia

El 48,4 % (74) de las especies fue exclusivo de alguno de los hábitats fluviales y 29 especies (18,9 %) se registraron en las tres lagunas: 20 en la laguna dos, 27 especies en los caños y 18 en las quebradas (11,8 %). El caño dos y la quebrada La Loma presentaron solo una especie exclusiva (*Bunocephalus verrucosus* y *Helogenes marmoratus*). *Corydoras leucomelas*, *Hoplias malabaricus*, *Pyrrhulina brevis* y *Tetragonopterus cf. argenteus* se capturaron en más de cinco localidades.

De las especies registradas, 24 están en alguna categoría de amenaza nacional; 19 especies están catalogadas como de preocupación menor (LC) según la *Red List* de la UICN. Los datos de *Potamotrygon constellata*, *Tatia altae*, *Hypostomus oculus* e *H. niceforoi* fueron deficientes (DD). En el Libro Rojo de Colombia se registra en estado crítico (CR) *Pseudoplatystoma fasciatum*, en tanto que ninguna de las especies estaba en el registro de categoría amenazada en el CITES (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1596/3228>). El 11,1 % de las especies es migratorio: *Pimelodus blochii* y *P. fasciatum* de migración grande, el 5,23 % de migración mediana y el 4,58 % de migración corta. Las especies identificadas a nivel de género no se incluyeron en la revisión para evitar sesgos o errores en la información.

Discusión

La abundancia y riqueza de los taxones registrados en el complejo lagunar Peregrinos siguió el mismo patrón descrito en numerosos ecosistemas dulceacuícolas, en los que predominan especies de los órdenes Characiformes y Siluriformes (**Galvis et al., 2006; Maldonado-Ocampo et al., 2008**). Este resultado obedece a que los Characiformes poseen formas muy diversas y gran plasticidad trófica en relación con la disponibilidad de alimento (**Maldonado-Ocampo et al., 2005; Galvis et al., 2007; Velásquez-Valencia et al., 2013**). Por otra parte, los Siluriformes, aunque con menos especies, presentan mayores adaptaciones anatómicas y morfológicas que los Characiformes (**Zapata & Usma, 2013**).

En cuanto a las especies consideradas por familias, en algunos estudios en aguas tropicales y en la mayoría de las cuencas del país se menciona que hay muchas familias con pocas especies, lo que podría incidir, de alguna manera, en el gran número de especies raras encontradas (**Smith & Petreere, 2008; Sá-Oliveira et al., 2016; DoNascimento et al., 2021**). Además, se debe considerar que las particularidades de cada hábitat ejercen influencia en la composición de las comunidades de peces; por ello, y teniendo en cuenta las variaciones entre los puntos de muestreo y las diferencias entre los hábitats fluviales que componen el complejo lagunar Peregrinos, se deduce que estos influyen en los patrones de distribución de las especies recolectadas (**Mendoza et al., 2005; Mueller & Pyron, 2010; Montoya-Ospina et al., 2018**).

Los géneros con la mayor abundancia registrada fueron *Hyphessobrycon* y *Hemigrammus*; las especies que conforman estos géneros presentan una reproducción continua a lo largo de todo el año, por lo que el número de individuos de la población se mantiene elevado (**Taphorn, 2003**). Además, las características de los hábitats del complejo lagunar les brindan refugio y abundante alimento y su capacidad de dispersión les ayuda a soportar hábitats con alteraciones (**Ortega et al., 2010; Lasso et al., 2013**).

Por otro lado, la mayoría de las especies tiene gran importancia comercial como alimento o para uso ornamental, así como en investigaciones de carácter ecológico (**Villamil-Rodríguez et al., 2018**). Las especies de consumo, como *Ageneiosus inermis*, *Serrasalmus rhombeus*, y *Leporinus friderici*, entre otras, son importantes para la seguridad alimentaria de los núcleos familiares ribereños y algunos pobladores dependen económicamente de la extracción de especies ornamentales como las *Corydoras*, por lo que la importancia de la pesca de subsistencia de las comunidades locales del complejo lagunar es vital (**Agudelo, 2015**). De las 17 especies migratorias registradas, 14 constituyen fuente de alimento.

Estas especies migratorias se desplazan principalmente por fluctuaciones en el ambiente acuático, ya sea por inicio o finalización de temporadas de lluvias, disponibilidad de alimento o reproducción. En el complejo lagunar se destaca *Prochilodus nigricans*,

una especie migratoria que utiliza las lagunas para su ciclo de alimentación, crecimiento y reproducción, además de ser una de las más importantes para la pesquería de la región, y *P. fasciatum* que se encuentra en estado crítico según el Libro Rojo de Colombia. Estas especies, como el resto de las especies migratorias, son vulnerables frente a algunas amenazas debido a que en sus desplazamientos cortos, medianos o largos se enfrentan a la contaminación, la destrucción de hábitats y la pesca indiscriminada (Galvis *et al.*, 2007; Palma, 2014).

Aunque Colombia tiene aproximadamente 1.610 especies de peces y es el segundo país más diverso en peces dulceacuícolas (DoNascimento *et al.*, 2021), el complejo lagunar Peregrinos se encuentra en una zona donde los procesos de deforestación crecen de manera acelerada y la zona baja del río Caquetá está sujeta a presión por la exploración y extracción de oro de aluvión de manera ilegal, por lo que es importante realizar estudios que nos permitan documentar la diversidad de peces y generar estrategias de manejo y conservación. Este planteamiento tiene en cuenta el número de especies registradas en el SIB para los hábitats fluviales del municipio de Solano, donde, según nuestro estudio, el complejo cuenta con el 34,6 % de los peces registrados y, además, se añadieron nuevos registros para la zona.

Información suplementaria

Ver información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1596/3228>

Agradecimientos

A la Universidad de la Amazonia, el Centro de Investigación de la Biodiversidad Andino Amazónica INBIANAM, el Pilar de Desarrollo Agroambiental del Programa REM – Colombia Visión Amazonía, iniciativa del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible que cuenta con el apoyo de los gobiernos de Alemania, Reino Unido y Noruega a través de KfW, y al proyecto Colombia BIO Expedición Caquetá BIO denominado “Fortalecimiento de la gestión integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos para el establecimiento de herramientas de contribuyan a su conservación en áreas de posacuerdo del departamento del Caquetá”, BPIN 2018000100003. A los investigadores locales de la vereda Peregrinos, especialmente a Jorge Eliecer Rojas Quiroz por la colaboración en campo, al biólogo Sebastián Medina por el apoyo en el primer muestreo, al biólogo Alejandro Navarro por la elaboración del mapa y a Yorlan Andrés Repizo por su ayuda en el laboratorio.

Contribución de los autores

MSCG: revisó la base de datos, redactó la metodología, organizó los resultados y revisó la redacción del manuscrito; LMCG: organizó y depuró la base de datos, elaboró las tablas de resultados, ajustó el documento a los lineamientos de la revista y ayudó en la redacción; AVV: revisó la base de datos y la redacción del manuscrito; DOC: revisó la literatura y ajustó el documento a los lineamientos de la revista; YChV: depuró la base de datos y la organizó en el formato DarwinCore para su publicación en el Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia, organizó las tablas de los resultados, la literatura científica y revisó la validez de los géneros.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses

Referencias

Agudelo, E. (2015). *Bases científicas para contribuir a la gestión de la pesquería comercial de bagres (familia Pimelodidae) en la Amazonia colombiana y sus zonas de frontera*. (Tesis de grado). Barcelona: Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals – ICTA, Universitat Autònoma de Barcelona. 260 pp. <http://hdl.handle.net/10803/314187>

- Álvarez-Bermeo, C.A., Díaz-Chaux, J.T., Velásquez-Valencia, A.** (2018) *Catálogo comunitario de flora silvestre vereda Peregrinos*. Florencia, Caquetá, Colombia: Editorial de la Universidad de la Amazonia. 200 pp.
- Bejarano, I., Blanco, M.P., Mojica, J.I.** (2006). La comunidad íctica del río Mesay durante el periodo de aguas altas (Caquetá, Amazonia colombiana. *Caldasia*, 28(2), 359-370. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/39293/62887>
- Boivin, N.L., Zeder, M.A., Fuller, D.Q., Crowther, A., Larson, G., Erlandson, J.M., Denham, E., Petraglia, M.D.** (2016). Ecological consequences of human niche construction: Examining long-term anthropogenic shaping of global species distributions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(23), 6388-6396. <https://doi.org/10.1073/pnas.1525200113>
- Cala-Cala, P.** (2019). *Medio ambiente y diversidad de los peces de agua dulce de Colombia*. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 528 pp.
- Castillo, V.S., Murcia, E.A.T., Mejía, C.A.R., Ortiz, E., Fajardo, M.Y.** (2017). La explotación de oro en la vereda Sombrederos, río Caquetá: de la ilusión a la desolación. *Revista de la Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas*, 7(2), 117-130. <http://www.udla.edu.co/revistas/index.php/faccea/article/view/723>
- Celis-Granada, M.S., Medina, C.S., Beltrán, C.** (2019). New record of the species *Pseudorinelepis genibarbis* (Loricariidae: Rhinelepininae) for the Caquetá River basin, Colombia. *Zootaxa*, 4658(1), 193-196. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4658.1.12>
- CITES.** (2021). Apéndices I, II y III. Ginebra: Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres. 84 pp. <https://cites.org/sites/default/files/esp/app/2021/S-Appendices-2021-06-22.pdf>
- De Souza, L.S., García-Melo, J.E., Maldonado-Ocampo, J.A., Sánchez, E., Silva Parra, J.S., Moquena-Carbajal, C., Rodríguez-Triana, H. R., Garay-Ortiz, J., Ruíz- Angulo, A., Rodríguez, H., Peña-Pérez, R.** (2019). *Peces del bajo río Caguán en su área de confluencia con el río Caquetá*. IR30 Bajo Caguán-Caquetá. Field Museum. 454 pp.
- Díaz-Ruiz, S., Aguirre-León, A., Cano-Quiroga, E.** (2000). Evaluación ecológica de las comunidades de peces en dos sistemas lagunares estuarinos del sur de Chiapas, México. *Hydrobiológica*, 16(2), 197-210. <http://www.scielo.org.mx/pdf/hbio/v16n2/v16n2a9.pdf>
- DoNascimento, C., Bogotá-Gregory, J. D., Albornoz-Garzón, J. G., Méndez-López, A., Villa-Navarro, F. A., Herrera-Collazos, E. E., Agudelo-Zamora, H., Arce H. M.** (2021). *Lista de especies de peces de agua dulce de Colombia / Checklist of the freshwater fishes of Colombia*. v. 2.13. Asociación Colombiana de Ictiólogos. Dataset/Checklist. <https://doi.org/10.15472/numrso>
- Froese, R. & Pauly, D.** Editors. (2022). *FishBase*. World Wide Web electronic publication. www.fishbase.org, version (02/2022).
- Galvis, G., Mojica, J.I., Duque, S.R., Castellanos, C., Sánchez-Duarte, P., Arce, M., Gutiérrez, A., Jiménez, L.F., Santos, M., Vejarano-Rivadeneira, S., Arbeláez, F., Prieto, E., Leiva, M.** (2006). *Peces del medio Amazonas región de Leticia. Serie de guías tropicales de campo*. Bogotá D.C.: Conservación Internacional. 546 pp
- Galvis, G., Sánchez-Duarte, P., Mesa-Salazar L.M., López-Pinto, Y., Gutiérrez-E, M.A., Gutiérrez-Cortés A., Leiva Castaño M., Castellanos- Castillo, C.** (2007). *Peces de la amazonia colombiana con énfasis en especies de interés ornamental*. Bogotá D.C.: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural INCODER. Universidad Nacional de Colombia. Instituto Amazónico de Investigaciones SINCHI. 489 pp.
- Goulding, M.** (1980). *The fishes and the forest. Explorations in Amazonian Natural History*. Berkeley: University of California Press. 292 pp.
- Guzmán-Herrera, M.** (2018). Mercurio, minería e ilegalidad. La amenaza del río Caquetá y de la comunidad Uitoto. (Artículo académico). *Centro de estudios de la Orinoquia*, 6 pp. <http://hdl.handle.net/1992/31303>
- Herrera-Collazos, E. E., Urbano-Bonilla, A., Maldonado-Ocampo, J. A.** (2020): Peces asociados a sistemas acuáticos del río Yari, Amazonía Colombiana. v2.1. *Asociación Colombiana de Ictiólogos*. Dataset/Occurrence. <https://doi.org/10.15472/pmkjw1>
- IDEAM.** (2020). Detección temprana de deforestación. (Boletín No. 24, Tercer trimestre, julio-septiembre). Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2 pp <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023894/24BOL.AT-D.pdf>
- Lasso, C., Rial, A., González-B, V.** (2013). *Morichales y cananguchales de la Orinoquia y Amazonia: Colombia-Venezuela. Parte I*. Bogotá, D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 344 pp.

- Maldonado-Ocampo, J.A., Bogotá-Gregory, J.D.** (2007). *Peces*. En: Ruiz S. L., Sánchez E., Tabares E., Prieto A., Arias J. C., Gómez R., Castellanos D., García P., Rodríguez L. (eds). *Capítulo 2: Diversidad biológica y cultural del sur de la Amazonia colombiana - Diagnóstico*. Bogotá D.C.: Corpoamazonia, Instituto Humboldt, Instituto SINCHI, UAESPNN, 168-177 pp.
- Maldonado-Ocampo, J., Vari, R., Usma, J.** (2008). Checklist of the freshwater fishes of Colombia. *Biota Colombiana*, 9 (2), 143-237.
- Mendoça, F.P., Magnuson, W.E., Zuanon, J.** (2005). Relationships between habitat characteristics and fish assemblages in small streams of Central Amazonia. *Copeia*, 2005(4), 751-764. [https://doi.org/10.1643/0045-8511\(2005\)005\[0751:RBHCAF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1643/0045-8511(2005)005[0751:RBHCAF]2.0.CO;2)
- Mesa, L.M. & Lasso, C.A.** (2013). Capítulo 5: *Aproximación geoquímica al subsistema acuático de los morichales y cananguchales de la Orinoquia y Amazonia*. En: Lasso, C. A., Rial, A. & González-B, (Eds) *V. Morichales y cananguchales de la Orinoquia y Amazonia: Colombia-Venezuela. Parte I*. Bogotá, D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. pp. 85-96.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.** (2017). Resolución 1912 de 2017 “*Por la cual se establece el listado de las especies silvestres amenazadas de la diversidad biológica colombiana continental y marino costera*”. Bogotá D.C.
- Mojica J.I., Galvis, G., Arbeláez, F., Santos, M., Vejarano, S., Prieto-Piraquive, E., Arce, M., Sánchez-Duarte, P., Castellanos, C., Gutiérrez, A., Duque, S., Levon-García, J. Granado-Lorencio, C.** (2005). Peces de la cuenca del río Amazonas en Colombia: Región de Leticia. *Biota Colombiana*, 6(2), 191-210. <http://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota/article/view/159>
- Mojica, J.I., Usma, J.S., Álvarez-León, R., Lasso, C.A.** (2012). *Libro rojo de peces dulceacuáticos de Colombia 2012*. Bogotá D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, WWF Colombia y Universidad de Manizales. 319 pp.
- Mojica, J.I., Lobón-Cerviá, J., Castellanos, C.** (2014). Quantifying fish species richness and abundance in Amazonian streams: assessment of a multiple gear method suitable for Terra Firme stream fish assemblages. *Fisheries Management and Ecology*, 21(3), 220-233 pp. <https://doi.org/10.1111/fme.12067>
- Mojica, J.I., Taphorn, D., Martínez, C.** (2017). Peces de la serranía de Chiribiquete, Amazonia colombiana: lista preliminar, expediciones 2015, 2016 y 2017. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI. *Revista Colombia Amazónica*, (10), 161-176.
- Montoya-Ospina, D.C., Villa-Navarro, F.A., López-Delgado, E.O.** (2018). Composición y estructura de peces de la microcuenca del río Anchique, Tolima, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 66(1), 336-351. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i1.27530>
- Mueller, R.J., Pyron, M.** (2010). Fish assemblages and substrates in the middle Wabash River, USA. *Copeia*, 2010(1), 47-53. <https://doi.org/10.1643/CE-08-154>
- Mugodo, J., Kennard, M.J., Liston, P., Nichols, S., Linke, S., Norris, R.H., Lintermans, M.** (2006). Local stream habitat variables predicted from catchment scale characteristics are useful for predicting fish distribution. *Hydrobiologia*, 572(1), 59-70. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0252-7>
- Murcia, G.U.G., Huertas, M.C., Rodríguez, J. M., Castellanos, H.O.** (2010). *Monitoreo de los bosques y otras coberturas de la Amazonia colombiana, datos del año 2010*. Bogotá D.C.: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi. 177 pp.
- Ortega, H., Chocano, L., Palma, C., Samanez, I.** (2010). Biota acuática en la Amazonía peruana: diversidad y usos como indicadores ambientales en el Bajo Urubamba (Cusco – Ucayali). *Revista Peruana de Biología*, 17(1), 029-035. <https://doi.org/10.15381/rpb.v17i1.47>
- Palma, S.L.** (2014). *Manejo integrado y sostenible de los recursos hídricos transfronterizos en la cuenca del Amazonas considerando la variabilidad y el cambio climático. Componente-II comprensión de la base de recursos naturales de la cuenca del río Amazonas*. Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la agencia OTCA. 60 pp.
- Peña-Salamanca, J.E., Cantera-Kuntz, J.R., Muñoz, E.** (2017). *Evaluación de la contaminación en ecosistemas acuáticos: Un estudio de caso en la laguna de Sonso, cuenca alta del río Cauca*. Cali: Universidad del Valle. 305 pp.
- Pinaya, W.H.D., Lobón-Cervia, F.J., Pita, P., Buss de Souza, R., Freire, J., Isaac, V. J.** (2016). Multispecies fisheries in the lower Amazon River and its relationship with the regional and global climate variability. *PLoS ONE*, 11(6), e0157050. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157050>

- Queiroz, L.J., Torrente-Vilara, G., Massaharu-Ohara, W., Silva-Pires, T.H., Zuanon, J., Costa-Doria, C.R.** (2013). Peixes do rio Madeira. vol. 1, 2, 3.
- Reis R.E., Kullander, S.O., Ferraris, C.J.** (2003) *Check list of the freshwater fishes of South and Central America*. PortoAlegre: EDIPUCRS. 742 p.
- Rodríguez-Fernández, C.A.** (1992). *Bagres, malleros y cuerberos en el bajo río Caquetá. Tropenbos- Colombia*. Bogotá D.C.: Tercer Mundo Editores. 152 pp.
- Rodríguez-Olarte, D. & Barrios-Gómez, M.** (2014). Gradientes, estabilidad y estado de conservación de peces en la cuenca alta del río Turbio, vertiente andina del Orinoco, Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, 62(3), 987-996. <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i3.12133>
- Rodríguez-Olarte, D., Coronel, J., Amaro, A., Taphorn, B.D.C.** (2007). Línea base para la estimación de la integridad en comunidades de peces en la cuenca del río Tocuyo, vertiente del Caribe, Venezuela. *Memoria de La Fundación La Salle de Ciencias Naturales*, 165, 63-81.
- Sá-Oliveira, J.C., Ferrari, S.F., Vasconcelos, H.C.G., Mendes-Junior, R.N.G., Araújo, A.S., Costa-Campos, C.E., Nascimento, W.S., Isaac, V. J.** (2016). Restoration effects of the riparian forest on the intertidal fish fauna in an urban area of the Amazon River. *The Scientific World Journal*, 9 pp. <https://doi.org/10.1155/2016/2810136>
- SiB Colombia.** (2021, marzo 26). Colecciones en línea, Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia. <https://coleccion.biodiversidad.co/>
- Smith, S.W. & Petrere, M.** (2008). Spatial and temporal patterns and their influence on fish community at Itupararanga Reservoir, Brazil. *Revista de Biología Tropical*, 56(4). <https://doi.org/10.15517/rbt.v56i4.5775>
- Taphorn, B.** (2003). *Manual de identificación de los peces Characiformes, de la cuenca del río Apure en Venezuela*. Guanare, Estado Portuguesa, Venezuela: Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales. 393 pp.
- Van der Sleen, P. & Albert, J.** (2017). *Field guide to the fishes of the Amazon, Orinoco, and Guianas*. Princeton University. 464 pp. ISBN: 10: 0691170746
- Velásquez-Valencia, A., Celis-Granada, M.S., Ruiz-Valderrama D.H.** (2013). *Estado actual de la investigación y usos de la fauna silvestre Andino Amazónica Colombiana*. Florencia, Caquetá: Universidad de la Amazonia. 80 pp.
- Villamil-Rodríguez, J.F., Cortés-Ávila, L., Rodríguez-Pulido, J.A.** (2018). Generalidades sobre la migración de bagres amazónicos de la familia Pimelodidae y su relación con los ciclos hidrológicos. *Orinoquia - Universidad de los Llanos*, 22(2), 224-235. <https://doi.org/10.22579/20112629.530>
- Yáñez-Arancibia, A., Twilley, R.R., Lara-Domínguez, A.L.** (1998). Los ecosistemas de manglar frente al cambio climático global. *Madera y Bosques*, 4(2), 3-19. <https://doi.org/10.21829/myb.1998.421356>
- Zapata, L.A., Usma, J.S.** (2013). *Guía de las especies migratorias de la biodiversidad en Colombia. Peces*. Bogotá D. C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible / WWF-Colombia. 486 pp.

Artículo original

Variación estacional de abejas euglosinas (Apidae: Euglossini) en el norte de la Orinoquia colombiana

Seasonal variation of Euglossine bees (Apidae: Euglossini) in the North of the Colombian Orinoquia

✉ Néstor Pérez-Buitrago*, ✉ Laura Johana Mojica-Candela, ✉ Juan Carlos Agudelo-Martínez

Grupo de Investigación en Ciencias de la Orinoquia - GICO, Universidad Nacional de Colombia, Sede Orinoquia, Arauca – Caño Limón, Arauca, Colombia

Resumen

Las abejas euglosinas son importantes polinizadores de múltiples especies de plantas neotropicales, pero en muchas localidades de Colombia existe poca información sobre su presencia. El objetivo de este estudio fue documentar el cambio en la riqueza y abundancia de especies de las abejas de las orquídeas (Apinae: Euglossini) durante las temporadas seca y lluviosa en tres ambientes (bosque de galería, sabana inundable, y un sendero con vegetación secundaria) del departamento de Arauca, Colombia. Los especímenes se recolectaron por captura directa usando cebos libres y la instalación de 32 trampas de botella y cuatro tipos de cebo. La intensidad diaria del muestreo fue de siete horas (7:00-14:00) durante 10 días consecutivos en cada temporada climática. Se recolectaron 367 especímenes pertenecientes a tres géneros y 17 especies que representaron entre el 81,1 y el 91,9 % de las especies esperadas en la zona de estudio. La sabana inundable y el sendero ecológico fueron los ambientes con mayor riqueza de especies y abundancia, comparados con el bosque de galería. Durante la temporada lluviosa se registraron 16 especies (ocho exclusivas) y en la seca, nueve especies (una exclusiva). Se registró una mayor riqueza y abundancia de especies durante la época lluviosa. Este es el primer estudio de abejas euglosinas en las sabanas del departamento de Arauca; se reporta una diversidad comparable a otras localidades de Colombia y otros países neotropicales.

Palabras clave: Euglossini; Abejas de las orquídeas; Estacionalidad climática; Orinoquia colombiana.

Abstract

Euglossine bees are important pollinators of multiple neotropical plant species; however, in many Colombian locations, there is little information about their occurrence. Our objective was to document the change in the richness and abundance of orchid bee species (Apinae: Euglossini) during the dry and rainy seasons in three environments (gallery forest, floodplain, and a path with secondary vegetation) in the department of Arauca, Colombia. Specimens were collected by direct captures using free baits, 32 bottle traps, and four types of bait. The daily intensity of sampling was seven hours (7:00-14:00) for 10 consecutive days in each climatic season. We collected 367 specimens belonging to three genera and 17 species, which represent between 81,1% and 91,9% of the expected species in the study area. The flooded savannah and the path with secondary vegetation were the environments with the highest species richness and abundance compared to the gallery forest. During the rainy season, 16 species were recorded (8 of them exclusive) and nine species (one of them exclusive) in the dry season. There were higher richness and abundance of species during the rainy season. This is the first study of Euglossini bees in savannas of the department of Arauca where our results indicate a diversity comparable to other locations in Colombia and other Neotropical countries.

Key words: Euglossini; Orchid bees; Seasonality; Colombian Orinoquia.

Citación: Pérez-Buitrago N, Mojica-Candela LJ, Agudelo-Martínez JC. Variación estacional de abejas euglosinas (Apidae: Euglossini) en el norte de la Orinoquia colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):470-481, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1636>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Néstor Pérez-Buitrago;
nfperezb@unal.edu.co

Recibido: 22 de febrero de 2022

Aceptado: 6 de junio de 2022

Publicado: 28 de junio de 2022



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

Introducción

La polinización es una de las interacciones biológicas fundamentales para la supervivencia de las poblaciones de mamíferos y aves, entre las especies animales, así como de muchos tipos de insectos (**Ramos-Jiliberto et al.**, 2020). Esta interacción ha recibido en los últimos años atención por las evidencias que documentan la aparente declinación de las poblaciones de insectos (**Goulson**, 2019; **Wagner et al.**, 2021), incluidos los polinizadores, debido a factores como los patógenos, el uso excesivo de pesticidas y el cambio climático (**Dicks et al.**, 2021; **Parreño et al.**, 2021). Aunque hay múltiples problemas que afectan la biodiversidad, el declive en las poblaciones de polinizadores podría tener efectos directos en varios ámbitos relacionados con el ser humano, como la economía, la seguridad alimentaria y la disponibilidad de vegetales (**Klein et al.**, 2018). La comunidad científica procura indagar qué especies animales polinizan las especies vegetales, determinar su contribución al éxito reproductivo de las plantas y entender el mecanismo que usan para hacer efectivo el proceso (**Amaya-Márquez**, 2016), pero, aun así, en ecosistemas altamente diversos como los tropicales esta información es limitada por la gran riqueza de especies que, en muchos casos, está deficientemente documentada (**Nates-Parra et al.**, 2016).

Los países muy diversos como Colombia están expuestos a ese nivel de desconocimiento de las redes de interacción asociadas a la polinización, situación que se acentúa en regiones como la Orinoquia, donde la investigación es escasa (**Arbeláez-Cortés**, 2013) por factores como el aislamiento geográfico, la ausencia de instituciones con programas sistemáticos de investigación y los problemas de orden público (**Agudelo Martínez & Pérez-Buitrago**, 2015). Como región biogeográfica, la Orinoquia colombiana abarca el 22 % del territorio nacional y está constituida por diferentes tipos de ecosistemas: bosques de galería, matas de monte y morichales inmersos en una matriz de sabanas de altillanura e inundables con un régimen climático contrastante de temporadas de lluvias y sequía intensas (**Rippstein et al.**, 2001). Por su alta riqueza ecosistémica y biológica la región ha sido considerada un ecosistema estratégico para la humanidad (**Correa et al.**, 2005). Esos atributos han propiciado el interés por explorar sus recursos, lo que ha causado transformaciones en el paisaje a través de la historia, primero, con actividades de ganadería extensiva desde finales del siglo XIX, y luego, en las últimas décadas del siglo XX, con la explotación de hidrocarburos y proyectos de agricultura extensiva de arroz y palma africana (**Viloria-de la Hoz**, 2009). Por otro lado, las iniciativas de explotación de los recursos de la región no han estado en consonancia con las iniciativas de investigación para entender su biodiversidad y los procesos del funcionamiento de sus ecosistemas.

En la región de la Orinoquia los estudios sobre la comunidad de polinizadores son escasos, lo que es más dramático en taxones como el de las abejas euglosinas (Apinae: Euglossini), que son importantes polinizadores de varias familias de plantas neotropicales como las orquídeas (**Bonilla-Gómez & Nates**, 1992; **Ramírez et al.**, 2002; **Otero & Sandino**, 2003). En general, hay muchas brechas en la comprensión de la biología de las euglosinas, las cuales empezaron a ser documentadas apenas en los años 60, cuando se generaron técnicas de captura con compuestos aromáticos y terpenoides como cebos (**López**, 1963) para este elusivo taxón. Se ha sugerido que los machos de esta tribu de abejas buscan las especies de orquídeas para recolectar recursos aromáticos que funcionan como precursores de compuestos que atraen a las hembras durante la reproducción (**Ramírez, et al.**, 2002; **Parra-H, et al.**, 2016).

El objetivo de este estudio fue documentar la riqueza y la abundancia de especies de abejas de la tribu Euglossini en tres ambientes del norte de la Orinoquia colombiana y describir los cambios en la composición de la comunidad asociados con las temporadas climáticas de sequía y lluvias de la región.

Métodos

Área de estudio

Los especímenes se recolectaron en tres ambientes localizados en la zona rural del municipio de Arauca: sabana inundable (SI) (6°59'26,53"N; 70°36'39,49"W), bosque

de galería (BG) (6°59'18,82"N; 70°36'9,87"W) y un terraplén (UN) que sirve como un sendero ecológico con vegetación secundaria que existe hace más de 20 años en la Sede Orinoquia de la Universidad Nacional de Colombia (7° 0'37,98"N; 70°44'37,80"W). El paisaje predominante en el área de estudio es de sabana inundable con presencia de bosques de galería y fragmentos de bosque aislados (Rangel-CH & Minorta-Cely, 2014). La precipitación promedio anual en la zona es de 1.500 mm, con un régimen unimodal compuesto por un periodo de lluvias de ocho meses (abril – noviembre) y uno seco de cuatro meses (diciembre – marzo) (Rippstein *et al.*, 2001).

Recolección de especímenes

Los muestreos se realizaron en las temporadas de sequía (febrero - marzo) y lluvias (abril - mayo) del 2018 durante diez días consecutivos en cada uno de los ambientes y por temporada climática (total 20 días por ambiente). Para la recolección de las abejas se implementaron dos técnicas complementarias. Primero, se dispuso un transecto lineal de 350 m con ocho estaciones cada 50 m; en cada estación se instalaron cuatro trampas de botella modificando el método propuesto por Vélez & Pulido-Barrios (2005). Se usaron botellas de 500 ml, con aberturas de 2,5 cm de diámetro cebadas con 0,5 ml de eucaliptol (Laboratorio San Jorge), metil salicilato (Laboratorio San Jorge), y extracto de vainilla comercial (Levapan), compuestos que han sido ampliamente empleados como atrayentes en estudios previos (Ricklefs *et al.*, 1969; Aguiar & Gaglianone, 2008, 2011; Sydney & Gonçalves, 2015). Además, se empleó extracto de flores secas de *Vernonanthura brasiliensis* (L.) H. Rob. (Asteraceae), una especie aromática común en las sabanas de la región. Segundo, se usó la técnica de “cebos libres” que consiste en colgar un algodón impregnado con 1 ml de atrayente a 1,5 m de altura para capturar directamente las abejas con red entomológica (Nemésio & Morato, 2006). Se hacían cuatro recorridos por día, a las 7:00, 9:00, 11:00 y 14:00 horas, recolectando y registrando los especímenes capturados en las trampas y en los cebos libres. Los especímenes recolectados fueron trasladados y depositados en la Colección Entomológica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Orinoquia (CEO), para su limpieza, montaje e identificación hasta el nivel taxonómico más explícito posible usando la clave de abejas euglosinas de Colombia (Bonilla-Gómez & Nates, 1992) y el apoyo de un experto en el taxón. Se siguió la nomenclatura propuesta por Moure *et al.* (2012) para este grupo taxonómico. La información asociada a los especímenes puede consultarse en la base de datos del SiB Colombia y de la Global Biodiversity Information Facility (GBIF) en el sitio de CEO (Agudelo-Martínez & Pérez-Buitrago, 2020).

Análisis de datos

Se describió la comunidad de Euglossini detallando la cantidad de individuos por especie; se usaron los estimadores no paramétricos Chao 1 y Jackknife 1 para calcular el número de especies probables en la zona de estudio y evaluar la eficiencia del muestreo (Colwell & Coddington, 1994; Chazdon *et al.*, 1998). Para evaluar la diversidad, se calculó el índice de diversidad alfa de Shannon-Wiener usando el logaritmo natural (H') y a partir de este valor se estimó el número efectivo de especies en cada localidad (Jost, 2006). Se calculó el índice de Jaccard para establecer la similitud entre los ambientes muestreados. Con el fin de comparar la riqueza de especies y abundancias en cada uno de ellos se hizo una prueba de Kruskal-Wallis utilizando cada uno de los ambientes como grupos. Para establecer diferencias en la tasa de recolección de especímenes entre las horas de muestreo también se empleó una prueba de Kruskal –Wallis considerando cada hora (7:00, 9:00, 11:00 y 14:00) como un grupo. Para comparar la cantidad de abejas recolectadas por técnica, se hizo una prueba de Yuen contrastando la cantidad de especímenes capturados con cebos libres, y las trampas de botella. Además, se empleó esta misma prueba pareada para comparar la abundancia y la riqueza de las especies en la temporada seca y en la de lluvias. Para visualizar los cambios en la riqueza y la equitatividad de las euglosinas, se elaboraron curvas de rango-abundancia de las temporadas de sequía y lluvias. Los análisis se realizaron con el programa R (R Core Team, 2019) y el cálculo de los estimadores no paramétricos, con el programa EstimateS 9.1.0 (Colwell, 2013).

Resultados

Se recolectaron 367 especímenes pertenecientes a tres géneros y 17 especies. El género mejor representado fue *Euglossa*, con 12 especies (70,6 %), seguido por *Eulaema*, con cuatro (23,5 %) y *Exaerete* con una (5,9 %). La especie más abundante fue *Euglossa tridentata* Moure 1970, con 129 especímenes (35,1 %), seguida por *Eg. modestior* Dressler 1982, con 109 especímenes (29,7 %) y *Eulaema nigrita* Lepeletier 1841, con 67 especímenes (18,3 %). Las especies *Eg. chlorina* Dressler 1982 y *Eg. liopoda* Dressler 1982 estuvieron representadas por 15 especímenes cada una, en tanto que *Eu. meriana* (Olivier 1789) por seis, y *Eu. deceptrix* Moure 1986 y *Eulaema* sp1., por cinco cada una. Las especies restantes estuvieron representadas por tres especímenes o menos (**Tabla 1**). El cálculo de estimadores de riqueza no paramétricos Chao1 y Jackknife 1 indicó que podrían encontrarse entre 19 y 21 especies, respectivamente; así, las 17 especies recolectadas tendrían una representatividad del muestreo que osciló entre el 81 % y el 89,5 % del ensamblaje de abejas de las orquídeas en la zona de estudio. El índice de Shannon fue de 1,6 para el sitio UN, 1,68 para la Sabana, y 1,65 para el bosque, y el número efectivo de especies para las localidades fue de 4,9, 5,3 y 5,2, respectivamente.

La complementariedad según el índice de Jaccard presentó valores medios (UN:SI: 0,60; UN:BG: 0,40; SI:BG: 0,53), lo que indica que cada ambiente albergaba especies únicas (**Tabla 1**). No se detectaron diferencias en la riqueza de especies entre los tres ambientes (Kruskal-Wallis: $F = 5,21$; g.l.= 2; $p = 0,073$), pero sí en las abundancias totales

Tabla 1. Abundancia y riqueza de especies de abejas euglosinas en cada una de las temporadas climáticas y ambientes muestreados en el municipio de Arauca. Los asteriscos indican especies únicas para cada ambiente. UN: Sendero Universidad Nacional; SI: Sabana inundable; BG: Bosque de galería

Especie	Temporada		Ambiente			Total
	Sequía	Lluvias	UN	SI	BG	
<i>Euglossa tridentata</i>	61	68	52	55	22	129
<i>Euglossa modestior</i>	32	77	46	36	27	109
<i>Eulaema nigrita</i>	29	38	30	29	8	67
<i>Euglossa chlorina</i>	8	7	4	7	4	15
<i>Euglossa liopoda</i>	3	12	8	7	0	15
<i>Eulaema meriana</i>	0	6	2	1	3	6
<i>Euglossa deceptrix</i>	0	5	0	3	2	5
<i>Eulaema</i> sp1	0	5	5*	0	0	5
<i>Euglossa variabilis</i>	1	2	0	2	1	3
<i>Eulaema mocsaryi</i>	1	2	1	1	1	3
<i>Euglossa gaianii</i>	0	2	1	1	0	2
<i>Euglossa amazónica</i>	0	2	1	1	0	2
<i>Exaerete smaragdina</i>	1	1	0	0	2*	2
<i>Euglossa mixta</i>	0	1	1*	0	0	1
<i>Euglossa igniventris</i>	1	0	0	1*	0	1
<i>Euglossa mourei</i>	0	1	0	1*	0	1
<i>Euglossa allosticta</i>	0	1	0	0	1*	1
Riqueza	9	16	11	13	10	17
Abundancia	137	230	151	145	71	367

(Kruskal-Wallis: $F = 6,24$; g.l. = 2; $p = 0,044$). La prueba de Mann-Whitney con corrección de significación entre grupos indicó que hubo diferencias entre los ambientes de bosque de galería y sabana inundable ($p=0,02$) (Figura 1, 2a).

Las curvas de rango-abundancia en las temporadas climáticas evidenciaron una mayor riqueza de especies en la temporada de lluvias (16 especies) con respecto a la temporada seca (9 especies) (Figura 2b). Las especies más abundantes de abejas euglosinas en la sabana inundable fueron *Eg. tridentata*, *Eg. Modestior* y *El. nigrita*, en tanto que *Eg. liopoda* y *Eg. Chlorina* registraron abundancias intermedias. El número de especies exclusivas de la temporada de lluvias fue de ocho (*El. meriana*, *Eg. deceptrix*, *El. spl*, *Eg. gaianii*, *Eg. amazónica*, *Eg. mixta*, *Eg. mourei*, *Eg. allosticta*), y en el periodo de sequía solo fue exclusiva *Eg. igniventris* en el ambiente de sabana inundable (Tabla 1).

La prueba de Yuen pareada indicó que la riqueza y la abundancia de especies fueron mayores en la época de lluvias que en la sequía ($F = -3,81$, g.l. = 23, $p = 0,001$ y $F = -2,65$, g.l. = 23; $p = 0,016$, respectivamente) (Figura 1). Se registraron diferencias en las horas de captura de las abejas (Kruskal-Wallis: $F = 32,9$, $p < 0,05$), siendo las 9:00 la hora de mayor recolección ($\bar{X} = 4,92 \pm 4,21$; rango = 0 - 20), seguida por las 11:00 ($\bar{X} = 2,57 \pm 3,1$; rango = 0 - 13). Las horas con menos capturas fueron las 7:00 ($\bar{X} = 1,27 \pm 1,7$; rango = 0 - 7) y las 14:00 ($\bar{X} = 1,16 \pm 1,9$; rango = 0 - 7) (Figura 3). Las trampas de botella tuvieron un mejor desempeño en la captura de euglosinas ($\bar{X} = 6,02 \pm 3,78$, rango = 0 - 17) que la recolección de especímenes con red entomológica ($\bar{X} = 3,89 \pm 4,07$; rango = 0 - 17) (prueba de Yuen: $W = -3,79$; g.l. = 22, $p = 0,001$). El eucaliptol fue el atrayente más eficiente, con 359 capturas (97,8 %), seguido del metil-salicilato con siete especímenes (1,9 %), en tanto que el extracto de *V. brasiliensis* solo atrajo un espécimen (0,27 %) y el extracto de vainilla ninguno.

Discusión

En las últimas décadas se ha incrementado en Colombia el número de especies de abejas euglosinas reportadas, pasando de 108 especies en 1992 (Bonilla-Gómez & Nates-Parra, 1992) a 113 (Ramírez et al., 2002), 134 (Parra-H & Nates-Parra, 2012) y, más recientemente, a 174 especies (Chilito-Rodríguez et al., 2021). Esta cifra posiciona a Colombia como uno de los países más diversos en este taxón, junto con Brasil (200 spp.: Olivera-J et al., 2015), Ecuador (115 spp.: Padrón, et al., 2018), Perú (77 spp.), Venezuela (70 spp.) y Panamá (69 spp.) (Chilito-Rodríguez et al., 2021).

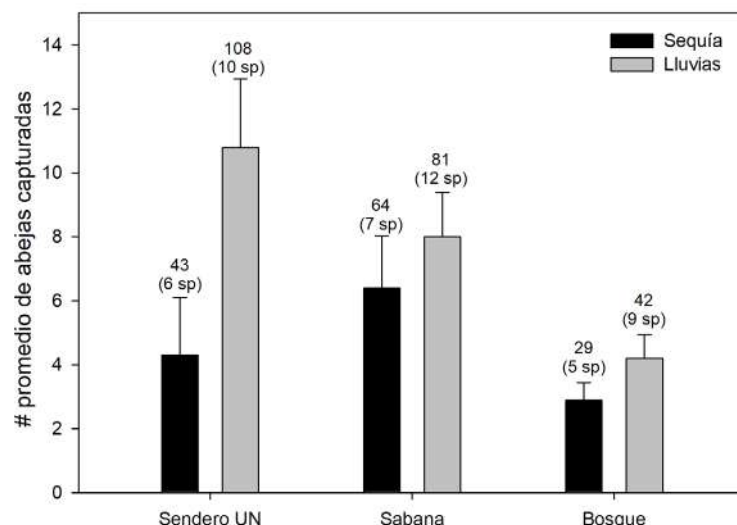


Figura 1. Promedios de abejas euglosinas capturadas en 10 sesiones de muestreo por estación climática en tres ambientes en el municipio de Arauca. Los números sobre las barras indican la abundancia total y la cantidad de especies registradas. Las líneas indican el error estándar

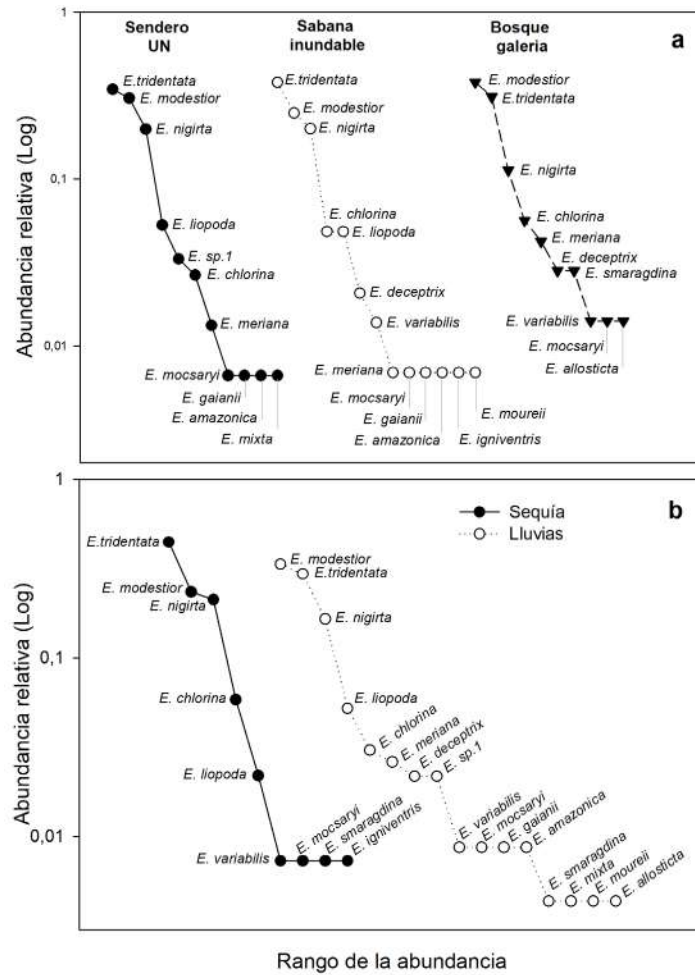


Figura 2. Curvas de rango abundancia de especies de abejas euglosinas para los tres ambientes monitoreados en este estudio el municipio de Arauca (a), y para las temporadas seca y de lluvias en (b)

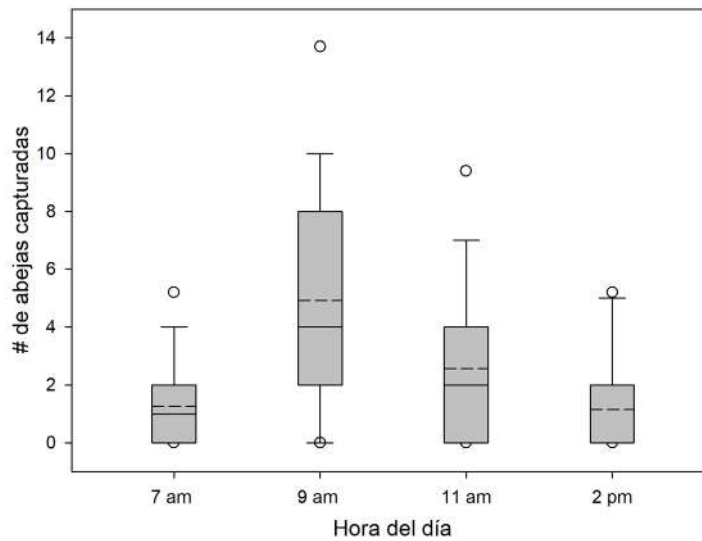


Figura 3. Cantidad de abejas euglosinas recolectadas por horas en el municipio de Arauca, Colombia. Las líneas discontinuas representan el promedio

En este estudio, el primero en el departamento de Arauca, se recolectaron 367 machos de tres géneros y 17 especies de abejas de la tribu Euglossini, con un buen grado de completitud en el muestreo según los estimadores Chao1 y Jackknife 1, correspondiente al 9,7 % de la riqueza nacional. La literatura sobre las localidades colombianas es limitada en gran parte del territorio nacional, pero en un estudio en el piedemonte llanero se reportaron 17 especies de 26 conocidas en la zona (Parra-H & Nates, 2007). En los departamentos amazónicos el rango de especies registradas es amplio: 43 especies en Caquetá, 36 en Amazonas, siete en Putumayo y Vichada, cinco en Guainía, tres en Vaupés, y cero en Guaviare (Chilito-Rodríguez *et al.*, 2021), cifras que denotan la ausencia de estudios en muchas localidades e impiden tener una idea más precisa de la riqueza real que el país alberga. En otros departamentos como el Chocó se han reportado 31 especies (Otero y Sandino, 2003) y en Antioquia entre 21 (Arcos, 2020) y 50 (Ramírez *et al.*, 2015). En localidades de otros países con más tradición de estudios de abejas Euglossini como Costa Rica se han registrado entre 35 (Ramírez, 2019) y 40 especies (Santos Murgas *et al.*, 2018), en Panamá entre 15 y 28 (Ricklefs *et al.*, 1969; Osorio-Arenas & Santos Murgas, 2017; Reyes-Ledezma *et al.*, 2020; Vega-Hidalgo *et al.*, 2020) y en Perú, 31 (Allen *et al.*, 2019). Brasil es posiblemente el país con más arraigo en la investigación de Euglossini; en múltiples localidades de Rio de Janeiro se han registrado entre 11 y 17 especies (Aguiar & Gaglianone, 2011), en Maranhao entre nueve (Rebêlo & Cabral, 1997) y 14 (Silva, *et al.*, 2009), y en la Mata Atlántica, nueve (Sofia, *et al.*, 2004), 23 (Rocha & Garófalo, 2013), y 12 (Rocha *et al.*, 2020), en tanto que en Mato Grosso, en el ecotono cerrado-selva, se han registrado 16 (Olivera-Junior *et al.*, 2015), en la sabana 14 (Viana *et al.*, 2021), en la catinga, cinco (Carneiro *et al.*, 2018) y en bosques higrófilos, cinco especies (Castro *et al.*, 2013). Así, la riqueza de 17 especies registrada en Arauca es notable y comparable a ambientes estructuralmente más complejos (por ejemplo, los bosques), a pesar de ser un ecosistema predominantemente compuesto de sabanas con fragmentos discretos de bosques donde las euglosinas pueden encontrar los recursos que las orquídeas y otras especies vegetales les proveen, ya que probablemente en la sabana la oferta es limitada.

El índice de Jaccard indicó que, aunque los tres ambientes comparten especies abundantes como *Eg. tridentata*, *Eg. modestior* y *El. nigrita* (Figura 2a), el bosque es el ambiente más disímil en riqueza de especies. Por otra parte, la sabana y el sitio perturbado fueron más similares entre sí, lo que podría deberse al hecho de compartir características abióticas similares al ser ambientes abiertos y soleados. En cuanto a la riqueza de especies, esta fue similar en los tres ambientes durante los cuatro meses de estudio (Tabla 1). Este resultado fue contrario a lo esperado, pues, en general, ambientes con poca estructura vegetal (como en este caso la sabana inundable) suelen tener menor número de especies. En este sentido, Rasmussen (2009) no registró diferencias entre los diversos hábitats y lo atribuyó a la corta duración del estudio (< 3 meses). Además, Faria & Gonçalves (2013), en la costa oriental de Brasil, y Castro *et al.* (2013) plantearon que la precipitación incide en la mayor oferta de recursos florales, lo que contribuye a determinar la riqueza de especies de abejas y propicia ensamblajes más diversos en zonas de pastos mezcladas con bosques. Sin embargo, es amplio el número de investigaciones que postulan que las euglosinas son más diversas en ambientes en buen estado de conservación (Parra-H & Nates, 2007; Aguiar & Gaglianone, 2011; Rocha & Garófalo, 2013; Carneiro *et al.*, 2018; Razo-León *et al.*, 2018; Chilito-Rodríguez *et al.*, 2021; Viana *et al.*, 2021) debido a la mayor diversidad botánica (Knoll & Penatti, 2012; Villaça *et al.*, 2009) y la oferta de recursos como polen, néctar, y materiales para la construcción de nidos (Viana *et al.*, 2021). Esta tendencia de mayor diversidad de la tribu Euglossini en ambientes bien preservados ha llevado a que este taxón sea considerado como bioindicador de la calidad del hábitat (Rocha-Filho & Garófalo, 2013; Parra-H *et al.*, 2016; Allen, 2019).

Otros estudios han detectado un patrón opuesto a lo esperado en términos de riqueza. Por ejemplo, Otero & Sandino (2003) reportaron una baja riqueza en bosques primarios comparada con bosques secundarios y granjas de cultivo en el Chocó y sugirieron que las abejas posiblemente prefieren forrajear en sitios abiertos, aspecto que no documentamos en

este estudio. Aunque la Orinoquia está expuesta a altos niveles de deforestación, el paisaje orinocense es naturalmente fragmentado en lo que respecta a las formaciones boscosas que alberga, un factor que posiblemente ha propiciado el desarrollo de mecanismos de comportamiento en las abejas euglosinas para lidiar con esa configuración del paisaje. En particular, la alta vagilidad de las abejas (entre 23 y 40 Km: **Ricklefs et al.**, 1969; **Janzen**, 1971, **Wikelski et al.**, 2010) les permitiría moverse eficientemente entre fragmentos en busca de los recursos para su sostenimiento, y explicaría la similitud en el número de especies registradas en los tres ambientes. De ser así, es posible que la escala espacial del estudio no haya sido lo suficientemente amplia, es decir, los tres sitios representan un solo ensamblaje de euglosinas dado que la distancia máxima lineal entre las localidades es de 15,8 Km.

La menor abundancia de euglosinas se registró en el bosque, en tanto que en el sitio con intervención intermedia (UN) y en la sabana inundable fue mayor (**Tabla 1, Figura 1**). En concordancia con este resultado, se ha planteado que el comportamiento de forrajeo incluye desplazamientos a través de sitios abiertos entre fragmentos (**Razo-León et al.**, 2018) y que la heterogeneidad ambiental favorece la integridad de las comunidades de abejas euglosinas (**Carneiro et al.**, 2021). Alternativamente, la menor abundancia registrada en el bosque podría ser consecuencia de las menores temperaturas del sotobosque, lo cual induce una menor volatilidad de los cebos, reduciendo las tasas de captura en este ambiente. Sin embargo, otros estudios documentan mayores abundancias en bosques por ser ambientes sombreados con temperaturas más frescas (**Silva et al.**, 2009; **Carneiro et al.**, 2018; **Allen**, 2019) y plantean que la fragmentación es percibida como un obstáculo por algunas especies de euglosinas (**Aguiar & Gaglianone**, 2011).

En concordancia con otros estudios, en este se registraron valores mayores de riqueza y abundancia durante la época de lluvias (**Rebêlo & Cabral**, 1997; **Sofia et al.**, 2004; **Silva et al.**, 2009; **Castro et al.**, 2013; **Carneiro et al.**, 2018). Este patrón ha sido documentado en variados taxones de insectos (**Wolda**, 1988; **Franzen et al.**, 2017; **Habel et al.**, 2018) y está asociado con la mayor oferta de alimento y otros productos como consecuencia de la disponibilidad de recurso hídrico para las plantas (**Ramírez et al.**, 2015), las bajas temperaturas en la época de lluvias comparadas con la época seca (**Rebêlo & Cabral**, 1997) y por tener un efecto en los periodos de anidación y emergencia de las abejas (**Ackerman**, 1983). **Silva et al.** (2009) sugirieron que estudiar la fenología de las orquídeas puede ayudar a entender la interacción euglosina-planta, lo que es relevante en países como Colombia, donde se encuentra la mayor diversidad de especies de Orchidaceae (**Alba-Patiño et al.**, 2021).

En relación con las horas del día, se ha documentado una mayor frecuencia de capturas de abejas euglosinas en la mañana (**Dressler**, 1982; **Olivera-Junior et al.**, 2015), lo que se atribuye a que en este periodo del día la producción de compuestos secundarios por las plantas es más intensa (**Oliveira**, 1999). En este estudio la máxima tasa de captura fue a las 9:00, lo que ratifica esta tendencia. El reactivo más eficiente como cebo de atracción fue el eucaliptol (97,8 %), un compuesto ampliamente empleado en estudios de euglosinas (**Peruquetti et al.**, 1999; **Silva & Rebêlo**, 1999; **Brito & Rêgo**, 2001; **Sofia et al.**, 2004; **Silva et al.**, 2009). Sin embargo, las disparidades en las tasas de captura con diversos atrayentes en diferentes estudios sugieren que algunas especies parecen responder a ciertos atrayentes, pero a otros no (**Nemesio & Silveira**, 2004; **Castro et al.**, 2013). Por ello la comunidad científica sigue explorando compuestos químicos que permitan documentar con más precisión la diversidad de este taxón de abejas. Se sugiere que en futuros estudios en la Orinoquia se empleen compuestos adicionales.

Conclusiones

En este estudio se documentan por primera vez algunos aspectos de la ecología básica de las abejas euglosinas en relación con el ciclo de precipitación anual en el departamento de Arauca. Es notable la riqueza de especies (17) y comparable con ecosistemas

estructuralmente más complejos, considerando que el área de estudio es un paisaje donde predomina el ecosistema de sabana. Por el importante rol de las abejas de la tribu Euglossini como polinizadores, es imperativo minimizar actividades antrópicas en los ecosistemas de la Orinoquia como la deforestación, las quemadas anuales y la fumigación, dados los efectos que estas prácticas tienen en la oferta de hábitats disponibles para este taxón, lo que afecta de forma directa su supervivencia. Sin embargo, a partir de la literatura disponible se hace evidente que no existen patrones bien establecidos sobre diversos aspectos ecológicos de este taxón, por ejemplo, los factores que determinan la riqueza de especies, su abundancia, el uso del hábitat y sus múltiples interacciones bióticas y abióticas. Esto implica la necesidad de desarrollar más investigaciones sobre las abejas Euglosinas para mejorar la comprensión acerca de su biología, determinar su rol en el funcionamiento de los ecosistemas que habitan y generar estrategias para garantizar la supervivencia de sus poblaciones.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia - Sede Orinoquia; a Joel Tupac Otero por la corroboración de algunas identificaciones taxonómicas, y a los dos revisores anónimos por sus acertados comentarios para mejorar este documento. La autora L. J. Mojica Candela fue beneficiaria como estudiante de la “Convocatoria de investigación para estudiantes de pregrado para desarrollar el trabajo de grado o pasantía en la Sede Orinoquia en el 2018-ii”.

Contribución de los autores

NPB: diseño metodológico, análisis de datos, escritura y edición, gestión apoyo financiero; LJMC: concepto, diseño metodológico, toma de datos, curaduría e identificación taxonómica, y escritura; JCAM: concepto, diseño metodológico, análisis de datos, e identificación taxonómica.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- Ackerman, J. D. (1983). Specificity and mutual dependency of the orchid-euglossine bee interaction. *Biological Journal of the Linnean Society*, 20, 301-314.
- Agudelo Martínez, J. C. & Pérez-Buitrago, N. (2015). Notas acerca de la distribución de Papilionidae (Lepidoptera: Papilionoidea) en el norte de la Orinoquia colombiana. *Boletín Científico del Centro de Museos*, 19(1), 203-214.
- Agudelo-Martínez, J. C. & Pérez-Buitrago, N. (2020). Colección Entomológica de la Orinoquia (CEO). GBIF.Org. <https://doi.org/10.15472/vp8v42>
- Aguiar, W. M. & Gaglianone, M. C. (2008). Comunidade de abelhas euglossina (Hymenoptera: Apidae) em remanescentes de mata estacional semidecidual sobre tabuleiro no estado do Rio de Janeiro. *Neotropical Entomology*, 37(2), 118-125.
- Aguiar, W. M. & Gaglianone, M. C. (2011). Euglossine bees (Hymenoptera Apidae Euglossina) on an inselberg in the Atlantic Forest domain of southeastern Brazil. *Tropical Zoology*, 24(2), 107-125.
- Alba-Patiño, D., Martínez-Hernández, F., Mota Poveda, J. F. (2021). Determination of sites of special importance for the conservation of threatened Orchid species in Colombia. *Mediterranean Botany*, 42, e67589. <https://dx.doi.org/10.5209/mbot.67589>
- Allen, L., Reeve, R., Nousek-McGregor A., Villacampa, J., MacLeod, R. (2019). Are orchid bees useful indicators of the impacts of human disturbance? *Ecological Indicators*, 103, 745-755.
- Amaya-Márquez, M. (2016). Polinización y biodiversidad. En Nates-Parra, G. (ed). Iniciativa Colombiana de Polinizadores - Abejas – ICPA (pp. 29-39). Bogotá, D. C. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia.
- Arbeláez-Cortés, E. (2013). Knowledge of Colombian biodiversity: Published and indexed. *Biodiversity and Conservation*, 22, 2875-2906.

- Arcos-Valencia, J. F.** (2020). Diversidad de abejas de las orquídeas (Apidae: Euglossini) en el vaso del embalse del proyecto hidroeléctrico “Hidroituango”, Antioquia Colombia. Tesis de Pregrado, Universidad de la Amazonia, Caquetá, Colombia.
- Bonilla-Gómez, M. A. & Nates, G.** (1992). Abejas Euglosinas de Colombia (Hymenoptera: Apidae) I. Claves ilustradas. *Caldasia*, 17(1), 149-172.
- Brito, C. M. S. & Rêgo, M. M. C.** (2001). Community of male Euglossini bees (Hymenoptera: Apidae) in a secondary forest, Alcântara, MA, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 61, 631-638.
- Carneiro, L. S., Aguiar, W. M., Aguiar, C. M. L., Santos, G. M. M.** (2018). Orchid Bees (Hymenoptera: Apidae: Euglossini) in seasonally dry tropical forest (Caatinga) in Brazil. *Sociobiology*, 65(2), 253-258.
- Carneiro, L. S., Aguiar, W. M., Priante, C. F., Ribeiro, M. C., Frantine-Silva, W., Gaglianone, M. C.** (2021). The interplay between thematic resolution, forest cover, and heterogeneity for explaining Euglossini Bees community in an agricultural landscape. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 628319.
- Castro, M. M. N., Garófalo, C. A., Serrano, J. C., Silva, C. I.** (2013). Temporal variation in the abundance of Orchid Bees (Hymenoptera: Apidae) in a Neotropical Hygrophilous Forest. *Sociobiology*, 60(4), 405-412.
- Chazdon, R., Colwell, R., Denslow, J., Guariguata, M.** (1998). Statistical methods for estimating species richness of woody regeneration in primary and secondary rain forests of NE Costa Rica. En Dallmeier, F., Comiskey, J. A. (eds). Forest biodiversity research, monitoring and modeling. Conceptual background and Old World case studies (285-309). Parthenon Publishing: Paris France.
- Chilito-Rodríguez, E. P., Henao Bañol, E. R., Velásquez Valencia, A., Parra Olarte, M.** (2021). Abejas Euglossinas (Apidae: Euglossini): un enfoque de conservación e importancia ecológica. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 4(4), 6224-6245.
- Colwell, R.** (2013). Estimates: Statistical estimation of species richness and shared species from samples. Version 9. User's Guide and application published URL <http://purl.oclc.org/estimates>
- Colwell, R. K. & Coddington, J. A.** (1994). Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B*, 345, 101-118.
- Correa, H. D., Ruiz, S. L., Arevalo, L. M.** (2005). Plan de acción en biodiversidad de la Cuenca del Orinoco – Colombia / 2005 - 2015 – Propuesta Técnica. Bogotá D.C. Corporinoquia, Cormacarena, IAvH, Unitrópico, Fundación Omacha, Fundación Horizonte Verde, Universidad Javeriana, Unillanos, WWF - Colombia, GTZ. Bogotá, Colombia: ARFO editores.
- Dicks, L. V., Breeze, T. D., Ngo, H. T., Senapathi, D., An, J., Aizen, M. A., Basu, P., Buchori, D., Galetto, L., Garibaldi, L. A., Gemmill-Herren, B., Howlett, B. G., Imperatriz-Fonseca, V. L., Johnson, S. D., Kovács-Hostyánszki, A., Kwon, Y. J., Lattorff, H. M. G., Lungharwo, T., Seymour, S. L., Vanbergen, A. J., Potts, S. G.** (2021). A global assessment of drivers and risks associated with pollinator decline. *Nature Ecology and Evolution*, 5, 1453-1461.
- Dressler, R. L.** (1982). Biology of orchid bees (Euglossini). *Annual Review of Ecology and Systematics*, 13, 373-394.
- Faria, L. R. R. & Gonçalves, R. B.** (2013). Abiotic correlates of bee diversity and composition along eastern Neotropics. *Apidologie*, 44(5), 547-562.
- Franzen, M., Schrader, J., Sjöberg, G.** (2017). Butterfly diversity and seasonality of Ta Phin mountain area (N. Vietnam, Lao Cai Province). *Journal of Insect Conservation*, 21, 465-475.
- Goulson, D.** (2019). The insect apocalypse, and why it matters. *Current Biology*, 29, R942–R995.
- Habel, J.C., Seibold, S., Ulrich, W., Schmitt, T.** (2018). Seasonality overrides differences in butterfly species composition between natural and anthropogenic forest habitats. *Animal Conservation*, 21, 405-413.
- Janzen, D. H.** (1971). Euglossine bees as long-distance pollinators of tropical plants. *Science*, 171, 203-205.
- Jost, L.** (2006). Entropy and diversity. *Oikos*, 113(2), 363-375.
- Klein, A-M., Boreux, V., Fornoff F., Mupepele, A-C., Pufal, G.** (2018). Relevance of wild and managed bees for human well-being. *Current Opinion in Insect Science*, 26, 82-88.
- Knoll, F. R. N. & Penatti, N. C.** (2012). Habitat fragmentation effects on the Orchid Bee communities in remnant forest of Southeastern Brazil. *Neotropical Entomology*, 41, 355-365.
- López, F. D.** (1963). Two attractants for *Eulaema tropica* L. *Journal of Economic Entomology*, 56, 540.
- Moure, J. S., Melo, G. A. R., Faria Jr, L.R.R.** (2012). Euglossini Latreille, 1802. En Moure, J. S., Urban, D., Melo, G. A. R (eds). Catalogue of bees (Hymenoptera, Apoidea) in the Neotropical region. Fecha de consulta: 9 de abril de 2019. Disponible em: <http://www.moure.cria.org.br/catalogue/>

- Nates-Parra, G., Ospina, R., Rodríguez-Calderón, A. T., Chamorro, F. J., Henao-Cárdenas, M. M., Calderón, L. V., Pinilla-Gallego, M. S.** (2016). Polinización en cultivos promisorios. Iniciativa Colombiana de Polinizadores – Abejas. En Nates-Parra, G. (ed). Iniciativa Colombiana de Polinizadores - Abejas - icpa. (pp. 239-252). Bogotá, D. C. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia.
- Nemésio, A. & Morato, E. F.** (2006). The orchid-bee fauna (Hymenoptera: Apidae) of Acre state (northwestern Brazil) and a re-evaluation of Euglossine bait-trapping. *Lundiana*, 7, 59-64.
- Nemésio, N. & Silveria, F. A.** (2004). Biogeographic notes on rare species of Euglossina (Hymenoptera: Apidae: Apini) occurring in the Brazilian Atlantic Rain Forest. *Neotropical Entomology*, 33, 117-120.
- Oliveira, M. L. O.** (1999). Sazonalidade e horário de atividade de abelhas Euglossinae (Hymenoptera, Apidae), em florestas de terra firme na Amazônia Central. *Revista Brasileira de Zoologia*, 16(1), 83-90.
- Oliveira-Junior, J. M. B., Almeida, S. M., Rodrigues, L., Silvério Júnior, A. J., Anjos-Silva, E. J.** (2015). Orchid bees (Apidae: Euglossini) in a forest fragment in the ecotone Cerrado-Amazonian forest, Brazil. *Acta Biológica Colombiana*, 20(3), 67-78.
- Osorio-Arenas, M. A. & Santos Murgas, A.** (2017). Estudio sobre el conocimiento de la diversidad de abejas de la orquídea (Apidae: Euglossini) en la comunidad de Ustupu, Comarca Kuna Yala, Panamá. *Scientia*, 28(1), 61-71.
- Otero, J. T. & Sandino, J. C.** (2003). Capture rates of male Euglossine bees across a human intervention gradient, Chocó Region, Colombia. *Biotropica*, 35(4), 520-529.
- Padrón, P. S., Roubik, D. W., Picón, R. P.** (2018). A Preliminary Checklist of the Orchid Bees (Hymenoptera: Apidae: Euglossini) of Ecuador. *Psyche: A Journal of Entomology*, <https://doi.org/10.1155/2018/2678632>
- Parra-H, A. & Nates-Parra, G.** (2007). Variación de la comunidad de abejas de las orquídeas (Hymenoptera: Apidae) en tres ambientes perturbados del piedemonte llanero colombiano. *Revista de Biología Tropical*, 55(3-4), 931-941.
- Parra-H, A. & Nates-Parra, G.** (2012). The ecological basis for biogeographic classification: an example in orchid bees (Apidae: Euglossini). *Neotropical Entomology*, 41(6), 442-449.
- Parra-H, A., Otero, J. T., Sandino, J. S., Ospina Torres, R.** (2016). Abejas de las orquídeas (Hymenoptera: Apidae: Euglossini) y su importancia como polinizadoras de amplio rango en ecosistemas naturales. En Nates-Parra, G. (ed.). Iniciativa Colombiana de Polinizadores - Abejas - ICPA (pp. 141-155). Bogotá, D. C. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia.
- Parreño, M. A., Ruedenauer, F., Leonhardt, S. D., Alaux, C., Brunet, J. L., Henry, M., Leroy, C., Buydens, L., Meeus, I., Piot, N., Smagghe, G., Filipiak, M., Keller, A., Klein, A. M., Kuhlmann, M., Palmer-Young, E., Requier, F., Stevenson, P. C.** (2021). Critical links between biodiversity and health in wild bee conservation. *Trends in Ecology & Evolution*, 37(4), 309-321. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.11.013>
- Peruquetti, R. C., Campos, L. A. O., Coelho, C. D. P., Abrantes, C. M. V., Lisboa, L. C. O.** (1999). Abelhas Euglossini (Apidae) de áreas de Mata Atlántica: abundância, riqueza e aspectos biológicos. *Revista Brasileira de Zoologia*, 16, 101-118.
- R Core Team.** (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Ramírez, S. R.** (2019). Pollinator specificity and seasonal patterns in the Euglossine bee-orchid mutualism at La Gamba Biological Station. *Acta ZooBot Austria*, 156, 171-181.
- Ramírez, S., Dressler, R. L., Ospina, M.** (2002). Abejas euglosinas (Hymenoptera: Apidae) de la Región Neotropical: listado de especies con notas sobre su Biología. *Biota Colombiana*, 3(1), 7-118.
- Ramírez, S. R., Hernández, C., Link, A., López-Uribe, M. M.** (2015). Seasonal cycles, phylogenetic assembly, and functional diversity of orchid bee communities. *Ecology and Evolution*, 5(9), 1896-1907.
- Ramos-Jiliberto, R., Moisset de Espanés, P., Vázquez, D. P.** (2020). Pollinator declines and the stability of plant–pollinator networks. *Ecosphere*, 11(4), e03069. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3069>
- Rasmussen, C.** (2009). Diversity and abundance of orchid bees (Hymenoptera: Apidae, Euglossini) in a tropical rainforest succession. *Neotropical Entomology*, 38(1), 66-73.
- Rangel-CH., J. O. & Minorta-Cely, V.** (2014). Los tipos de vegetación de la Orinoquia colombiana. En Rangel-CH, J. O. Colombia Diversidad Biótica XIV, La región de la Orinoquia de Colombia (pp.533-612). Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia.

- Razo-León, A. E., Vásquez-Bolaños, M., Muñoz-Urias, A., Huerta-Martínez, F. M.** (2018). Changes in bee community structure (Hymenoptera, Apoidea) under three different land-use conditions. *Journal of Hymenoptera Research*, 66, 23-38.
- Rebêlo, J. M. M. & Cabral A. J. M.** (1997). Abelhas Euglossinae de Barreirinhas, zona litoral da baixada oriental maranhense. *Acta Amazônica*, 27, 145-152.
- Reyes-Ledezma, K. Y., Santos-Murgas, A., González, P., Gómez, I. Y., Barrios-Vargas, A.** (2020). Diversidad Alpha y Beta de abejas Euglossini (Hymenoptera: Apidae) en el dosel y sotobosque del Cerro Turega, Provincia de Coclé, Panamá. *Tecnociencia*, 22(2), 205-225.
- Ricklefs, R. E., Adams, R. M., Dressler, R. M.** (1969). Species diversity of Euglossa in Panama. *Ecology*, 50, 713-716.
- Rippstein, G., Escobar, G., Motta, F.** (2001). Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT. 302 p.
- Rocha-Filho, L. C. & Garófalo, C. A.** (2013). Community ecology of Euglossine bees in the coastal Atlantic Forest of São Paulo State, Brazil. *Journal of Insect Science*, 13(1), 23.
- Rocha-Filho, L. C., Montagnana, P. C., Boscolo, D., Garófalo, C. A.** (2020). Species turnover and low stability in a community of Euglossine bees (Hymenoptera: Apidae) sampled within 28 years in an urban forest fragment. *Apidologie*, 51(6), 921-934.
- Santos-Murgas, A., Ábrego, J. C., López Ch, O. G., Monteza, C., Osorio, M., Guardia, R., Álvarez, E., Quiroz, K., Añino, Y. J., Carranza, B. RE., Villarreal, C.** (2018). Abejas de las orquídeas (Hymenoptera: Apidae: Euglossini) del Parque Nacional Darién, Panamá. *Tecnociencia*, 20(2), 59-69.
- Silva, F. S. & Rebêlo, J. M. M.** (1999). Euglossine bees (Hymenoptera: Apidae) of Buriticupu, Amazonia of Maranhão, Brazil. *Acta Amazônica*, 29, 587-599.
- Silva, O., Rego M. M. C., Albuquerque P. M. C., Ramos, M. C.** (2009). Abelhas Euglossina (Hymenoptera: Apidae) em Área de Restinga do Nordeste do Maranhão. *Neotropical Entomology*, 38(2), 186-196.
- Sofia, S. H., dos Santos, A. M., da Silva, C. R. M.** (2004). Euglossine bees (Hymenoptera, Apidae) in a remnant of Atlantic Forest in Paraná State, Brazil. *Iheringia, Série Zoologia*, 94(2), 217-222.
- Sydney, N. V. & Gonçalves, R.** (2015). Is the capture success of orchid bees (Hymenoptera, Apoidea) influenced by different baited trap designs? A case study from southern Brazil. *Revista Brasileira de Entomologia*, 59(1), 32-36.
- Vega-Hidalgo, A., Añino, Y., Krichilsky, E., Smith, Ar., Santos-Murgas, A., Gálvez, D.** (2020). Decline of native bees (Apidae: Euglossa) in a tropical forest of Panamá. *Apidologie*, 51, 1038-1050.
- Vélez, D. & Pulido-Barrios, H.** (2005). Observaciones sobre la estratificación vertical de abejas Euglossinas (Apidae: Euglossini) en un bosque ripario de la Orinoquia colombiana. *Caldasia*, 27(2), 267-270.
- Viana, T. A., Martins, F. M., Lourenço, A. P.** (2021). The Orchid Bee fauna (Hymenoptera: Apidae: Euglossini) of a Neotropical Savanna: an efficient protocol to assess bee community and diversity along elevational and habitat complexity gradients. *Neotropical Entomology*, 50, 748-758.
- Villaça Ramalho, A., Gaglianone, M. C., de Oliveira, M. L.** (2009). Comunidades de abelhas Euglossina (Hymenoptera, Apidae) em fragmentos de Mata Atlântica no Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Entomologia*, 53(1), 95-101.
- Viloria-de la Hoz, J.** (2009). Geografía económica de la Orinoquia. Documentos de trabajo sobre Economía Regional # 113. Banco de la República. ISSN 1692-3715. 97 p.
- Wagner, D. L., Grames, E. M., Forister, M. L., Berenbaum, M. R., Stopak, D.** (2021). Insect decline in the Anthropocene: Death by a thousand cuts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(2), e2023989118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2023989118>
- Wikelski, M., Moxley, J., Eaton-Mordas, A., López-Urbe M. M., Holland, R., Moskowitz, D., Roubik, D. W., Kays, R.** (2010). Large-range movements of neotropical Orchid Bees observed via radio telemetry. *PLoS ONE*, 5(5), e10738. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010738>
- Wolda, H.** (1988). Insect seasonality: Why? *Annual Review of Ecology and Systematics*, 19, 1-18.

Original article

Upper Pleistocene deposits from the Cauca Valley

Depósitos del Pleistoceno Superior en el Valle del Río Cauca

✉ Carlos Jaramillo^{1,*}, Gheny Krigsfeld Shuster², Carlo D. Rojas³, Alexander Henao³, Germán Y. Ojeda³, ✉ Dayenari Caballero¹, Sebastian Escobar-Florez^{1,4}, Sebastian Gomez^{1,5}, ✉ Jaime Escobar^{1,6}

¹ Smithsonian Tropical Research Institute, Panama City, Panama

² Investigador independiente, Cali, Colombia

³ Subsuelo3D S.A.S, Bogotá, Colombia

⁴ Departamento de Biología, Universidad ICESI, Cali, Colombia

⁵ Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil

⁶ Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia

Abstract

The rise of the Isthmus of Panama is one of the major biogeographical events of the Cenozoic. It is a massive natural experiment in biological migrations, as lands formerly separated—South America and Central/North America—became connected. There is, however, a difference in timing between the final closure of the Isthmus (4.2-3.5 Ma) and the onset of the massive mammal migrations (i.e., Great American Biotic Interchange, GABI, 2.7 Ma). This time lag has been brought up to suggest that other factors rather than a land connection were major drivers of the GABI. A large biome change from forest to savanna in Central America and Northwestern South America could have provided the conduit for accelerating the biotic interchange between both continents. This hypothesis has been rarely tested as the Plio-Pleistocene fossil record of those regions has not been sufficiently studied. Gheny K. Shuster discovered a brand new Upper Pleistocene fossil deposit in and under the Cauca River (Southwestern Colombia), one of such possible migration corridors. We conducted a field geophysical and sedimentological study to understand the geometry of the fossil-rich deposits, dated them using carbon isotopes (C^{14}), and assessed the type of biome (savanna versus forest) that dominated the region by looking at pollen samples. We found that the conglomerates accumulated in lenticular bodies, perpendicular to the modern course of the Cauca River during the Late Pleistocene in alluvial fan settings. The vegetation corresponds to a tropical dry forest and there is no evidence of extensive savannas. The Cauca River deposits could become a relevant site for the Neotropical Pleistocene.

Key words: Quaternary; South America; Great American Biotic Interchange; Megafauna; Biodiversity.

Resumen

El surgimiento del istmo de Panamá es uno de los principales acontecimientos biogeográficos del Cenozoico. Se trata de un experimento natural masivo de migraciones biológicas, ya que tierras antes separadas -América del Sur y América Central/Norte- quedaron conectadas. Sin embargo, hay una diferencia de tiempo entre el cierre final del istmo (4,2-3,5 Ma) y el inicio de las migraciones masivas de mamíferos (es decir, el Gran Intercambio Biótico Americano, GABI, 2,7 Ma). Este desfase temporal se ha señalado para sugerir que otros factores, más que una conexión terrestre, fueron los principales impulsores del GABI. Un gran cambio de bioma, de bosque a sabana, en Centroamérica y en el noroeste de Suramérica, podría haber proporcionado el conducto para acelerar el intercambio biótico entre ambos continentes. Esta hipótesis apenas se ha puesto a prueba, ya que el registro fósil del Plio-Pleistoceno de esas regiones no ha sido suficientemente estudiado. Gheny K. Shuster descubrió un nuevo yacimiento de fósiles del Pleistoceno Tardío en el río Cauca (suroeste de Colombia), uno de esos posibles corredores de migración. En ese marco, se hizo un estudio geofísico y sedimentológico de campo para comprender la geometría de los depósitos ricos en fósiles, se hicieron dataciones mediante isótopos de carbono (C^{14}) y se evaluó el tipo de bioma (sabana frente a bosque) que dominaba la región examinando muestras de polen. Encontramos que

Citation: Jaramillo C, Krigsfeld Shuster G, Rojas CD, *et al.* Upper Pleistocene deposits from the Cauca Valley. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):482-495, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1666>

Editor: Germán Alonso Bayona Chaparro

***Corresponding autor:** Carlos Jaramillo; jaramilloc@si.edu

Received: April 5, 2022

Accepted: May 2, 2022

Published: June 28, 2022



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

los conglomerados se acumularon en cuerpos lenticulares perpendiculares al curso moderno del río Cauca durante el Pleistoceno Tardío en ambientes de abanico aluvial. La vegetación corresponde a un bosque seco tropical y no hay evidencias de sabanas extensas. Los depósitos del río Cauca podrían convertirse en un sitio importante del Pleistoceno neotropical.

Palabras clave: Cuaternario; Suramérica; Gran Intercambio Biótico Americano; Megafauna; Biodiversidad.

Introduction

The rise of the Isthmus of Panama, commonly known as the Great American Biotic Interchange (GABI), connected North with South America and facilitated the exchange of faunas (**Simpson**, 1983). The highest peak in mammal migration rates occurred, however, one million years later compared to the complete formation of the land bridge itself (**Bacon et al.**, 2016; **Bacon et al.**, 2015; **Carrillo et al.**, 2020; **Carrillo et al.**, 2015; **Jaramillo**, 2018; **Montes et al.**, 2015; **Webb**, 1978; **Woodburne**, 2010). Why is there a migration delay? Contrasting biomes can constitute major barriers for fauna to migrate (**Vrba**, 1992). Therefore, biome interchange due to the onset of the Northern Hemisphere Glaciation and concomitant reductions in precipitation across the Americas has been proposed as a leading driver in the acceleration of GABI (**Bacon et al.**, 2016; **Bacon et al.**, 2013; **Carrillo et al.**, 2020; **Leigh et al.**, 2014; **Molnar**, 2008; **Smith et al.**, 2012; **Webb**, 1976, 1978, 2006). This hypothesis, however, has not been fully tested yet. What we know about GABI comes mostly from sites in temperate latitudes in North and South America. In contrast, there is scarce empirical information about biomes and their mammal record during the Plio-Pleistocene of Central America and northwestern South America (Colombia), the main and probably only corridor through which terrestrial migrations occurred.

A member of our team, Gheny Krigsfeld Shuster, discovered and has explored for the past three decades a proboscidean (e.g., elephants and their extinct relatives) fauna in deposits at the bottom of the Cauca River in the Cauca Valley (CV) near Cali (**Figure 1**). A detailed study of the sediments containing this fossil assemblage is crucial to understanding them in a proper spatial and temporal framework and the fauna can be useful to further understand the Pleistocene in the Neotropics. In this sense, a first study has identified the presence of *Notiomastodon platenensis* (**Pelegrin et al.**, 2022).



Figure 1. A. G.K. Shuster with some of the specimens he has collected over the past 25 years in the Cauca River (Photos by C. Ziegler)

Modern CV vegetation is heavily modified and less than 3% of the original forest remains in place (Pizano *et al.*, 2014) (Figures S1A, S1B, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>). A tree-dominated dry forest seems to have been the dominant biome in the CV during the Holocene (Berrio *et al.*, 2002) with no sign of extensive savannas. Was the CV much drier and dominated by savanna during the Late Pleistocene? Climate and habitat models suggest that the CV was a dry corridor during the Last Glacial Maximum (LGM) (23,000 to 19,000 years ago) (Marchant *et al.*, 2004) as precipitation and temperature dropped significantly in central and northern South America during glacial and last deglacial times (Escobar *et al.*, 2012; Hodell *et al.*, 2008; Hooghiemstra & Van der Hammen, 1998) but was it dry enough for savannas to replace the dry forest?

Here we present a geophysical study of the CV proboscidean deposits to assess their geometry and lateral extent, as well as a depositional time frame for the proboscidean deposits and a floristic reconstruction of the surrounding area at the time of deposition.

Methods

The proboscidean-bearing deposits are not outcropping and they can only be found by digging underneath the main channel of the Cauca River (Figure S1B, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>). For decades, sand and gravel have been extracted from the bed of the Cauca River as a mining product used in construction and building infrastructure in the region, an operation done mostly by small-scale dredges (Figures S1C, S1D, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>). The material mined by the community in the context of dredging operations in Platanares and the Andrés family in Paso Las Torres was used for our sedimentological analysis, radiocarbon dating, and palynology (Figures S1C-S1F, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225> and figure 2).

We used seismic refraction and electrical resistivity tomography (ERT) to map the presence, depth, thickness, and geometry of a fossil-rich conglomerate layer under and adjacent to the Cauca River main channel in the two dredging sites. Our surveys included the fossiliferous layer at the two sites, as well as two intermediate points to investigate the possible spatial continuity and connectivity of the fossil-rich layer between the two sites. Seismic refraction is based on the propagation and refraction of artificially induced seismic waves (Redpath, 1973) (Figure S2, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>). The method is performed on shallow targets by generating a seismic shock (simulating a micro-earthquake) and impacting the ground with a massive object

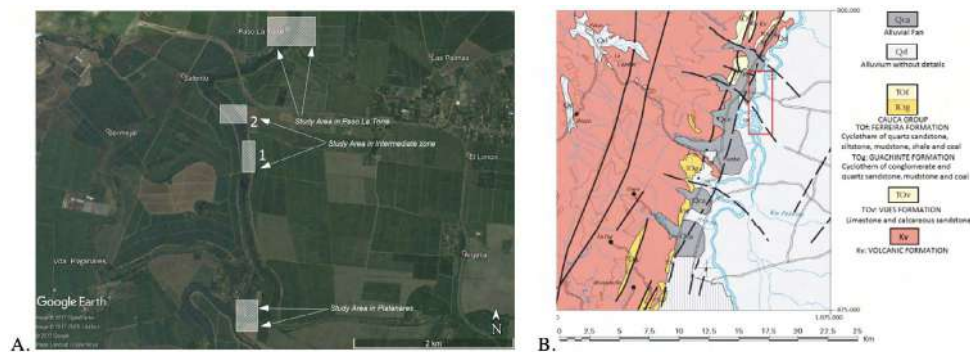


Figure 2. **A.** Geographical location of the survey areas. Platanares and Paso La Torre are the main areas while the two intermediate areas were surveyed to investigate spatial continuity (Modified from Landsat/Copernicus, 2017). **B.** Geological map of the survey area. The red rectangle indicates the area where the seismic and ERT lines were acquired (Modified from Nivia Guevara, INGEOMINAS, 2001)

such as a sledgehammer and recording direct and refracted waves at the surface with specialized seismic receivers known as geophones. We used a multi-channel (16 channel) digital seismograph with geophones evenly distributed along ~100 m straight survey lines (**Table S1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>). Electrical resistivity tomography (ERT) determines the electrical resistivity of the ground and subsurface based on Ohm Law's rendering 2- or 3-dimensional models of resistivity distribution in the subsurface. The technique was used to provide seamless top-to-base images of the fossiliferous conglomerate and surrounding materials. We used a GeoAmp303 DC resistivity console, an ASM001 switch, and a 32-electrode digital tomography system (**Table S1**).

For the 'marine' seismic refraction (i.e., in the river), we placed two individual geophones on the riverbanks on opposite sides and created seismic waves by manually impacting the river bottom with a custom-made steel pole used as a marine seismic source. The pole was manually forced down onto the bottom from a boat to generate single shots and was designed to be expandable between 3 and 12-m long by adding consecutive pipe segments. The three points of each survey line -source and two receivers- were chosen collinear to ensure in-plane information only. Shots were kept at 5-meter intervals along the survey line. The source-receiver offset was designed to be 5 to 65 m. Due to the source-receiver symmetry of the seismic refraction technique, placing a geophone at point A on dry land and shooting at point B on the river bottom is equivalent to placing a geophone at B and shooting at A (**Redpath, 1973**). The result of this exercise was not successful as only the five channels closest to each shot point contained usable information (**Figure S3**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>). Bottom currents made it difficult to manually generate clean, strong shots on the bottom. In retrospect, our seismic source may have been too light as it was easily deflected in the downstream direction by strong bottom currents. Additionally, the turbulent stream appeared to impose additional seismic noise, which was not mitigated even by stacking numerous shots (**Figure S3**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>).

We used a standard multichannel acquisition for land seismic refraction. Sixteen live channels were placed along 120-m-long lines shooting at both endpoints and at three other intermediate locations. Geophones were planted every 8 m on line coordinates 0 through 120 m. Shots were 'fired' at line coordinates -8 m, 36 m, 84 m, and 128 m. An 18-pound sledgehammer was used as the land seismic source. In both marine and land seismic refraction work, the signal-to-noise ratio was increased by means of stacking records from multiple data gathers (9 to 11) recorded at each shot-receiver arrangement (**Redpath, 1973**). Seismic refraction proved very efficient to map the top of the conglomerate (**Figure S3**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>).

ERT survey lines were designed to be parallel or perpendicular to the river channel; intersect seismic lines when possible and provide extended spatial coverage (**Figure S4**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>). Original designs had to be slightly modified in the field due to operational limitations imposed by adjacent sugar cane farms and steep slopes at the riverbanks. Marine ERT implied additional field considerations relative to land ERT as lines had to be designed as parallel as possible to the stream flow direction to avoid cable bending and potential rupture. Besides, ERT survey lines were positioned so that the acquisition consoles remained on dry land during data recording to circumvent equipment exposure and mitigate electrical hazards.

A total of 23 seismic refraction and seven ERT lines were acquired (**Table S2**). Ground elevation values derived from high-resolution topography data provided by light detection and ranging (LIDAR) (**Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC, 2016**) were integrated to all models and profile sections. Our model was adjusted for LIDAR topography and, thus, z coordinates are referred to as mean sea level.

We analyzed the conglomerate samples collected from the dredge by clast counting using a hand lens. Clasts were counted using the area method (**Howard, 1993**) where the counted area should be at least 2.5 times the long axis diameter of the largest clast (in

this case, 2.5 cm), and a lower clast size limit should be defined. Here, we counted all the clasts above 0.5 cm. We defined six classes before the counting by identifying the main compositional groups in all the samples; 150 grains were counted. The six classes defined for counting were: chert, aphanitic and porphyritic mafic igneous clasts, intermediate phaneritic igneous clasts, schists, vein quartz, and mafic phaneritic clasts.

Three wood samples taken from the conglomerates were sent for carbon 14 dating at the International Chemical Analysis (ICA) company (Miami, FL). Calibrated ages were attained using INTCAL13 (Reimer *et al.*, 2013) and a 2-sigma calibration (95% probability). Conventional ages were rendered in BP (BP: Before Present, 1950 AD) and were corrected for fractionation using the delta C13. We treated samples with acid/base/acid pretreatment (AAA) prior to graphitization and sent three bone samples for dating.

The palynological content of two samples was analyzed to assess the vegetation in the region. The first sample was an intraclast within the conglomerate and the second was collected from a thin, muddy layer capping the conglomerate. Both samples were processed using the standard acetolysis method at the *Instituto de Investigaciones en Estratigrafía-IIES* laboratories at *Universidad de Caldas*, Manizales (Faegri & Iversen, 1989) and mounted in glycerin gelatin slides for their examination through a Leica microscope with 100x magnification. The palynomorphs were identified following the morphological descriptions by Roubik & Moreno (1991), Hooghiemstra (1984), the Morphological Electronic Database (Jaramillo & Rueda, 2021), and the Alan Graham collection stored at the Smithsonian Tropical Research Institute in Panama (Moreno *et al.*, 2014). Frequency was expressed as relative abundance excluding spores, aquatic groups, reworked material, and overrepresented taxa from the total pollen sum. When needed, references to the excluded groups were expressed in terms of the proportion of the total pollen sum. The diversity and richness of each assemblage were calculated using the Vegan package (Oksanen *et al.*, 2010; R-Development-Core-Team, 2019). For comparative purposes, the richness was rarefied to the lesser pollen sum following Hurlbert (1971) but the diversity index (Shannon) was estimated from the total community excluding only the reworked material. The palynological content of muddy samples was compared with the palynological assemblages previously recorded in the Cauca Valley at the Quilichao-1 core (Berrio *et al.*, 2002) to determine whether the sample belonged to the same sedimentary sequence. The comparison was done using detrended correspondence analysis (DCA) (Hill & Gauch, 1980) to summarize the variability of the assemblages within a dimensionally reduced space. Aquatic taxa and fungi spores reflect the immediate lacustrine settings better than the general environmental conditions and, therefore, they were excluded from the analysis. Pollen and spore counts were transformed into relative abundance percentages to perform the DCA. The similitude between the muddy sample and the Quilichao's assemblages was estimated from the site scores resulting from the DCA ordination using two approaches: first, gathering the samples based on CONISS clustering analysis and, second, estimating the Euclidean distance between the muddy sample and the Quilichao-1 sequence. All the analyses were performed using R software (R-Development-Core-Team, 2019), the Vegan (Oksanen *et al.*, 2010) and the Rioja (Juggins, 2015) packages for the DCA, and the CONISS clustering analysis, respectively (supplementary information S1). The Quilichao -1 data (Berrio *et al.*, 2002) was available through the Neotoma package (Goring *et al.*, 2019).

Results

Geometry of the deposit

A strong seismic velocity contrast was evident in the seismic data between the modern river terraces, the sediment transported by the river, and the fossil-bearing conglomerate underneath. The seismic refraction data indicated that P-waves traveled through the conglomerate significantly faster (at nearly twice the velocity) than waves traveling through the overlying topsoil (Table S3, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/>)

article/view/1666/3225). There was an overall south-to-north increase in seismic velocities consistent with an increase in the DC electrical resistivity. We performed ground control of our seismic data at Platanares, Intermediate Area 2, and Paso La Torre, where dredging data confirmed the presence and top depth of the fossiliferous conglomerate as predicted by the geophysical survey. The two-dimensional ERT images also indicated a significant difference in resistivity between the conglomerate and adjacent materials (**Figures S5, S6, S7**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>).

The LIDAR data showed the river water surface is 937.5 meters above sea level (masl) with slight variations (± 0.1 m) probably caused by small waves. The adjacent terrace stands at a mean elevation of 942.75 masl. The integration of ten seismic refraction lines and four ERT lines indicated that at Platanares, the top of the conglomerate is a buried, continuous, and uneven surface at 923 to 927 masl which floors the Cauca River (**Figure 3**). The thickness of the conglomerate layer ranges from ~15 to ~44 meters and has a lenticular geometry (**Figures S5, S6, S7**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>). The conglomerate top appears to run NNE-SSW dipping towards the SE (**Figure 3**).

Intermediate Areas 1 and 2 show a lenticular geometry similar to that in Platanares (**Figures S9, S10, S11**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>). Paso La Torre imaging clearly showed the base of the conglomerate ranging from 14 to 29 m thick (**Figures 4, 5**) and a lenticular geometry (**Figures 4, S12**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>). The intermediate Area 1, about 1.8 km north of Platanares, was imaged by two seismic refraction lines and one ERT line, all acquired on

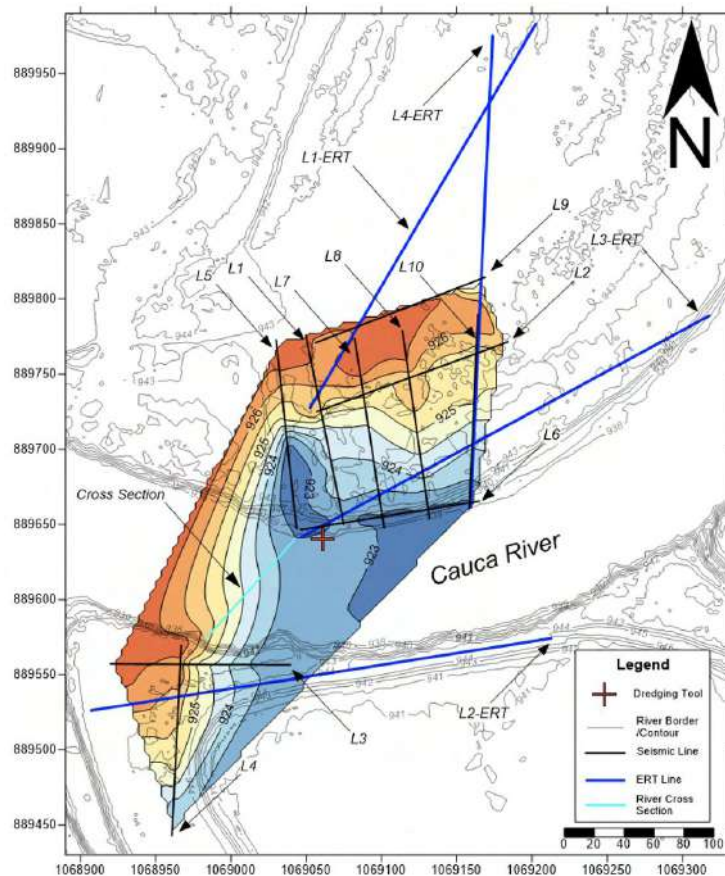


Figure 3. Subsurface elevation model in meters of the top of the fossil-bearing conglomerate in the Platanares area. Coordinates in Magna Sirgas Colombia West Zone

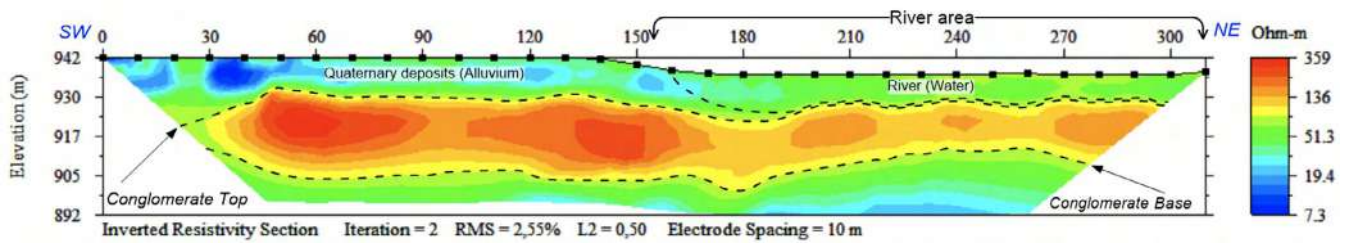


Figure 4. Inverted resistivity section of the L7-ERT (See location in [Figure 9?](#))

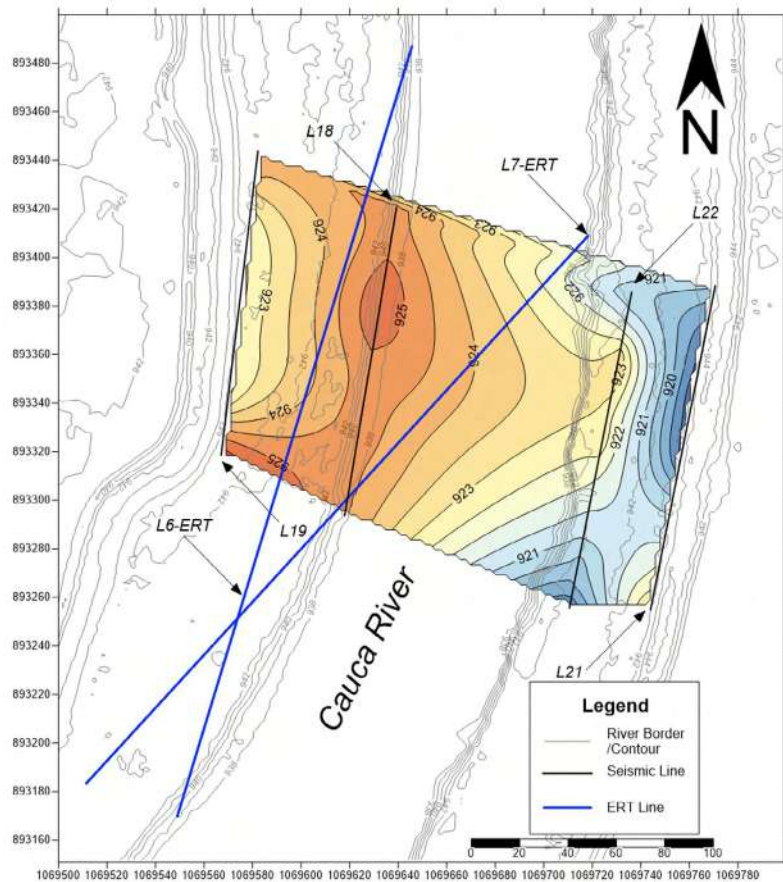


Figure 5. Subsurface model of the fossil-rich layer top at Paso La Torre. Coordinates in Magna Sirgas Colombia West Zone

the eastern river terrace. The ERT line from this area provided strong geophysical evidence of the conglomerate presence and depth with a notoriously high resistivity dominating the image below ~920 m. The sinuous upper face of the high anomaly, where the top of the conglomerate was interpreted based on the strong resistivity contrast, matched the depth of the high-velocity layer in seismic refraction data and the conglomerate depth known at Platanares ([Figure S8](#), <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>). The base of the conglomerate was not well imaged by this line. While structural contours drawn at the conglomerate top may suffer from spurious edge effects induced during interpolation, the map reflects the rough local conglomerate structure including two summits standing at 926 meters and an internal relief of ~ 7 meters ([Figure S9](#), <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>).

The intermediate Area 2 represents the second infill area surveyed with the purpose of understanding and mapping the possible fossiliferous rock continuity between Platanares and Paso La Torre. This area lies some 400 m north of intermediate Area 1 and ~ 1 km south of Paso La Torre. Four shore-parallel land seismic refraction lines were surveyed there, two on each river terrace. Additionally, using a manual measurement made with the dredge tool 280 meters NW of this area we estimated the fossiliferous conglomerate top (at river bottom) 17.5 meters below the terrace level. A shot record from seismic Line 14 acquired on the western river terrace showed two distinct first-break slopes corresponding to seismic velocities of 204 m/s (direct P wave) and 384 m/s (refracted P wave) equivalent to the topsoil and conglomerate layers, respectively (**Figure S10**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>). The resulting two-layer model assembled from all shot records of Line 14 showed a gently dipping conglomerate under the low-velocity topsoil (**Figure S10**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>). The resulting structural map drawn at the top of the conglomerate from seismic refraction data shows depths consistent with those found in the southern areas (**Figure S11**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>).

Sedimentology

The top few meters of the conglomerate could be accessed by the dredges. The conglomerates are polymictic, matrix-supported, with clasts of volcanic and igneous composition and abundant intraclasts represented by semi-consolidated muddy layers and pieces of tree trunks of different sizes (**Figure 6**). Clasts are subrounded and subangular ranging from 0.2 cm to 2.5 cm in size. The clasts show no imbrication or internal stratification. The matrix is made up of medium to coarse sand, poorly sorted, with subrounded clasts, made predominantly of quartz with some lithics. Some samples also had a muddy sandstone matrix. The conglomerate's clast composition is dominated by chert, which makes up for 41% of the clasts, and vein quartz, with 28% of the clasts. In all the samples, there were also intermediate phaneritic igneous clasts with 14% and 11% of aphanitic and porphyritic mafic igneous clasts. Schists with 4% and mafic phaneritic clasts with 2% were the minor components and were not present in all the samples. Bone fragments of different sizes were often found within the conglomerates and the large ones, including skulls and tusks, had conglomerate clasts attached to the cavities.



Figure 6. Representative samples of the conglomerate deposits

Age

Wood samples found as clasts in the conglomerate produced reliable dates. Two out of three yielded C14 dates and the third one was beyond the limit for C14 dating. The two samples yielded dates of $\mu = 41,546$ Cal Yr. BP (42,198 – 40,841 Cal Yr. BP) and $\mu = 13,689$ Cal Yr. BP (13,780 – 13,575 Cal Yr. BP) (**Table 1, Figure S13**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>). None of the three bone samples had enough collagen material to yield a dating.

Forest composition

The muddy layer assemblage (STRI ID: 44171) comprised 1,796 palynomorphs corresponding to 45 different morphotypes (**Supplementary information S2**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>). Cyperaceae and *Ambrosia* types were found overrepresented accounting each one for more than 100% of the sum of the less abundant morphotypes altogether (372% and 186%, respectively). *Ambrosia* grains also showed signals of being reworked material (probably from the Cenozoic), thus, its presence was not interpretable in terms of the environmental setting. Only 33 palynomorphs accounted for the total pollen sum including Arecaceae (27.6%) and Moraceae-Urticaceae (21.8%) dominating the pollen total sum while Apocynaceae, Amaranthaceae, and *Celtis* also contributed with 4% to 9%. The aquatic taxa *Typha* and *Sagittaria* were 10% and 5%, respectively, and the spores sum including *Lycopodium* and *Selaginella* was 8.4% of the total pollen sum. The intraclast assemblage (STRI ID: 44168) was composed of 17 different palynomorphs totaling 427. From these, only 13 taxa contributed to the pollen sum with 85 grains. There was a high proportion of reworked material including *Polypodiisporites* aff. *speciosus* and *Mauritidiites franciscoi* var. *minutus* probably from the Cenozoic formations outcropping along the foothills of the Cauca Valley, mainly La Paila Formation (**Jaramillo et al.**, 2009). The Cyperaceae (60%), Arecaceae (15%), Moraceae-Urticaceae (6%), and Bignoniaceae (5%) taxa were the most abundant pollen types. Acanthaceae, Apocynaceae, and Polygonaceae also contributed to the total pollen sum. Spores of *Selaginella* type and *Lycopodium* were also present in the sample (11% and 2 %). The estimation of rarefied richness calculated on the total sum of the smallest sample (the intraclast) was 11.8 and 8.7 while the Shannon index was 1.3 and 1.7 for the muddy layer and the intraclast, respectively.

Although the pollen sum was almost an order of magnitude larger in the muddy sample and the total number of taxa was almost three times as large, the rarefied richness and the diversity index were similar for both assemblages indicating that the difference in the ecological traits between samples was attributable to the sample size rather than differential ecological structures and, consequently, the intraclast flora can be considered as a subset of the muddy sample.

The sample ordination from the DCA (**Figure 7**) suggests that the palynological assemblage of the muddy sample related more to the samples from the bottom of the Quilichao sequence. The CONNIS clustering closely resembled that by **Berrio et al.** (2002), although our analysis was based on the site scores from the DCA ordination instead of the original assemblages (**Figure 7**). Our cluster grouped the muddy sample within the older zone (QIO-1b) in the original publication with a cophenetic distance smaller than

Table 1. Radiocarbon dating of three wood samples, ICA laboratory

Lab access number	Sample	Material	Conventional radiocarbon age (BP)	Calibrated age
ICA 17W/1049	STRI 44179	Wood	>40,000 BP	—————
ICA 17W/1050	STRI 44177	Wood	37010 +/- 400 BP	Cal 40250 - 38890 BC
ICA 17W/1051	STRI 44176	Wood	11890 +/- 40 BP	Cal 11830 - 11630 BC

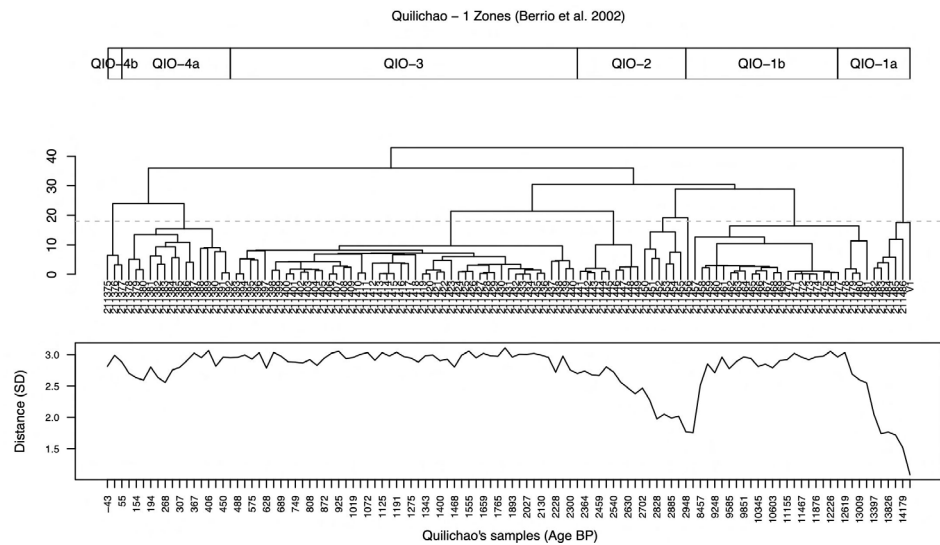


Figure 7. Comparison of the Quilichao-1 and the muddy sample assemblages. **Top:** Zones and subzones based on the cluster analysis and visual inspection of the down-core changes in the pollen spectra (Berrío *et al.*, 2002) charcoal and radiocarbon data are presented. These records document the Late-glacial and Holocene dry forest vegetation, fire and environmental history of the southern Cauca Valley in Colombia (1020 m. **Center:** CONISS clustering based on the four axes from the DCA ordination. The dashed line marks the cophenetic distance where the muddy sample (V1) gathers the older branch of the cluster. **Bottom:** Euclidean distances between the muddy sample and the Quilichao-1 assemblages. Notice the similarity of the muddy sample and the samples at the bottom of the core.

the observed to discern among groups in Berrío *et al.*'s dataset. The Euclidean distances among samples exclusively from Quilichao-1 DCA scores varied between 0.013 and 2.767 standard deviations (SD) while those between the muddy sample and all the Quilichao samples were considerably larger, between 1.085 and 3.110. The samples closer to the muddy assemblage were, again, those from the Upper Pleistocene samples from Quilichao (Figure 7, bottom). The palynological assemblage from the muddy sample was closely related to zone QUI-1a (~13,000 to 10,520 ¹⁴C yr BP) representing the typical Caribbean dry forest dominating the CV vegetation during the latest Pleistocene and early Holocene (Berrío *et al.*, 2002). Furthermore, the palynological record indicated the lack of extensive grasslands in the CV during this period. The main difference with the QIO-1a zone in the Quilichao-1 record was that our assemblage lacked the contribution of the Andean forest elements (*Alnus*, *Myrica*, and *Quercus*), probably due to reduced connectivity with sources from upstream.

Discussion

The high contrast of the fossil-bearing conglomerate layer observed by independent geophysical methods clearly indicated the lenticular shape of the deposits observed at Platanares, Paso La Torre, and the two intermediate areas (Figures S5-S11, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>). Furthermore, the thickness of the layer ranged from 15 to 44 meters in Platanares (Figures 3, S5, S6, S7, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>) and from 14 to 29 meters in Paso La Torre (Figures 4-5), and the lenses were aligned NNE-SSW dipping towards the SE (Figures 3, 5). The internal consistency within the two datasets provides additional reassurance of the accuracy of the model. The P-wave velocities clearly fell in two distinct non-overlapping populations and the slow velocities measured in the topsoil were consistently about half the velocity of the conglomerate. These distinct velocity

populations reduce the probability of rock misidentification and, thus, result in clear-cut layer models. While electrical resistivity values are less compelling than seismic velocities (given that absolute resistivities may suffer from mathematical artifacts introduced during the geophysical inversion process) the south-to-north gradual increase observed in seismic velocities is evidently mimicked by a gradual increase in electrical resistivity. Furthermore, the rapid convergence of ERT inversions (converging consistently within a few iterations) attests to the robustness of our models and relatively low noise levels in our field data.

The lenticular geometry of the conglomerate beds together with the poor sorting, the lack of imbrication or internal stratification of the conglomerate, and the polymodal grain size distribution suggest deposition in an alluvial fan (**Tucker**, 2001). The composition of the clasts, dominated by black chert and vein quartz and also containing basalts and gabbro, could be interpreted as sourced from the nearby eastern flanks of the Western Cordillera where such lithologies are exposed (**Nivia**, 2001). However, an eastern source cannot be completely ruled out by the conglomerate clast composition alone as units with similar lithologies are also present in the western slopes of the Central Cordillera (**Nivia**, 2001), even though this source seems less likely.

Many of the large proboscidean fossils are often found with conglomerate clasts attached to the bone suggesting that they are found in the conglomerate layer. Unfortunately, the bones themselves did not have enough enamel to be dated. Additional taphonomic studies are required to understand the nature of the proboscidean fossilization that seems related to the alluvial fan deposition. A radiocarbon age of 13,689 Cal Yr. BP (13,780 – 13,575 Cal Yr. BP) (**Table 1**) indicates that the deposit accumulated during the latest Pleistocene and the overall palynological record demonstrates that the vegetation corresponds to an inter-Andean dry forest. The most abundant taxon was Cyperaceae, which has been reported as part of the open vegetation community rather than the swamp assemblage in the dry ecosystems of the CV (**Ramírez-Padilla et al.**, 2015). Therefore, its abundance does not necessarily imply the prevalence of wetlands. Arecaceae and Moracea-Urticaceae were abundant as well comprising ~50% of the pollen sum on each sample while Apocynaceae, Bignoniaceae, Asteraceae, and Amaranthaceae were also modest components of both assemblages. The environments reflected by these assemblages coincide with those of dry forests similar to extant inter-Andean dry forests and swamps described in the region (**Ramírez-Padilla et al.**, 2015), a trait that has been persistent throughout the Holocene (**Berrio et al.**, 2002; **González-Carranza et al.**, 2008). A difference between the samples was the considerable extant amounts of aquatic taxa such as *Typha* and *Sagittaria* and the variety of spores in the muddy sample, which is probably a taphonomic effect. While the intraclast is a portion of old fluvial plain eroded incorporated as a clast into an alluvial fan conglomerate in a high-energy environment, the high abundance of the aquatic taxa in the muddy sample is probably the result of a filled oxbow lake with standing water and abundant aquatic vegetation. Both multivariate analyses suggested that the palynological assemblage is similar to those found in older Quilichao sequence sediments (**Berrio et al.**, 2002) that are also Upper Pleistocene (**Figure 7**) representing the typical Caribbean dry forest that dominated the vegetation of the Cauca Valley during the latest Pleistocene (**Berrio et al.**, 2002). Furthermore, the palynological record indicates the lack of extensive grasslands in the Valley during this time period.

Conclusions

A world-class locality of well-preserved proboscidean fossils in western Colombia is reported and characterized here for the first time providing a strong anchor for paleontological, paleogeographic, and paleoenvironmental reconstructions of the Americas during the late Quaternary. The conglomerate contains the proboscidean fauna accumulated during the Late Pleistocene in alluvial fan settings. The geometry of the bodies is lenticular and oriented perpendicularly to the modern course of the Cauca River.

The vegetation during the Late Pleistocene in the Cauca Valley corresponds to a tropical dry forest and no evidence of extensive savannas was found.

The three-dimensional geometry of the buried and submerged fossiliferous rock layer was successfully revealed using two independent geophysical methods based on seismic velocities and electrical resistivities.

Supplementary information

See supplementary information on <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1666/3225>

Acknowledgements

The National Geographic Society CP-032R-17, the Smithsonian Tropical Research Institute, the Anders Foundation, the 1923 Fund, and Gregory D. and Jennifer Walston Johnson provided funding. Dirley Cortés, Monica Carvalho, Sebastián Gómez, Juan Parra, Mary Luz Parra, Augusto Duplant, Luis Felipe Estrada, Mariano Carreño, Rogelio Peña, Ubeimar Rojas, Dimila Mothe, and German Salamanca assisted in field work. Carmen Benedicto Parrilla helped processing some of the seismic data. Andes Earth Imaging (Miami, USA) and Subsuelo3D (Bogotá, Colombia) provided equipment and field logistics. Christian Ziegler documented the expedition. Thanks to the miners of Platanares and Paso La Torre (Diego) and the two anonymous reviewers, as well as editor G. Bayona for reviewing the manuscript.

Author contributions

C.J. designed and coordinated the research program; C.J. and J.E. performed all analyses and led the writing of the manuscripts with contributions of all coauthors; D.C. performed the palynological analysis; C.R., A.H., and G.O. performed the geophysical analysis; G.K.S. found the sites and explored them for more than 30 years; S.G. performed the sedimentological analysis and S.E.F. the field work.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest regarding the present paper.

References

- Bacon, C. D., Molnar, P., Antonelli, A., Crawford, A. J., Montes, C., Vallejo-Pareja, M. C. (2016). Quaternary glaciation and the Great American Biotic Interchange. *Geology*, 44(5), 375-378. <https://doi.org/10.1130/G37624.1>
- Bacon, C. D., Mora, A., Wagner, W. L., Jaramillo, C. A. (2013). Testing geological models of evolution of the Isthmus of Panama in a phylogenetic framework. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 171, 287-300. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2012.01281.x>.
- Bacon, C. D., Silvestro, D., Jaramillo, C. A., Smith, B. T., Chakrabarty, P., Antonelli, A. (2015). Biological Evidence Supports an Early and Complex Emergence of the Isthmus of Panama. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 6110-6115.
- Berrio, J. C., Hooghiemstra, H., Marchant, R., & Rangel, A. (2002). Late-glacial and Holocene history of the dry forest area in the south Colombian Cauca Valley. *Journal of Quaternary Science*, 17, 667-682.
- Carrillo, J. D., Faurby, S., Silvestro, D., Zizka, A., Jaramillo, C., Bacon, C. D., Antonelli, A. (2020). Disproportionate extinction of South American mammals drove the asymmetry of the Great American Biotic Interchange. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117, 26281-26287. <https://doi.org/10.1073/pnas.2009397117>
- Carrillo, J. D., Forasiepi, A., Jaramillo, C., Sánchez-Villagra, M. R. (2015). Neotropical mammal diversity and the Great American Biotic Interchange: spatial and temporal variation in South America's fossil record. *Frontiers in Genetics*, 5, 451. <https://doi.org/10.3389/fgene.2014.00451>

- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC.** (2016). *Modelo Digital de Terreno y Modelo Digital de superficie del proyecto Corredor de Conservación y uso sostenible del sistema del Río Cauca.*
- Escobar, J., Hodell, D. A., Brenner, M., Curtis, J. H., Gilli, A., Mueller, A. D., . . . Guilderson, T. P.** (2012). A 43-ka record of paleoenvironmental change in the Central American lowlands inferred from stable isotopes of lacustrine ostracods. *Quaternary Science Reviews*, 37, 92-104.
- Faegri, K., Iversen, J.** (1989). *Textbook of Pollen Analysis*. New York: John Wiley and Sons. p?
- González-Carranza, Z., Berrío, J. C., Hooghiemstra, H., Duivenvoorden, J. F., Behling, H.** (2008). Changes of seasonally dry forest in the Colombian Patía Valley during the early and middle Holocene and the development of a dry climatic record for the northernmost Andes. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 152(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2008.03.005>
- Goring, S. J., Simpson, G. L., Marsicek, J. P., Ram, K., Sosalla, L.** (2019). Package 'Neotoma' (Version <https://github.com/ropensci/neotoma>).
- Hill, M. O., Gauch, H. G.** (1980). Detrended correspondence analysis, an improved ordination technique. *Vegetatio*, 42, 47-58.
- Hodell, D. A., Anselmetti, F. S., Ariztegui, D., Brenner, M., Curtis, J. H., Gilli, A., . . . Kutterolf, S.** (2008). An 85-ka Record of Climate Change in lowland Central America. *Quaternary Science Reviews*, 27, 1152-1165.
- Hooghiemstra, H.** (1984). *Vegetational and Climatic History of the High Plain of Bogota, Colombia: A Continuous Record of the Last 3.5 Million Years*. Verlags: J. Cramer.
- Hooghiemstra, H., Van der Hammen, T.** (1998). Neogene and Quaternary development of the neotropical rain forest: The forest refugia hypothesis, and a literature overview. *Earth-Science Reviews*, 44, 147-183.
- Howard, J. L.** (1993). The statistics of counting clasts in rudites: a review, with examples from the upper Palaeogene of southern California, USA. *Sedimentology*, 40, 157-174. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1993.tb01759.x>
- Hurlbert, S. H.** (1971). The nonconcept of species diversity: a critique and alternative parameters. *Ecological Monographs*, 54, 187-211.
- Jaramillo, C.** (2018). Evolution of the Isthmus of Panama: biological, paleoceanographic, and paleoclimatological implications. In C. Hoorn & A. Antonelli (Eds.), *Mountains, Climate and Biodiversity* (pp. 323-338). Oxford: John Wiley & Sons.
- Jaramillo, C., Romero, M., Ochoa, D., Silva, S., Bedoya, G., Paez, A., Pardo, A.** (2009). *Palinología de la formación la Paila: Mioceno Superior de la cuenca del Valle del Cauca*. Paper presented at the XII Congreso Colombiano de Geología, Sogamoso.
- Jaramillo, C. & Rueda, M.** (2021). A Morphological Electronic Database of Cretaceous-Tertiary Fossil Pollen and Spores from Northern South America V. 2012-2021. Retrieved from <http://biogeodb.stri.si.edu/jaramillo/palynomorph/> from the Smithsonian Tropical Research Institute <http://biogeodb.stri.si.edu/jaramillo/palynomorph/>
- Juggins, S.** (2015). rioja: Analysis of Quaternary Science Data (Version 0.9-5). Retrieved from <https://cran.r-project.org/web/packages/rioja/index.html>
- Leigh, E. G., O'Dea, A., Vermeij, G. J.** (2014). Historical biogeography of the Isthmus of Panama. *Biological Reviews*, 89, 148-172.
- Marchant, R., Boom, A., Behling, H., Hooghiemstra, H., Melief, B., Geel, B. V., . . . Wille, M.** (2004). Colombian vegetation at the Last Glacial Maximum: a comparison of model-and pollen-based biome reconstructions. *Journal of Quaternary Science*, 19, 721-732.
- Molnar, P.** (2008). Closing of the Central American Seaway and the Ice Age: A critical review. *Paleoceanography*, 23(1), 1-A2201. Retrieved from http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?db=pubmed&cmd=Retrieve&dopt=AbstractPlus&list_uids=16028557017787850148related:pN1WS6_feN4J
- Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Pardo, A., Silva, J. C., Valencia, V., . . . Niño, H.** (2015). Middle Miocene closure of the Central American Seaway. *Science*, 348, 226-229.
- Moreno, E., Vergara, D., Jaramillo, C.** (2014). Las colecciones palinológicas del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI), Panamá. *Boletín de la Asociación Latinoamericana de Paleobotánica y Palinología*, 14, 207-222.
- Nivia, A.** (2001). *Mapa Geológico del Departamento del Valle del Cauca*. Bogotá: INGEOMINAS.
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, R. G., O'Hara, B., Simpson, G. L., ... Wagner, H.** (2010). Community Ecology Package (Version R package version 1.17-0): R for Statistical Computing. <http://CRAN.Rproject.org/package=vegan>

- Pelegrin, J. S., Quijano, S. A., Belalcázar, L., Benavides-Herrán, A., Escobar-Flórez, S., Mothé, D., Avilla, L. d. S.** (2022). Report on mandibular remains of *Notiomastodon platensis* (Mammalia, Proboscidea) and review of its fossil record in the paleoecological context of Valle del Cauca, Colombia. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 25(1), 90-100. <https://doi.org/10.4072/rbp.2022.1.07>
- Pizano, C., Cabrera, M., García, H.** (2014). *Bosque seco tropical en Colombia; generalidades y contexto*. Bogota: Instituto de Investigacion de Recursos Biologicos Alexander von Humboldt.
- R-Development-Core-Team.** (2019). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Ramírez-Padilla, B. R., Macías-Pinto, D. J., Varona-Balcazar, G.** (2015). Lista comentada de plantas vasculares del valle seco del río Patía, suroccidente de Colombia. *Biota Colombiana*, 16, 1-49.
- Redpath, B. B.** (1973). *Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations*. Vicksbury, MS
- Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B., . . . van der Plicht, J.** (2013). IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, 55(4), 1869-1887. https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947
- Roubik, D. W., Moreno, J. E.** (1991). *Pollen and Spores of Barro Colorado Island* (Vol. 36). St. Louis: Missouri Botanical Garden.
- Simpson, G. G.** (1983). *Splendid Isolation: The Curious History of South American Mammals*. New Heaven: Yale University Press.
- Smith, B. T., Amei, A., Klicka, J.** (2012). Evaluating the role of contracting and expanding rainforest in initiating cycles of speciation across the Isthmus of Panama. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279, 3520-3526.
- Tucker, M. E.** (2001). *Sedimentary petrology. An introduction to the origin of sedimentary rocks*. West Sussex, England: Wiley-Blackwell.
- Vrba, E. S.** (1992). Mammals as a Key to Evolutionary Theory. *Journal of Mammalogy*, 73, 1-28.
- Webb, S. D.** (1976). Mammalian Faunal Dynamics of the Great American Interchange. *Paleobiology*, 2, 220-234.
- Webb, S. D.** (1978). A history of savanna vertebrates in the New World. Part II: South America and the great interchange. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 9, 393-426.
- Webb, S. D.** (2006). The great American biotic interchange: patterns and processes. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 93, 245-257.
- Woodburne, M. O.** (2010). The Great American Biotic Interchange: Dispersals, Tectonics, Climate, Sea Level and Holding Pens. *Journal of Mammalian Evolution*, 17, 245-264.

Ciencias de la Tierra

Artículo original

El *Mapa de Timaná*: versión de puño y pluma de Francisco José de Caldas

Francisco José de Caldas' long lost *Timaná Map*

Sergio Andrés Mejía Macía

Historiador independiente

Resumen

Se analiza una versión inacabada del *Mapa de Timaná* de Francisco José de Caldas, cuyo original fue levantado en 1798, nunca fue comentado por sus contemporáneos y no ha sido reconocido ni titulado como tal desde 1816. Si bien no se trata de la pieza original –que como se sabe fue entregada por su autor a Alexander von Humboldt, quien la editó e imprimió en 1814–, sí se demuestra que es obra del puño y pluma de Caldas. A partir de este descubrimiento, se propone un criterio cartográfico y de estilo para la búsqueda continuada de mapas, bocetos y borradores de autoría de Caldas.

Palabras clave: Francisco José de Caldas (1768-1816); *Mapa de Timaná* (1798); Cartografía histórica; Atribución cartográfica; Cartografía inconclusa; Cartografía del río Magdalena.

Abstract

The article analyses an unfinished version of Francisco José de Caldas' *Mapa de Timaná*, whose first draft was levied and drawn in 1798, was not commented by contemporaries, and has not been recognised nor entitled as such since 1816. Although this version is not the original map –which, as is well known, was handed over by Caldas to Alexander von Humboldt in 1814, who then edited and published it–, certainly Caldas drew it. Stemming from this discovery, here I make some general suggestions regarding the continued search for Caldas' scant and disarrayed cartographic production, which should focus on unfinished drafts, unaccomplished projects, and local maps, rather than on finished, well-drawn, and general pieces.

Keywords: Francisco José de Caldas (1768-1816); *Mapa de Timaná* (1798); Historical cartography; Cartographic attribution; Unfinished cartography; Maps of the Magdalena River.

Presentación

En la cartoteca del Centro Geográfico del Ejército (CEGET) en Madrid se conserva una versión del *Mapa de Timaná* de Francisco José de Caldas, catalogada sin autor, título ni fecha. Aunque inacabada, o mejor, interrumpida, es una pieza bastante trabajada, debidamente proyectada sobre cuadrícula geodésica y trazada con sumo cuidado. Se trata de un mapa de tamaño medio, de 75 x 54,1 cm, es decir 0,4 m², y con una escala aproximada de 1:485.000, que representa un territorio cercano a los 100.000 km². Es claro que su autor preparaba un mapa ambicioso, resultado del trabajo de años en la prospección de un territorio extenso y difícil por lo montañoso y desigual. Demostraré que la pieza fue, en efecto, obra de Francisco José de Caldas y que constituye la única versión conocida de su *Mapa de Timaná*, perdido desde hace 224 años y acaso el más buscado de su cartapacio. Antes de presentarlo conviene reproducir su única versión conocida, publicada por Alexander von Humboldt en 1814 en su *Atlas géographique et physique des régions équinoxiales du Nouveau Continent*, dieciséis años después del levantamiento original de Caldas en 1798.

En el grabado de alta densidad de los editores parisinos del barón, se aprecia en la pieza –inserta como complemento de la *Carte du Río Grande de la Magdalena*– el nacimiento del río en la laguna del Buey, su curso alto hasta la población de Nuevo Prado, el curso del río

Citación: Mejía Macía SA. El *Mapa de Timaná*: versión de puño y letra de Francisco José de Caldas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):496-513, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1647>

Editor: Darío Valencia-Restrepo

Correspondencia:

Sergio Andrés Mejía Macía;
hyref99@yahoo.com

Recibido: 7 de marzo de 2022

Aceptado: 13 de mayo de 2022

Publicado: 28 de junio de 2022



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

Cauca hasta Buga por el occidente, y, en la parte sur, el sistema montañoso hoy conocido como macizo colombiano, con la población de Almaguer en el extremo suroccidental. También se observa, en trazos dispuestos radialmente, la sucesión de páramos de la naciente cordillera Central, hasta el nevado de Barragán (rotulado como “Barraguan”).

Debido a que el original que Caldas entregó a Humboldt no ha sido localizado ni fue comentado para la posteridad por quienes lo vieron –sin duda sus amigos en Popayán–, toda comparación con la versión editada por Humboldt ha sido imposible hasta hoy. Antes de emprenderla, cabe preguntarnos sobre la pieza publicada por el barón, su estilo y criterio editorial. Como es sabido y ha sido comentado en la rica bibliografía humboldtiana –empezando por él mismo–, el barón y sus editores parisinos tenían nociones bastante elaboradas sobre la adaptación y uso apropiado de las imágenes, ya fuera que estas acompañaran sus textos científicos o se imprimieran por separado, como es el caso del *Atlas* en cuestión (Moncada-Maya, 2003). Al respecto es conocida la defensa que Humboldt hizo sobre la diferencia de representación cartográfica adoptada en su mapa general de Nueva España y en la carta particular del camino de México a Veracruz, tema discutido por José Omar Moncada Maya en *El nacimiento de una disciplina – La geografía en México (siglos XVI a XIX)* (Moncada-Maya, 2003). A continuación, se reproduce la versión impresa del *Mapa de Timaná* de Caldas publicada en 1814 con su título en francés, tal como le fue asignado por Humboldt (Figura 1).

El radical proceso editorial a que fue sometido el original puede intuirse incluso sin conocerlo. En primer lugar, se le asignó un nuevo título, que evidentemente no era el primigenio: *Carte du Río Grande de la Magdalena depuis ses sources jusqu'aux 4° de Latitude, par F. J. de Caldas*. En segundo lugar, y esto es lo fundamental, la pieza está supeditada a otra, principal en la lámina, la citada *Carte du Río Grande de la Magdalena* del mismo Humboldt, mapa que incluye únicamente los cursos bajo y medio del río hasta la Villa de Purificación. Así pues, el original de Caldas –cualesquiera que hayan sido sus términos de

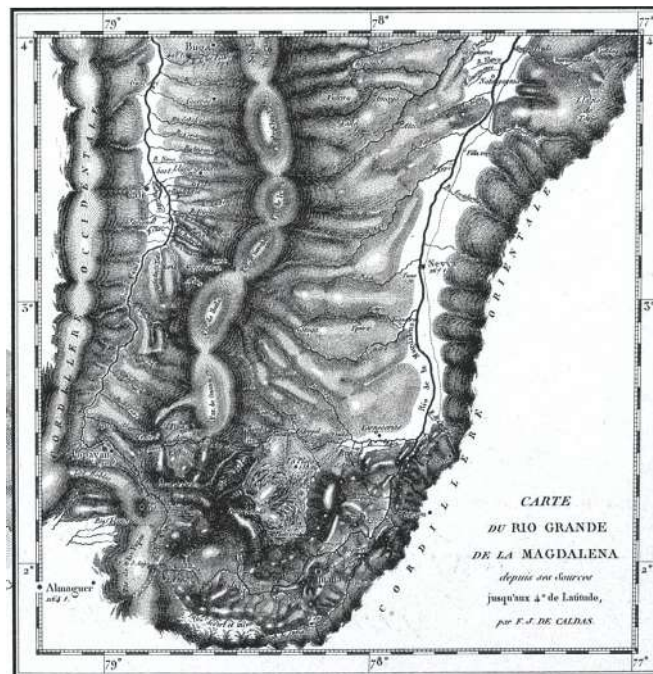


Figura 1. Francisco José de Caldas, *Carte du Río Grande de la Magdalena depuis ses Sources jusqu'aux 4° de Latitude*; inserto como complemento de: Alexander von Humboldt, *Carte du Río Grande de la Magdalena depuis le 4° de Latitude jusqu'à son embouchure*, en *Atlas géographique et physique des régions équinoxiales du Nouveau Continent*, París, Chez F. Schoell, Libraire, 1814, lámina 24

representación y estilo cartográficos– fue editado por el barón y sus grabadores parisinos de manera que sirviera como complemento a su propio mapa y completara, mediante la suma de las dos piezas y dando el crédito debido a ambos autores, la representación de la totalidad del curso del Magdalena y su valle. Por cierto que la hoja en cuestión incluye un recuadro más, titulado *Plan topographique de l'Angostura de Carare*, firmado por Humboldt. Como se sabe, el paso del Carare, o roca del Pretel, fue siempre el tramo más difícil en la navegación del Magdalena, solo practicable por pequeñas embarcaciones hasta Honda.

Además del cambio del nombre, en la edición interesa tener presente, en primer lugar, la traslación misma del manuscrito de Caldas al grabado dulce; en segundo, su adaptación al estilo cartográfico del barón, bien conocido (aunque siempre variable) gracias a la riqueza de su producción impresa. Y es que al citado *Atlas géographique et physique* se suman, entre muchas piezas sueltas manuscritas e impresas y otras con las que acompañó sus textos, el *Atlas Pittoresque du Voyage – Vues des Cordillères*, de 1810 (complemento del primer tomo del *Voyage aux régions équinoxiales du Nouveau Continent, fait en 1799, 1800, 1801, 1802, 1803 et 1804 par Alexandre de Humboldt et Aimé Bonpland*), y el *Atlas géographique et physique du Royaume de la Nouvelle-Espagne*, de 1834 (**von Humboldt & Bonpland**, 1810).

Debe señalarse, también, el corte del de Caldas al norte de Natagaima, que lo hace coincidir perfectamente con el mapa de Humboldt, terminado en Purificación. Llama la atención la inclusión del río Cauca y su valle hasta la ciudad de Buga, así como la mencionada intensidad del grabado de las montañas y cordilleras, adaptada al estilo del barón, como puede verse por la comparación entre la representación de las tres cordilleras y la Sierra Nevada en su propio mapa y la empleada en el de Caldas. Así pues, la simple contemplación de la lámina completa del *Atlas géographique et physique des Régions Équinoxiales du Nouveau Continent* (con acento en mayúscula, al uso en el francés de la época), Humboldt editó y adaptó igualmente todas las demás características del *Mapa de Timaná* de Caldas a su propio estilo cartográfico y tipográfico, incluida la representación de los cursos de los ríos, la rotulación de la toponimia y sus convenciones o símbolos, como se aprecia en la **figura 2**.

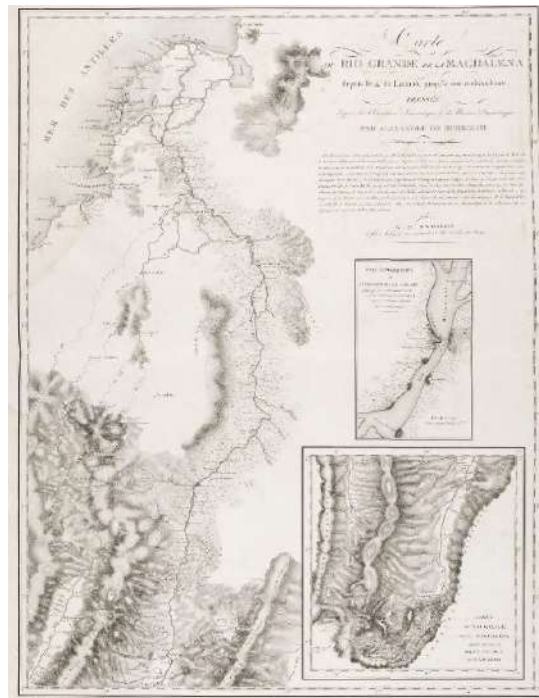


Figura 2. *Atlas géographique et physique des régions équinoxiales du Nouveau Continent*, París, Chez F. Schoell, Libraire, 1814, lámina 24

Sin más preámbulos, ésta es la pieza conservada en el Centro Geográfico del Ejército, reproducida aquí en página completa en la **figura 3**.

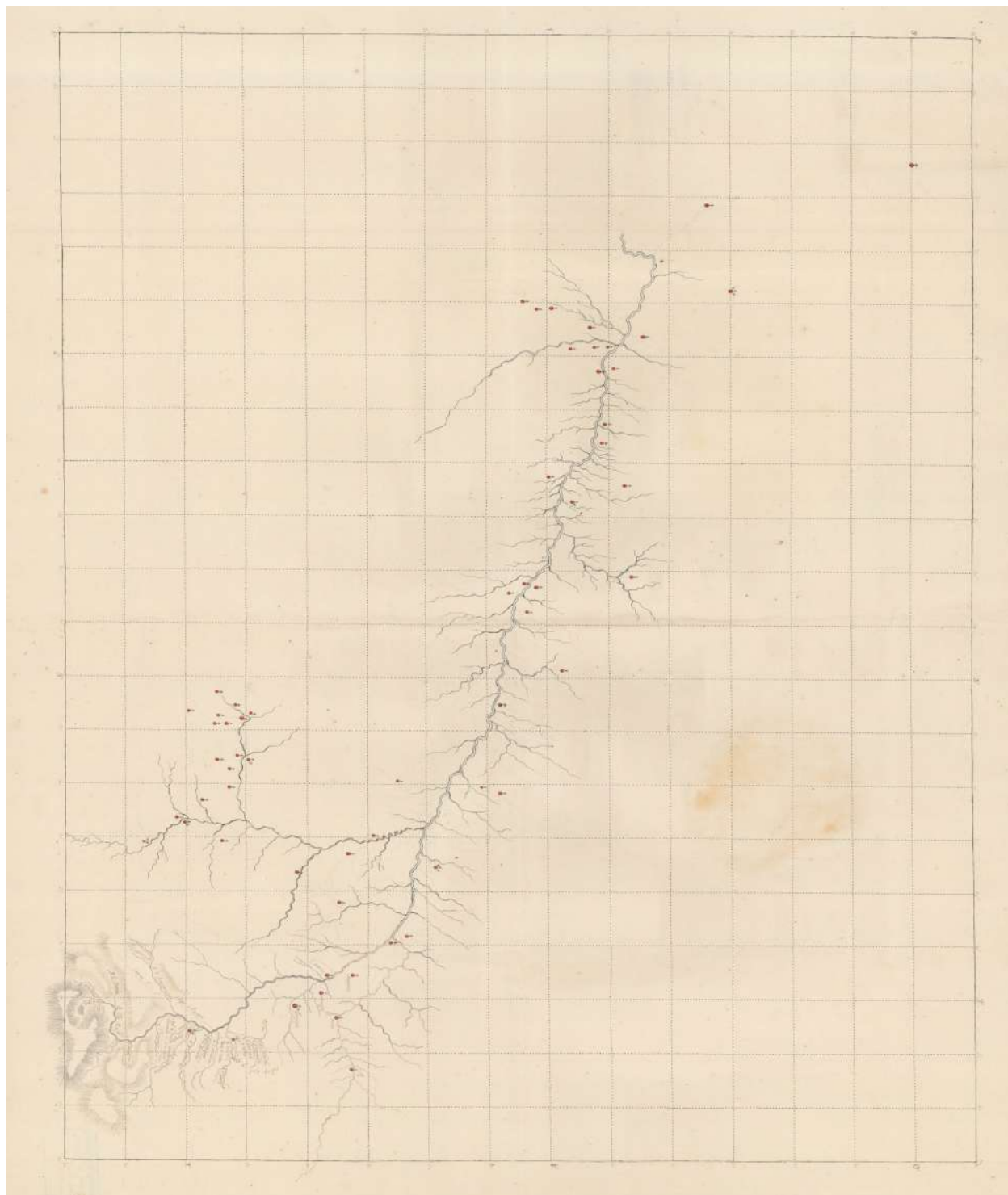


Figura 3. S. a. [F. J. de Caldas], s. t. [*Mapa de Timaná y proyecto cartográfico del Alto Magdalena entre su nacimiento y la villa de Ambalema, eje de cálculo para el levantamiento general de la mitad sur del Nuevo Reino de Granada*]. s. f. [tpq. 1806 – taq. 1816] – Tinta y lápiz sobre papel, 75 x 54.1 cm – CGE, Madrid, SG-J-7-3-149

En el catálogo *Cartoteca Histórica – Índice de mapas y planos históricos de América* (Madrid, Servicio Geográfico del Ejército, 1974, p.53), se le reseña de la siguiente manera bajo la sección “Colombia – Diversos”:

H. 1815 «(Curso del río Magdalena hasta su nacimiento)» Anónimo 149

La “H” significa que el año de 1815 es hipotético; los paréntesis en el título, que éste es facticio, pues no figura en la pieza misma ni en documentación alguna conocida, y el número 149 corresponde a la simple ordenación numérica de los mapas de la colección, la cual empieza con el número 1 en la carpeta correspondiente a cada país (en este caso Colombia). En 1974, cuando apareció este catálogo, la publicación de la serie *Cartografía y relaciones históricas de Ultramar* solo había avanzado hasta la carpeta o volumen 4. La quinta, que salió a la luz en 1980, es la dedicada a Colombia, y en ella el número “149” corresponde al del orden del mapa y a la página en que se publicó, tanto en la carpeta de cartografía como en la descriptiva (que son dos volúmenes diferentes). El Centro Geográfico del Ejército (antes *Servicio*) también atribuye signaturas físicas a sus mapas según los muebles, estantes y gavetas en que se conservan. La correspondiente al que aquí se estudia es la ES-DF PCGE AR / SG-J-7-3-149, en adelante simplificada como CGE-149.

Cabe aclarar que este mapa fue reproducido, reducido a casi un doceavo de pliego, por José Antonio Amaya e Iván Felipe Suárez en el catálogo *Ojos en el cielo, pies en la tierra – Mapas, libros e instrumentos en la vida de sabio Caldas*, preparado para la exposición realizada en el Museo Nacional de Colombia entre el 7 de diciembre de 2018 y el 24 de febrero de 2019 (Amaya & Suárez, 2018). Sin embargo, los autores no incluyeron ningún comentario específico sobre él, ni histórico ni cartográfico, y lo presentaron erróneamente como autógrafa de Caldas. Lo cierto es que la pieza no lleva firma, fecha, título ni anotación alguna, como tampoco figura atribución de autor en las dos fichas descriptivas de la pieza incluidas en los catálogos del CEGET y de la Red de Bibliotecas de Defensa de España (Bibliodef). Así pues, sorprende sobremanera su designación como autógrafa de Caldas, lo que sin duda se debe al inusitado ánimo exultante del catálogo, sesgo que debilita su calidad científica y crítica con afirmaciones que retrotraen el estudio del Caldas cartógrafo a los viejos tiempos de la historia patriótica. He discutido los graves inconvenientes de *Ojos en el cielo, pies en la tierra* en una reseña crítica que puede consultarse en el **material suplementario** del presente artículo (<https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1647/3229>).

En el catálogo en línea de Bibliodef se le titula de manera diferente, también facticia: *Curso del río Magdalena desde su nacimiento en el departamento de Huila hasta la parte meridional del de Tolima*. Sus medidas son 75 cm x 54,1 cm y se da su escala como de 1: 600.000, pero en realidad esta se aproxima a 1:485.000, como se ha dicho. La pieza está digitalizada con el norte hacia la izquierda, en disposición apaisada.

Se trata de un mapa inacabado, no de un boceto o croquis, pues es una pieza trabajada con intención definitiva, interrumpida en estado avanzado de elaboración. Ya figuran en ella, establecidas geodésicamente, todas las características importantes: el curso alto del río Magdalena y sus principales afluentes, la mayor parte rotulados; aparecen sugeridas las montañas en ese mismo sector, lo que permite establecer el nacimiento del río en la laguna del Buey (1° 58' 40" N y 2° 17' 30" O con respecto a Santafé de Bogotá, según el mismo mapa); la rejilla geodésica, graduada precisamente al occidente de Santafé; los lugares habitados, indicando con cruces, asteriscos y flechas, respectivamente, los lugares capitales y aquellos en los que el autor señala haber tomado medidas astronómicas de longitud y latitud (ver ilustración adelante), así como la toponimia rotulada en la parte suroriental del mapa, aunque no así la del resto, donde dichas convenciones figuran sin rotulación. Se verá que ésta es la principal razón que permite establecer la pieza como versión extendida del *Mapa de Timaná* de Caldas.

En términos de latitud, el autor incluyó en el CGE-149 un ámbito cartográfico más amplio que en la versión publicada en 1814, extendiéndolo hasta los 5° norte para incluir la ciudad de Santafé. Por el contrario, redujo la longitud, de manera que no incorporó el

nacimiento ni el curso alto del río Cauca, limitado como lo está a la vertiente nororiental del macizo colombiano y a las fuentes del río Magdalena. La parte más adelantada del mapa –se diría que por allí comenzó su dibujo y proyección–, que además es la única rotulada y la que comporta la mayor intensidad de representación, corresponde, *grosso modo*, a la impresa *Carte du Río Grande de la Magdalena depuis ses Sources jusqu'aux 4° de Latitude*. En consecuencia, debe considerársela como la única versión original conocida del *Mapa de Timaná*. La reproducción de este sector del CGE-149 facilita la comparación a golpe de vista con el mapa editado en 1814, como puede observarse en la **figura 4**.

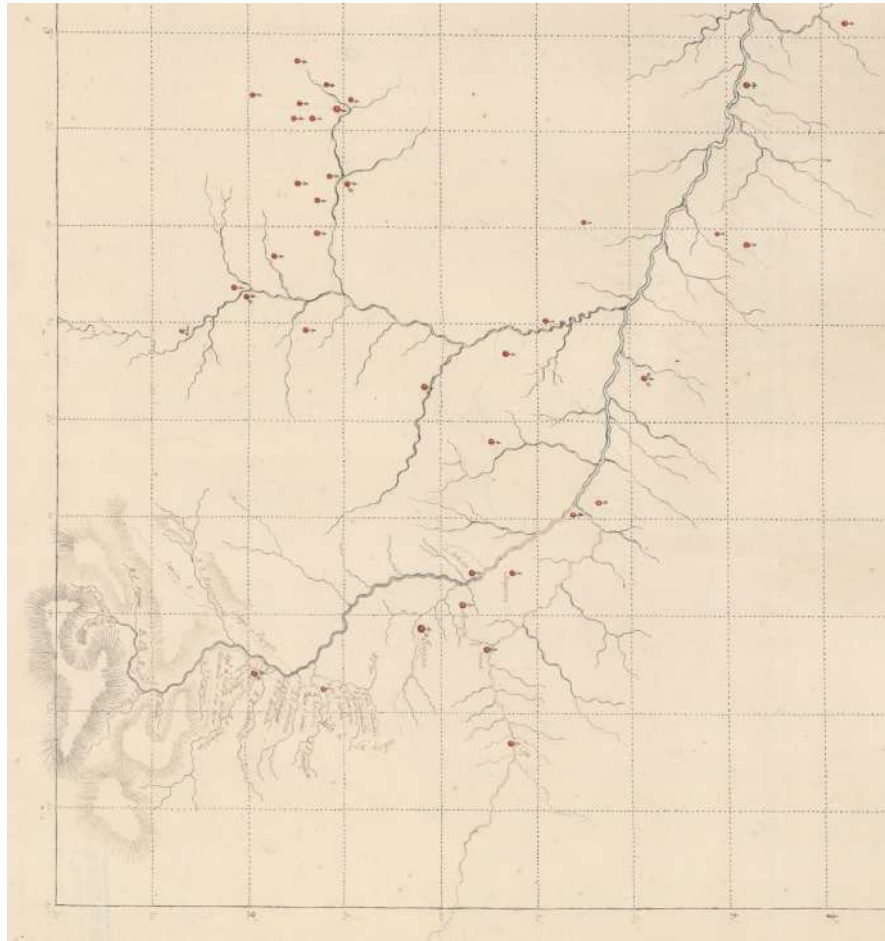


Figura 4. Recorte del anterior, conmensurable con la impresa *Carte du Río Grande de la Magdalena depuis ses Sources jusqu'aux 4° de Latitude* y restringido al mismo ámbito cartográfico

La cobertura geodésica de la totalidad del CGE-149 es de $1^{\circ} 30'$ a 5° de latitud norte y de $0^{\circ} 10'$ de longitud este, a $2^{\circ} 20'$ de longitud oeste de Santafé de Bogotá. Esto es, tres grados y medio de latitud por dos grados y medio de longitud. La rejilla misma está trazada con lápiz, punteada, segmentada en cuadrados de 10 minutos de lado y dispuesta sobre marco trazado en línea continua, también a lápiz. Bajo el punteado se percibe una línea continua trazada con lápiz más tenue. La representación del río Magdalena mismo cambia a partir de los $2^{\circ} 10'$ norte, pues hasta esa latitud su cauce está sugerido con la convención de cuatro líneas paralelas, propia de los ríos principales, en tanto que a partir de ahí y hacia el norte se reemplaza esta convención por la línea doble, como puede observarse en el recorte incluido en la **figura 5**.

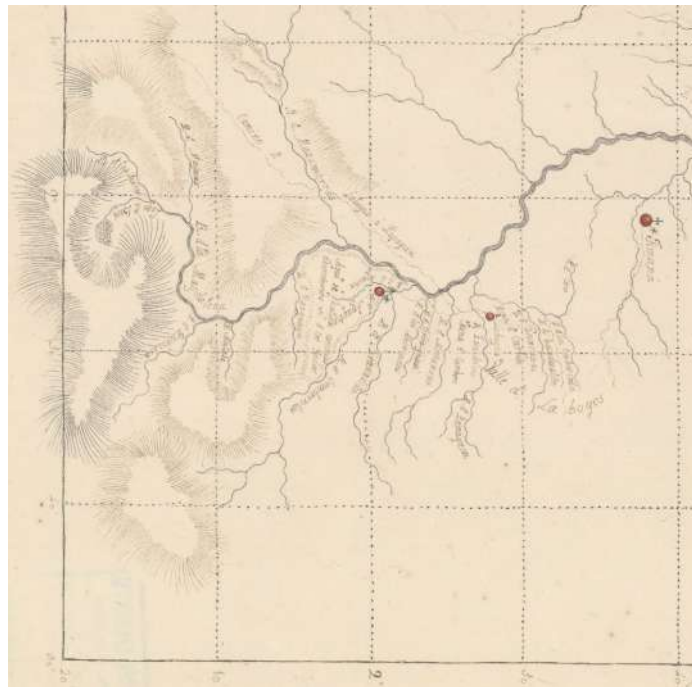


Figura 5. Recorte del CGE-149 limitado a los 20 cuadros surorientales, con rotulación de la toponimia

Justo donde se pasa a este segundo estilo de representación, más simple y en fase menos avanzada de elaboración, se percibe un tímido uso de tinta azul, superpuesta sobre el lápiz, en lo que sigue del curso del río hacia el norte. La línea cuádruple hasta los $2^{\circ} 10'$ está trazada en tinta china tenue, lo que indica el mayor progreso del trabajo en el segmento sureño. Asimismo, solo hasta esa latitud y a todo lo ancho de su longitud (para un total de 20 cuadros de los dichos), se incluye la toponimia, omitida hacia el norte en el resto de la pieza, figurando allí solamente las convenciones de sitio habitado sin rotulación de nombre. Esto aplica también a Santafé, cuyo nombre no figura, aunque sí su ubicación geodésica y el símbolo convencional respectivo, como se observa en otro recorte del *Mapa de Timaná* en la **figura 6**.

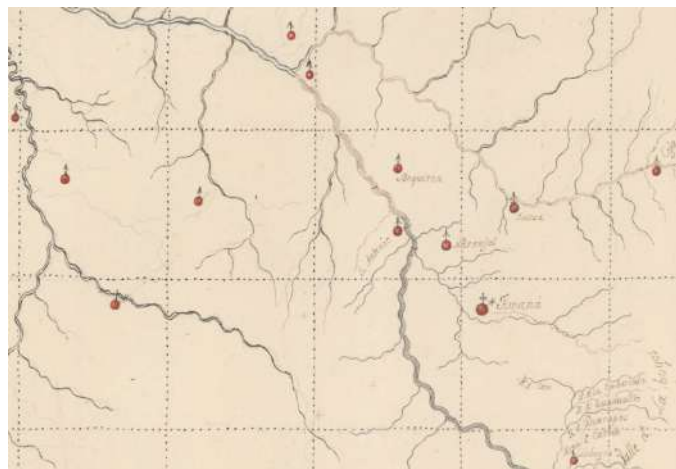


Figura 6. Símbolos convencionales para lugares habitados según su jerarquía jurídica urbana y lugares en que se tomaron medidas astronómicas de longitud y latitud

En la **tabla 1** se recoge y ordena la toponimia rotulada del *Mapa de Timaná* de Caldas: según el CGE-149, forman el río Magdalena el desagüe del lago del Buey, no rotulado, que aquí cabe llamar quebrada del Buey, la cual se une con la de Tías Juntas, a cuyo curso conjunto cae por la izquierda la de Majuas, donde el río toma su nombre. Su primer afluente por la margen izquierda es el río Mazamorras, que ofrece vado al camino de Popayán a Laboyos. La población más alta en el curso del Alto Magdalena es San Agustín, por su margen derecha, la cual aparece con esta nota: “Aquí se hallan estatuas adoratorios de los Indios.” Por la margen izquierda, la población más alta es San Antonio. Sobre el río Suaza, no rotulado y afluente por la derecha, se ubican los pueblos del mismo nombre y de La Ceja, rotulado sin el artículo. Los ríos de Guachicos y Guarapas le caen por la derecha justo al norte de Laboyos, el primero flanqueando la población por el occidente y el segundo por el oriente. En su curso más alto, en el sector del mapa que incluye rotulación, caen al Magdalena, por la izquierda, siete afluentes, seis de ellos no rotulados, y por la derecha, diez, de los cuales no están rotulados ni el Timaná ni el Suaza.

A primera vista se observa que el mapa recoge el trabajo de quien recorrió los caminos que discurrían desde el paso de Guanacas por el valle del río desde su nacimiento hasta Ambalema, uniendo las poblaciones ribereñas y las ubicadas en los piedemontes de las cordilleras Central y Oriental. Los afluentes del Magdalena por su margen izquierda, provenientes de la cordillera Central, figuran tan solo en sus cursos bajos, en los tramos que discurren por el valle, con excepción de los ríos Saldaña y Coello, representados hasta sus cursos altos.

El mapa no incluye el tramo completo del río entre Ambalema y Honda, lo que puede explicarse porque éste figura con lujo de detalles en el mapa impreso de Humboldt de 1814 (no así en su conocido mapa manuscrito de 1801 [Madrid, Archivo General Militar de

Tabla 1. Toponimia rotulada del *Mapa de Timaná*, de puño y pluma de F. J. de Caldas

Bajando por la margen izquierda:		
1. Lago del Buey ^C	2. Quebrada Tías Juntas ^C	3. Quebrada de Majuas ^C
4. Río de la Magdalena (primera rotulación en su curso naciente)	5. Camino de Laboyos a Popayán	6. Río de Mazamorras ^P
7. San Antonio	[Cuatro afluentes primarios sin rotular entre el de Mazamorras y la población de San Antonio]	[Dos afluentes primarios sin rotular entre San Antonio y la parte del mapa sin rotulación]
Subiendo por la margen derecha:		
8. Boquerón	[Río Suaza no rotulado, así como 8 afluentes suyos por la margen izquierda y 9 por la derecha, secundarios del Magdalena]	9. Suasa [sic]
10. Ceja	11. Naranjal	[Río Timaná, no rotulado]
12. Timaná	13. Laboyos	14. Mina de carbón
15. Río de Guarapas ^S	16. Quebrada de Guadualitos ^S	17. Río de la Embarcada ^S
18. Río de Caco ^T	19. Valle de Laboyos	20. Río Guachicos ^P
21. Mina de carbón	22. Quebrada de Yanayacu ^S	23. Quebrada de Matanzas ^P
24. Quebrada de Orito-Guasi ^P	25. Quebrada de los Ahorcados ^P	26. San Agustín, con esta nota: “Aquí se hallan estatuas adoratorios de los Indios.”
27. Río de Sombrerillos ^P	28. Río del Granadillo ^S	29. Río de San Agustín ^S
30. Quebrada Osoquayco ^P	31. Quebrada Mutate ^P	32. Quebrada de Quinchana ^P

Comenzando por la margen izquierda del río y regresando por la derecha. Numeración agregada. Cabeceras del río marcadas con ^C, afluentes primarios con ^P, secundarios con ^S, terciarios con ^T

Madrid, referencia COL-15-04], que solo llega hasta Honda por el sur). Por lo demás, la definición del comienzo del Alto Magdalena siempre ha oscilado entre esos dos lugares, e, incluso, ha sido trasladada al sur hasta Purificación, que en efecto es el término del mapa del barón. El autor se abstuvo de trazar el camino de Santafé a Canoas (hoy Girardot) por el Tequendama, la Mesa de Juan Díaz, Anapoima y Tocaima, si bien algunas de estas poblaciones figuran señaladas en este sector, sin rotular. Tampoco figura el camino de Santafé a Honda, ni esta villa. Interesa la selección que hizo el autor de ciertas cuencas hidrográficas afluentes del Magdalena, entre las que no figuran las de los ríos Bogotá y Prado, bien conocidas en la capital, puesto que la primera acogía el camino al sur, por Anapoima y Tocaima, y la segunda había sido descrita en 1808 en la memoria que el cura José Manuel Campos y Coto contribuyó para el *Semanario del Nuevo Reyno de Granada*. En cambio sí figuran con inusitada extensión y algún detalle los ríos de Cabrera, que le cae al Magdalena por la derecha al norte de Villavieja, proveniente del valle de Alpujarra; el Suaza, detalladísimo; el Timaná, con siete afluentes; todos los del Alto Magdalena en el tramo que discurre por el macizo colombiano; más abajo, por la margen izquierda, el río Páez y su afluente, el Negro de Narváez, que desciende del nevado del Tolima, y los mencionados Saldaña y Coello, en la parte noroccidental del mapa. Los demás solo figuran en sus cursos bajos por la plana del valle del Magdalena. La selección parece arbitraria y es probable que se debiera a la disponibilidad de determinados planos particulares, como se discute adelante.

Con todo, en vista de su desconocimiento durante dos siglos, y por tratarse del primer trabajo cartográfico de Caldas (presumiblemente uno de los mejores, o al menos uno de los pocos que llevó a término), lo que más interesa de esta pieza es el *Mapa de Timaná*, inserto en la parte inferior del CGE-149. Es la única parte de la pieza que puede considerarse acabada, si bien no figura aún reteñida, lavada ni trabajada en sus artes finales. Eso sí, ya cuenta con una representación continua; una toponimia bastante rica y claramente rotulada, aunque no completa; el establecimiento geográfico y geodésico del nacimiento del Magdalena en la laguna del Buey, en las coordenadas señaladas; la sucesión de sus afluentes por ambos márgenes hasta el Boquerón, lugar hoy conocido como estrecho del Magdalena, y la figuración de las montañas a ambos lados de su quebrado y sinuoso valle alto, lo que el autor obtuvo mediante el uso genérico de trazos o líneas radiales, sin estimación ni sugerencia convencional de sus alturas diferenciales.

Conviene dedicar un párrafo a la representación de las montañas en el CGE-149, pues esta característica siempre es una poderosa herramienta de atribución cartográfica. El autor utiliza los mencionados trazos formando rizos cerrados con los que sugiere las masas montañosas flanqueadas por valles y ríos, como se observa en la **figura 7**.

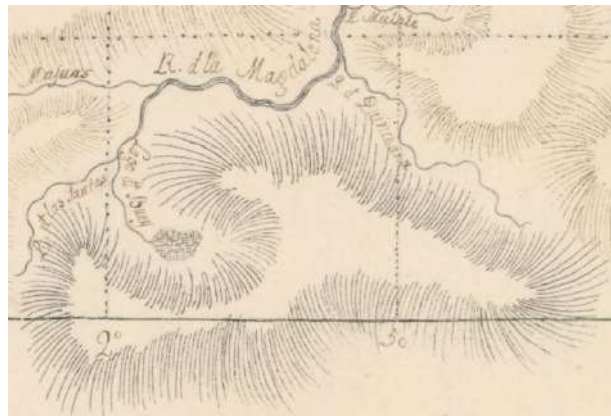


Figura 7. Recorte del CGE-149 en su sector del *Mapa de Timaná*, representación de montañas, ríos y rotulación

El mismo sistema, coloreado en verde, fue utilizado por Caldas en su copia del *Mapa corográfico del Nuevo Reyno de Granada*, pieza en la que no se da crédito alguno a su autor, el español Vicente Talledo, y que se conserva en el Archivo Histórico Restrepo con el título apóposito de *Provincias Unidas de la Nueva Granada*. También aplicó este arte a su versión del mismo mapa en punto menor, descubierta en el Archivo General de la Nación (AGN), y que presenté y discutí en otro lugar. Cabe recordar que Mauricio Nieto publicó el primero, sin comentario alguno ni explicación de su impostación del mapa de Talledo, en *La obra cartográfica de Francisco José de Caldas* (Nieto, 2006). El segundo lo publiqué y comenté en “Versión en punto menor del mapa – *Provincias Unidas de la Nueva Granada*, de Francisco José de Caldas, 1815-1816” (Mejía, 2019). Como puede apreciarse en la **figura 3**, se trata de un sistema sumamente genérico de representación de montañas, sin atención alguna a sus alturas ni familiaridad aparente con la estructura particular y característica de las cadenas montañosas de los Andes del norte.

El estilo cartográfico de la pieza es escueto, se diría que desnudo, lo que se explica por dos razones: en primer lugar, por tratarse de un mapa inacabado al que no se aplicaron las artes definitivas de una pieza terminada; en segundo, porque su autor adoptó el estilo de la cartografía “moderna”, propio de la segunda mitad del siglo XVIII, impuesto inicialmente por las cartas de navegación inglesas, o *bluecharts*, y más adelante por sus continuadores en las Armadas de Francia y España. En la Península este estilo escueto, de tinta negra sobre el blanco marfil del papel, se aprecia en su máxima expresión en el *Atlas Marítimo* de Vicente Tofiño, impreso en 1787, y en el Nuevo Reino de Granada en la obra de Joaquín Francisco Fidalgo que, aunque no circuló localmente, Caldas conoció en parte gracias a las gestiones de José Ignacio de Pombo.

En el rubro de la cartografía de tierras interiores, el estilo escueto, con máxima reducción de adornos y viñetas, entonces limitados a la cartela y el título, y el mismo contraste entre la tinta negra y el papel desnudo, se aprecia en los talleres de grabado franceses por lo menos desde la década de 1770, como es el caso de los mapas firmados por Jean-Baptiste Bourguignon d’Anville, comerciante cartográfico parisino que fuera tan del gusto de Caldas. Interesa constatar que en la cartografía de tierras interiores, el estilo escueto no era norma aún en la primera década del siglo XIX en los talleres españoles, como se constata en la producción de Tomás López y sus hijos, ornada y de sabor antiguo todavía en la década de 1820. Pero incluso los López ya habían abandonado toda suerte de figuras mitológicas, exageradas alegorías monárquicas, Eolos de carrizos henchidos y exuberantes rosas de los vientos. El autor de este mapa fue un aprendiz de “cartografía moderna”, a la manera de Tofiño y Fidalgo y, más directamente aun –lo que indica su relativa alienación con respecto a la cultura cartográfica española (extraños en su propia tierra, ha dicho David Brading de los criollos hispanoamericanos)–, del francés D’Anville y del prusiano Humboldt, este último influencia directa en la cartografía producida en el Nuevo Reino de Granada tras su viaje de 1801, gracias, en particular, a su mapa del río Magdalena, del que dejó copias en poder del virrey Pedro de Mendinueta y de José Celestino Mutis.

Por estas dos razones, en la pieza CGE-149 nada resalta más que la rejilla geodésica, característica básica de un mapa “moderno”, que en este caso resulta tan conspicua debido a la condición inacabada del mapa. Debe anotarse que ésta no se destaca de igual manera en el sector de la pieza que acoge el *Mapa de Timaná*, mientras que sí es preponderante en el resto. Dicha condición permite apreciar con máxima claridad que el CGE-149 se compone de tres partes:

1. Una rejilla geodésica entre los 1° 30' y los 5° de latitud norte, los 0° 10' longitud este y los 2° 20' oeste de Santafé, graduada cada 10'. Fue lo primero que trazó su autor, a lápiz y tirada a regla, sin cartela y, por lo tanto, sin nombre de autor, título, lugar ni fecha.
2. La ubicación, con símbolos convencionales, pero sin rotulación, de los principales lugares habitados y afluentes del río entre los 2° 10' y los 4° 36' de latitud norte (que es la

de Santafé), con los cursos bajos de dichos afluentes entre los 0° 40' y los 2° 20' al oeste de esa ciudad. Cabe nombrarlo *Proyecto cartográfico del Alto Magdalena entre su nacimiento y la villa de Ambalema, eje de cálculo para el levantamiento general de la mitad sur del Nuevo Reyno de Granada*, título que se discute adelante con mayor detalle.

3. Por último, el *Mapa de Timaná* que aquí se presenta y comenta de preferencia, el cual, como paso a demostrar, constituye la versión renovada del original levantado por Caldas en 1798 y entregado a Humboldt en 1801, desconocido, o no bien interpretado, desde entonces.

Atribución a Caldas y propuesta de título para el mapa CGE, Colombia-149

Sabemos que desde su primer viaje de estudios jurídicos, a Santafé, emprendido en 1788, Caldas había recorrido repetidas veces el camino de Guanacas, que continuó haciéndolo con asiduidad durante su carrera de comerciante y, hasta diciembre de 1805, como agregado a la Expedición Botánica del Nuevo Reyno de Granada. También sabemos que su primer trabajo cartográfico fue el mapa del nacimiento y curso alto del río Magdalena, que entregó a Humboldt en 1801 para su publicación. Nos hemos preguntado sobre esta pieza al menos desde 1852, cuando **Acosta y Calbo** (1852) y **de Pombo** (1852) publicaron las primeras biografías de Caldas.

En vista de que el trabajo de Pombo es bien conocido en Colombia, basta con recordar el de Acosta y Calbo, que no lo es y que solo en raras ocasiones ha sido tenida en cuenta por investigadores de Caldas en Colombia. Me refiero a los *Estudios históricos – Don Francisco José de Caldas, naturalista neogranadino* de José Julián Acosta y Calbo (**Acosta y Calbo**, 1852). Acosta y Calbo (San Juan de Puerto Rico, 1825 – 1891) fue un profesor y erudito puertorriqueño licenciado en física, química y matemáticas en Madrid, profesor en el Seminario Conciliar de San Juan de Puerto Rico, miembro de la Sociedad Económica de Amigos del País y militante por la abolición de la esclavitud en la isla. Su estudio biográfico sobre Caldas, publicado el mismo año que el de Lino de Pombo, es por completo independiente, de erudición comparable y, sin duda alguna, superior en agudeza, espíritu crítico y candidez científica.

Desde entonces, Joaquín Acosta, Federico González Suárez, Diego Mendoza Pérez, Eduardo Posada, Guillermo Hernández de Alba, Álvaro Fernández Pérez, Andrés Soriano, Santiago Díaz Piedrahita, **Arias de Greiff et al.**, 1966; **Bateman**, 1978; **Bateman & Arias de Greiff**, 1978; **Nieto**, 2006, han expandido el repertorio de cartas, obras y mapas de Caldas, sin brindar el menor rastro sobre su primer trabajo cartográfico y científico acabado, es decir, el *Mapa de Timaná*.

En cuanto al segundo componente del CGE-149, esta es la única pieza original de Caldas (y no copia del trabajo de otro cartógrafo) que evidencia su avance en la cartografía del curso alto del río Magdalena. Ya conocíamos un esbozo en el boceto de anotaciones conservado en el Archivo Histórico Restrepo, con el curso del río desde Jagua hasta Honda y sus afluentes y lugares habitados observados a ambos márgenes, anotados por quien los descende. Este boceto, que se reproduce a continuación –carente de rejilla geodésica, con la figuración de las montañas vistas desde el suelo y sin asomo de proyección cartográfica–, no puede compararse con el mapa que aquí se discute, pero sí corrobora que Caldas abrigó el mencionado proyecto cartográfico intermedio, es decir, un mapa general de la parte sur del Reino. Titulado de manera facticia –al parecer por José Manuel Restrepo Vélez, en cuyo archivo se conserva– con el nombre de *Mapa del río Magdalena desde Jagua hasta Honda*, propongo denominarlo *boceto*, como probablemente Caldas mismo lo consideraría (en vista del CGE-149 que ahora conocemos). Lo reproduzco de nuevo (**Figura 8**) para recordar dicho proyecto y porque contribuye a establecer la toponimia no rotulada de nuestro mapa, en el entendido de que no alcanza a su extremo suroriental, o *Mapa de Timaná*.

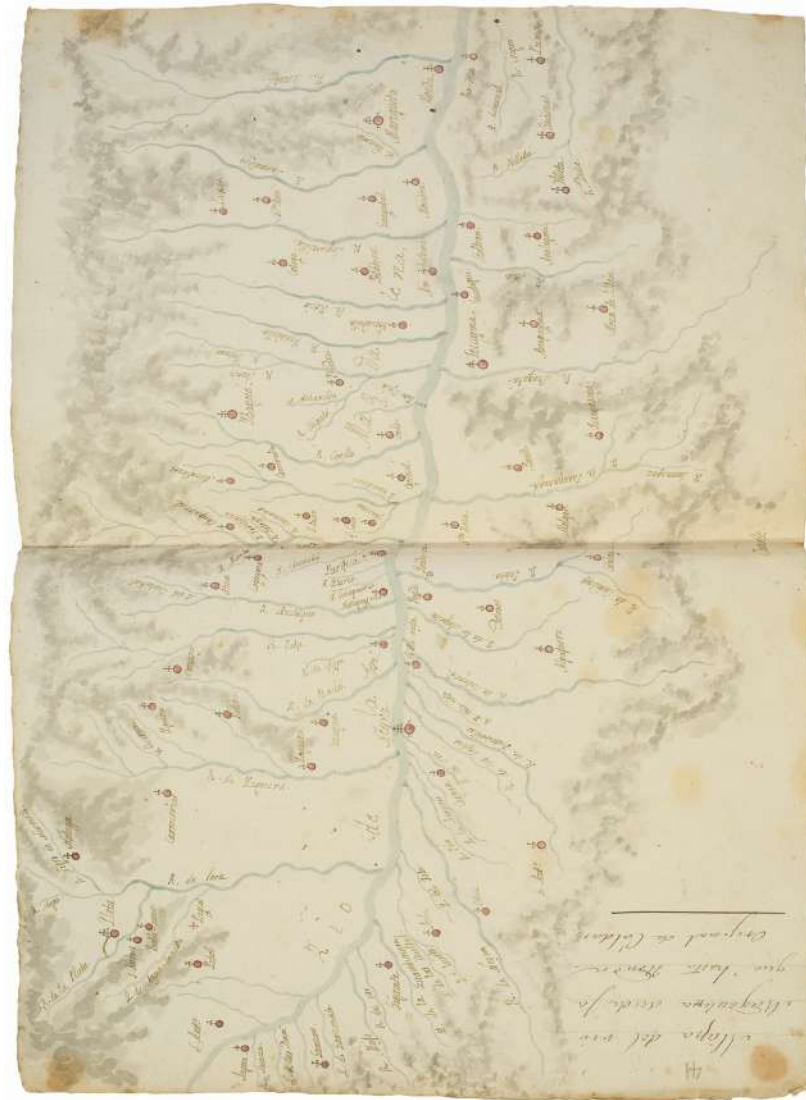


Figura 8. F. J. De Caldas, *Boceto del río Magdalena desde Jagua hasta Honda*, ca. 1805 – Archivo Histórico Restrepo, fondo XII, “Cartografía”; volumen 2, “F. J. de Caldas, sus cartas y opúsculos” – Lápiz, tinta y aguada sobre papel. Se reproduce invertido, pues en el original el sur está en la parte alta. Fue publicado en la obra *Mutis y la Real Expedición Botánica del Nuevo Reyno de Granada*, Bogotá – Madrid, Real Jardín Botánico de Madrid – CSIC – Villegas Editores – Lunwerg Editores, 1992, volumen 2, p.10

Por otra parte, en la **tabla 2** elucido la toponimia no rotulada del *Proyecto cartográfico del Alto Magdalena* con recurso al *Boceto del río Magdalena desde Jagua hasta Honda* y al moderno *Atlas de Colombia*, publicado por el Instituto Geográfico ‘Agustín Codazzi’ en 1977 bajo la dirección de Eduardo Acevedo Latorre.

Ya presentados los dos componentes del CGE-149, procedo a sustentar su atribución a Caldas. El primer argumento, implícito en las **tablas 1 y 2**, es su tema cartográfico. No solo encontramos el inserto *Mapa de Timaná*, sino la elaboración geodésica de la mayor parte del *Boceto del Magdalena desde Jagua hasta Honda*. Con respecto al primero, tal y como lo conocemos por la publicación de Humboldt, el ámbito geográfico del CGE-149 solo se diferencia por la exclusión de la vertiente occidental del Macizo Colombiano, el nacimiento del río Cauca y la omisión de las poblaciones de Popayán y Almaguer,

Tabla 2. Toponimia no rotulada del CGE-149. De norte a sur por la margen derecha y de sur a norte por la izquierda. Numeración agregada. Se anota si fue incluido o no en el *Boceto del río Magdalena desde Jagua hasta Honda (BMJH)* y en los casos necesarios se aclara el nombre actual del lugar.

Subiendo por la margen derecha del río:		
1. Santafé de Bogotá	2. Tocaima (en <i>BMHJ</i>)	3. Camino Tocaima – Canoas (no figura en <i>BMHJ</i>)
4. Río Sumapaz (en <i>BMHJ</i>)	5. Icononzo (no figura en <i>BMHJ</i>)	6. Cunday (en <i>BMHJ</i>)
7. Santa Rosa (en <i>BMHJ</i> ; hoy San Cayetano)	8. Río Cunday (en <i>BMHJ</i>)	9. Prado (en <i>BMHJ</i>)
10. Prado Nuevo (en <i>BMHJ</i>)	11. Dolores (en <i>BMHJ</i>)	12. San Alfonso (no figura en <i>BMHJ</i>)
13. Río de Cabrera (en <i>BMHJ</i>)	14. Alpujarra (en <i>BMHJ</i>)	15. Quebrada Tatacoa (no figura en <i>BMHJ</i>)
16. Villavieja (en <i>BMHJ</i>)	17. Río Villavieja (en <i>BMHJ</i>)	18. Fortalecillas (en <i>BMHJ</i>)
19. Río Fortalecillas (en <i>BMHJ</i>)	20. Río de las Ceibas (en <i>BMHJ</i>)	21. San Antonio (en <i>BMHJ</i>)
22. Neiva (en <i>BMHJ</i>)	23. Río Frío (en <i>BMHJ</i>)	24. Río Neiva (en <i>BMHJ</i>)
25. Hobo (en <i>BMHJ</i>)	26. Gigante (en <i>BMHJ</i>)	27. Quebrada de la Grandiosa (en <i>BMHJ</i>)
28. Río del Oro (en <i>BMHJ</i>)	29. Río Majo (en <i>BMHJ</i>)	30. Quebrada de Garzoncito (en <i>BMHJ</i>)
31. Garzón (en <i>BMHJ</i>)	32. Quebrada de las Damas (en <i>BMHJ</i>)	33. Río Suaza (en <i>BMHJ</i>)
34. Jagua (en <i>BMHJ</i>)		
Hacia el sur continúan los topónimos rotulados, listados en la Tabla 1. Siguen los no rotulados por la margen izquierda del Magdalena, de sur a norte y ascendiendo los cursos de los ríos Páez y Negro de Narvárez:		
35. Pital (en <i>BMHJ</i>)	36. Río Pital (no figura en <i>BMHJ</i>)	37. La Plata (en <i>BMHJ</i>)
38. Río La Plata (en <i>BMHJ</i>)	39. Río Páez (en <i>BMHJ</i>)	40. Quebrada Caraguaja (no figura en <i>BMHJ</i>)
41. Río Yaguaro (no figura en <i>BMHJ</i>)	42. Paycol (en <i>BMHJ</i>)	43. Carnecerías (en <i>BMHJ</i>)
44. Monserrate (por la derecha del río Páez; no figura en <i>BMHJ</i>)	45. Corrales (cabeceras del río Ullucos; no figura en <i>BMHJ</i>)	46. Inzá (no figura en <i>BMHJ</i>)
47. El Cabuyo (no figura en <i>BMHJ</i>)	48. Santa Luis (no figura en <i>BMHJ</i>)	49. Araújo (no figura en <i>BMHJ</i>)
50. La Palma (no figura en <i>BMHJ</i>)	51. Riochiquito (no figura en <i>BMHJ</i>)	52. Belalcázar (no figura en <i>BMHJ</i>)
53. Río Negro de Narvárez (en <i>BMHJ</i>)	54. Natagá (en <i>BMHJ</i>)	55. San Isidro (no figura en <i>BMHJ</i>)
56. Camponet (no figura en <i>BMHJ</i>)	57. Rionegro (no figura en <i>BMHJ</i>)	58. Tálaga (no figura en <i>BMHJ</i>)
59. Taravita (no figura en <i>BMHJ</i>)	60. Tóez (no figura en <i>BMHJ</i>)	61. Villa Rodríguez (no figura en <i>BMHJ</i>)
62. San José (no figura en <i>BMHJ</i>)	63. Iquira (en <i>BMHJ</i>)	64. Quebrada Betania (no figura en <i>BMHJ</i>)
65. Quebrada Sardinata (no figura en <i>BMHJ</i>)	66. Quebrada Gallinas (no figura en <i>BMHJ</i>)	67. Quebrada Dindal (no figura en <i>BMHJ</i>)
68. Río Baché (en <i>BMHJ</i>)	69. Guagua (en <i>BMHJ</i>)	70. Aipe (en <i>BMHJ</i>)
71. Natagaima (en <i>BMHJ</i>)	72. Purificación (en <i>BMHJ</i>)	73. Guamo (en <i>BMHJ</i> ; equivocado al sur del río Saldaña)
74. San Luis (en <i>BMHJ</i> ; equivocado al sur del río Saldaña)	75. San Juan (en <i>BMHJ</i> ; equivocado al sur del río Saldaña)	76. Río Saldaña (en <i>BMHJ</i>)
77. Espinal (en <i>BMHJ</i>)	78. Esmeraldas (en <i>BMHJ</i>)	79. Miraflores (en <i>BMHJ</i>)
80. Ibagué (en <i>BMHJ</i>)	81. Río Coello (en <i>BMHJ</i>)	82. Quebrada Chimba (no figura en <i>BMHJ</i>)

ubicadas en dicha vertiente. En lo demás, se trata del mismo mapa, descontadas por supuesto las particulares artes tipográficas de los editores parisinos de 1814, cuya densidad de grabado los obligó a prescindir de buena parte de una toponimia poco significativa para el público europeo. Vemos, por otra parte, que donde Humboldt y sus editores privilegian las montañas, el CGE atiende más a los cursos de los ríos. En cuanto al ámbito u horizonte cartográfico, ambas características son intercambiables.

Gracias a que el CGE-149 incluye rotulación de toponimia en su sector suroriental, se puede apreciar que lo esencial de ella se reproduce en la versión impresa por Humboldt, empezando por la rotulación del lago del Buey, el páramo de las Papas, el curso completo del río Suaza y los topónimos de las principales poblaciones, que Humboldt extendió por el norte hasta Nuevo Prado y que el CGE-149 alcanza y trasciende, como se ha visto, en su sector no rotulado. En el sector suroriental también se presta considerable atención a las montañas, indicadas en lápiz y con trazos poco densos, más tenues, mientras que en el impreso del barón son fuertes manchas de tinta a partir de un grabado denso. A pesar de este contraste, en ninguna de las dos piezas se representan verdaderamente cotas altitudinales. En una y otra se trata de “artes de montañas”, en cada una a su manera, sin asomo alguno de verdadera medición.

En segundo lugar, para la atribución de este mapa interesa sobremanera el eje de cálculo en Santafé. Sabemos que Humboldt traspuso su versión editada de 1814 al meridiano de París, confiando, como debió estarlo, en su propia medición de 1801 de la longitud de la capital virreinal, e interesado en reducir el *Mapa de Timaná* de Caldas (o *Carte du Río Grande de la Magdalena depuis ses Sources jusqu'aux 4° de Latitude*, como lo renombró) a su propio mapa del curso bajo y medio del río. Pero no fue así con Caldas, quien nunca confió plenamente en su establecimiento de las coordenadas de Santafé, y no tenía ningún interés en trasponer su mapa a París, Londres o Cádiz. El Caldas cartógrafo mantendría su centro de cálculo en el Observatorio Astronómico de Santafé, del que sería director. Llegará a ser su casa. Por esta razón, en el CGE-149 observamos que el río Magdalena nace a 2° 17' 30" de longitud occidental de Santafé y por la misma razón la extensión del *Mapa de Timaná* hasta el *Proyecto cartográfico del Alto Magdalena* alcanza, justamente, hasta Santafé.

En cuanto a la cuadrícula geodésica de nuestro mapa, conviene recordar la copia o croquis que dibujó Caldas de la *Carte du Pérou et du Brésil septentrional, de Terre-Ferme, de Guayana et des Amazones*, del francés Jean-Baptiste Bourguignon D'Anville, la que segmentó en una cuadrícula numerada que no fue otra cosa que su plan para el levantamiento del mapa general del Reino. El mapa que aquí se estudia es –junto con el del camino del Malbucho y los planos militares que el payanés levantó en Antioquia– el único de su puño y pluma en el que aplicó esta misma cuadrícula. Comparado con el croquis cuadrículado del D'Anville, el CGE-149 es la pieza más ambiciosa y completa que Caldas acometió (Mejía, 2017). Debe recordarse que su *Carta de las Provincias Unidas de la Nueva Granada* (1811 - 1815) no es más que una copia literal, aunque disimulada, del *Mapa corográfico* de Vicente Talledo. El mapa CGE-149 que aquí se comenta constituye, pues, el mayor avance al que Caldas consiguió llevar su gran proyecto de cartografía general.

Todo lo anterior y las imágenes reproducidas, elocuentes por sí mismas, permiten establecer más allá de toda duda que este mapa inacabado, sin título, fecha ni firma es obra del puño, lápiz y pincel de Francisco José de Caldas. Propongo nombrarlo *Mapa de Timaná y proyecto cartográfico del Alto Magdalena entre su nacimiento y la villa de Ambalema, eje de cálculo para el levantamiento general de la mitad sur del Nuevo Reino de Granada*. Podría pensarse en un título alternativo con uso de grados y minutos y expresión de la extensión geodésica de la pieza, a la manera de Humboldt, pero esta práctica no fue común en Caldas, quien, por lo general, prefirió dar nombres a sus mapas sin incluir números.

Por lo demás, se sabe que Caldas habló en su vida sobre dos mapas de Timaná: en uno de ellos trazaba el nacimiento del río Magdalena y el camino de Guanacas y sus inmediaciones. Sabemos con certeza que este mapa existió, pues lo entregó a Humboldt, quien lo imprimió. También aludió a uno en ciernes cuyo propósito habría sido la elucidación de un conflicto de límites entre los cabildos de Timaná y La Plata. Al respecto se conoce alguna

carta suya en la que se queja de que dichos cabildos no quisieron pagarle una fuerte suma por su levantamiento. De este otro “mapa de Timaná” no tenemos más rastro que esta carta, y debemos concluir que no existió. Existe otra carta, la que envió desde Gigante a su amigo Santiago Arroyo el 15 de febrero de 1798, en la que le comunicó que por esos días no pensaba “en otra cosa que en delinear la carta de esta jurisdicción de Timaná”. Dos meses y medio antes había relatado al mismo amigo, también desde Gigante, haber levantado dicho mapa por segmentos: de Gigante a Neiva, de Popayán a La Plata, y la jurisdicción del cabildo de Timaná propiamente. No cabe duda, pues, de que el *Mapa de Timaná*, analizado en detalle en este artículo y que terminó en manos de Humboldt, fue el original que ahora se conoce en versión posterior e inserta en el CGE-149. Mientras no se encuentre el original entregado al barón en 1801 –que bien puede existir en algún repositorio europeo, probablemente parisino o berlinés–, la pieza CGE-149, aquí titulada como queda dicho, debe considerarse su versión *princeps*.

Por último, si cabe aducir como argumento de atribución la “memoria de los archivos”, valga mencionar que en el Centro Geográfico del Ejército el mapa contiguo al que aquí se discute, tanto en numeración (CGE-148) como en la gaveta en que se conserva (J-7-3), no es otro que es el titulado *Topografía de la confluencia del Nare y Magdale[na], de la de Samaná y Rionegro, de la Angostura de Carare, con el plano de los fuertes que deben formarse para cubrir el Magdalena*, firmado por Caldas en Santafé el 1º de noviembre de 1815. Ambas piezas debieron hacer parte del acervo confiscado en la Casa Botánica y al mismo Caldas entre mayo y octubre de 1816, todo remitido por Pascual Enrile a España a mediados de 1817. A pesar de mil peripecias y varios traslados institucionales, hasta la fecha ambos mapas se conservan juntos.

Datación

El periodo más amplio en que cabe datar nuestro mapa es la suma de los años que corrieron entre 1806 y 1811 y de 1815 a 1816. No es plausible que Caldas trabajara en él durante el año itinerante de 1812, cuando sirvió como militar activo en las provincias del Socorro y Tunja. Ese año, de haber cartografiado alguna región, ésta sería la que media entre Santafé y el río Chicamocha, como lo he sugerido en otro lugar (**Mejía**, en prensa). Tampoco lo haría en los años de 1813 y 1814, cuando sirvió al gobierno de Antioquia en diversas funciones de ingeniería, docencia, topografía y fortificación. Tampoco cabe imaginar que corresponda a su periodo quiteño, cuando levantó la *Carta del camino del Malbucho*, su croquis de las quinas de Loja, y se dedicó con gran intensidad a la botánica y la geografía de las plantas. Por lo demás, nada en el inacabado CGE-149 sugiere un contexto monárquico, ni tampoco republicano, como sí sucede con otras piezas de Caldas.

Tampoco cabe pensar que, antes de emprender el trabajo para complementarlo, Caldas necesitara conocer la publicación de su propio mapa por parte de Humboldt en 1814, pues él sabía mejor que nadie lo que había entregado en 1801 y porque, además, existían al menos dos copias en Santafé del manuscrito del barón sobre el río Magdalena, una en el archivo virreinal y otra en la Casa Botánica. Entre sus sucesivos “furores científicos”, astronómico, botánico, editorial, militar, etc., el director del Observatorio tuvo algunos periodos de mayor atención a temas cartográficos. El primero de ellos, una vez pasado su furor astronómico, corrió desde noviembre de 1807, cuando terminó de ordenar sus materiales traídos de Quito (según carta a Arroyo fechada el día 6 de ese mes), hasta la muerte de Mutis en septiembre de 1808, cuyo testamento lo desquició. Éste es el periodo más probable para la datación de nuestro mapa, especialmente si se acepta que su croquis cuadrículado del mapa de D’Anville fue realizado en esa misma época.

El segundo periodo, menos probable, es el que corre desde su regreso de Antioquia a Santafé, a principios de 1815, y su huida hacia el sur en mayo de 1816. Lo considero menos probable porque entonces Caldas se concentró en la mencionada copia del *Mapa corográfico* de Talledo. Recuérdese que el 25 de noviembre de 1815 se publicó en el *Argos de Nueva Granada* la invitación extendida por el gobierno de las Provincias Unidas a los ciudadanos

para que enviaran a Caldas “noticias, cartas impresas y mapas manuscritos”, pues había revivido su proyecto del “magnífico Atlas de Nueva Granada”. Así pues, ¿noviembre de 1807 a septiembre de 1808 o febrero a noviembre de 1815? Es imposible decirlo por el momento.

Además de la confirmación fundamentada de su atribución a Caldas y de su establecimiento como derivación del *Mapa de Timaná*, la pieza CGE-149 interesa por lo que comunica sobre la persistencia de Caldas en su proyecto cartográfico general. De aquí se derivan dos ideas nuevas que contribuyen a la mejor comprensión de su obra cartográfica. En primer lugar, el hecho de que desde el principio de su trabajo en este campo –que debe datarse en 1796, justo después de su primer “furor matemático”– y hasta el final de su vida, el aplicado estudiante de las “ciencias nuevas” concibió el proyecto mayor de cartografiar, si no la totalidad, al menos buena parte del Nuevo Reino en un mapa general.

El segundo argumento, que he discutido en otros lugares, es que entre 1797 y su muerte en 1816 cejó en su empeño, si cabe la expresión, progresivamente. Es decir, nunca lo hizo de plano, pues hasta su muerte su trabajo gravitó, en órbita irregular y sumamente variable, alrededor de la cartografía (Mejía, 2019). En lugar de una renuncia definitiva, Caldas se detuvo cada vez que retomó su proyecto de cartografiar el Reino o, por lo menos, su mitad sur, de manera que todos sus avances quedaron inconclusos: el más general fue el ya mencionado de su copia y cuadrícula del mapa de D’Anville, trabajo que cabe datar entre 1806 y 1807, tras su llegada a Santafé y durante su dirección del Observatorio Astronómico; sigue a este el que aquí se ha discutido; en tanto que el último fue la también mencionada *Carta de las Provincias Unidas*, copia disimulada, como se ha dicho, del *Mapa corográfico del Nuevo Reyno de Granada* de Talledo, que Caldas dejó interrumpida en su sector norte y costero.

En cuanto a sus propios trabajos concluidos –desde el croquis de las quinias de Loja hasta los planos militares de Antioquia, pasando por el del *Camino del Malbucho*– todos son piezas de topografía o cartografía local. Ninguno tiene una extensión o cobertura geográfica comparable a la del *Mapa de Timaná* y *proyecto cartográfico del Alto Magdalena*. Recuérdese, además, que se trata de una pieza de 75 x 54,1 cm, lo que corresponde a un pliego completo. Un mapa de estas dimensiones, construido sobre rejilla geodésica y bien documentado como lo fue éste, habría sido la base idónea para la cartografía general de la mitad sur del Nuevo Reino o, más precisamente, de las provincias de Popayán, Neiva, Mariquita y Santafé, y le habría permitido proseguir hacia el sur, con beneficio de las mediciones astronómicas que acumuló durante cinco años en el Reino de Quito. Más aún, su minuciosa *Carta del camino de Malbucho desde Ibarra hasta la embocadura del río Santiago en el Océano Pacífico y Bahía de San Lorenzo, levantado en julio y agosto de 1803*, le habría servido para calibrar las longitudes con miras a un mapa general. Medido a cadena, sobre el terreno y en el curso de dos meses, el río Santiago, en efecto, habría dado la escala para la graduación geodésica de Quito, Ibarra, Guayaquil y la cordillera de los Andes desde las fuentes del río Magdalena hasta el confín sur de Loja y Jaén de Bracamoros.

En conclusión, además de tratarse de la única versión manuscrita del impreso *Mapa de Timaná*, de puño y pluma de Caldas, esta pieza, ambiciosamente extendida hasta Santafé, es su máximo logro en el proyecto de cartografía general. En cuanto a las razones de su interrupción, no me queda más que remitir a la explicación que procuré dar a este problema, de manera general, en mi artículo “Versión en punto menor del mapa – *Provincias Unidas de la Nueva Granada* de Francisco José de Caldas, 1815-1816”.

Comentario sobre el estilo de Caldas y la investigación de su obra cartográfica

Está claro que la investigación de la obra cartográfica de Francisco José Caldas aún no se agota. La búsqueda continúa, pero no hay que enfocar la mirada en grandes mapas generales, acabados en sus artes y técnicas. Lo que hay que buscar son planos topográficos locales, copias de mapas generales ajenos, bocetos, borradores, proyectos inconclusos y abandonados, carteras de mediciones y anotaciones cartográficas de todo tipo, tanto gráficas como textuales. En esta búsqueda no están a la orden del día mapas generales, corográficos ni provinciales. Nada, ya se sabe, en el orden de la cartografía general del territorio de la

actual Colombia (tampoco del Ecuador). Otros fueron sus cartógrafos generales: Francisco Antonio Moreno y Escandón, Antonio de Arévalo, Domingo Esquiaqui, Vicente Talledo, José Manuel Restrepo, Joaquín Acosta, Agustín Codazzi. Caldas no entra en esa historia, pues aunque siempre acarició el proyecto, nunca lo adelantó más allá del mapa que se ha discutido en estas páginas.

La mejor manera de precisar la contribución de Caldas a la cartografía es disponer la serie de sus ensayos, bocetos y piezas acabadas, lo que propongo hacer avanzando de sur a norte, desde Loja hasta la Guajira, si bien sabemos que, cronológicamente, su trabajo comenzó con el *Mapa de Timaná* de 1798. En esta lógica aditiva, trozo a trozo –expresión que él mismo empleara, como se ha visto– se parte de su croquis de las quinas de Loja y se viaja hasta su copia de la parte norte del *Mapa corográfico* de Talledo. La principal característica de este cartapacio es su diversidad en estilo, extensión cartográfica, grado de originalidad y de avance (**Tabla 3**).

Tabla 3. Mapas, bocetos y copias realizados por Francisco José de Caldas ordenados de sur a norte

No.	Título	Tipo	Repositorio
1	Quinas de Loja	Croquis	RJBM
2	Establecimiento de la longitud de Quito	Medición	SNRG
3	<i>Carta del camino del Malbucho desde Ibarra hasta la desembocadura del río de Santiago en el Océano Pacífico y bahía de San Lorenzo, levantada en julio y agosto de 1803</i>	Mapa particular	CGE
4	<i>Mar del sur</i> , copia de original de Gabriel Ambrosio de la Roche	Copia	AHR
5	<i>Carte du Río Grande de la Magdalena depuis ses Sources jusqu'aux 4° de Latitude</i> (o <i>Mapa de Timaná</i>)	Mapa particular	Impreso por Humboldt en 1814. Original perdido
6	<i>Carta esférica del Virreinato de Santafé de Bogotá por Mr. D'Anville, corregida en algunas partes según las últimas observaciones. Copia de la Carte du Pérou et du Brésil septentrional, de Tierra-Firme, de Guayana et des Amazonas</i> , de 1776	Copia y estudio cartográfico	RJBM
7	<i>Boceto del río Magdalena desde Jagua hasta Honda</i>	Boceto	AHR
8	Medición del piso del Observatorio Astronómico de Santafé	Estudio topográfico	SNRG
9	Altura del nevado del Tolima	Medida azimutal y de altura	SNRG
10	<i>Campaña de 1812</i>	Boceto	CGE
11	Copia de la <i>Geographica Particular Detallada</i> de Francisco Javier Caro, de 1781	Copia	RJBM
12	Planos militares en Antioquia	Planos topográficos	RJBM
13	<i>Mapa de Timaná y proyecto cartográfico del Alto Magdalena entre su nacimiento y la villa de Ambalema, eje de cálculo para el levantamiento general de la mitad sur del Nuevo Reino de Granada</i>	Proyecto de mapa general	CGE
14	Copia de la parte norte del <i>Mapa corográfico del Nuevo Reyno de Granada</i> de Vicente Talledo y Rivera	Copia	AHR
15	<i>Carta de las Provincias Unidas de Nueva Granada en punto menor</i>	Copia	AGN

Fuentes: RJBM: Real Jardín Botánico de Madrid. SNRG: publicado en el *Semanario del Nuevo Reyno de Granada*. AHR: Archivo Histórico Restrepo, Bogotá. CGE: Centro Geográfico del Ejército, Madrid. AGN: Archivo General de la Nación, Bogotá

Conclusión

Para terminar, quisiera llamar la atención sobre la casi total prescindencia de las cartas de Caldas en la elaboración de este artículo. Si bien es cierto que aún carecemos de una tabulación apropiada de sus contenidos –pues sus tres ediciones (1917, 1978 y 2017) carecen de índices temáticos–, lo cierto es que su uso consuetudinario no ha conducido al descubrimiento de mapas perdidos o desconocidos de Caldas. Su pionero compilador, Eduardo Posada, a quien debemos más del 90 % de ellas, fue el primero en expresar, en sus conocidas *Apostillas*, su perplejidad ante el flaco cartapacio cartográfico de Caldas y la dificultad de ampliarlo. Tampoco es el camino la inveterada compulsión de las biografías escritas por Schumacher, Bateman, Díaz Piedrahita y demás, que ya cumplieron su ciclo y han rendido sus frutos. Los mapas de Caldas aún por descubrir –discretos, locales e inacabados–, están en los archivos y cartotecas de Colombia y España; en menor medida en París, Londres y, probablemente, Washington. Para encontrarlos hace falta enfocar la mirada en la búsqueda de girones como la *Carta de las Provincias Unidas en punto menor* y de bocetos inacabados como el que aquí se ha presentado.

Información suplementaria

Ver información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1647/3229>

Conflicto de intereses

Declaro que el artículo es de mi autoría única y que no tengo conflictos de intereses. En cuanto a la investigación correspondiente, afirmo que es mía, sin participación de otra persona, y que se ciñe a las normas y consideraciones de la cultura académica. Todos los créditos debidos están presentados en el artículo.

Referencias

- Acevedo-Latorre, E.** (1974). “Geografía y Cartografía”, en *Historia Extensa de Colombia*, volumen XXIV, *Las ciencias en Colombia*, Bogotá, Ediciones Lerner, 1974, pp. 19-284.
- Acosta y Calbo, J. J.** (1852). *Estudios históricos – Don Francisco José de Caldas, naturalista neogranadino*, París, Imprenta de Thunot y Compañía.
- Amaya, J.A. & Suárez, F.** (2018). *Ojos en el cielo, pies en la tierra – Mapas, libros e instrumentos en la vida del sabio Caldas*, Bogotá, Ministerio de Cultura – Museo Nacional de Colombia. p. 28.
- Arias de Greiff, J., Bateman, A., Fernández-Pérez, A., Soriano-Lleras, A.** (1966). *Obras completas de Francisco José de Caldas – Publicadas por la Universidad Nacional de Colombia como homenaje con motivo del sesquicentenario de su muerte*, Bogotá, Imprenta Nacional – Universidad Nacional de Colombia.
- Bateman, A.** (1978). *Francisco José de Caldas, el hombre y el sabio*, Bogotá, Biblioteca del Banco Popular.
- Bateman, A. & Arias de Greiff, J.** (editores) (1978). *Cartas de Caldas*, Bogotá, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Mejía, S.** (2017). “Francisco José de Caldas’ unaccomplished life project – His map Provincias de la Nueva Granada, 1811 / 1815.” *The Cartographic Journal*, 54(2), 163-172.
- Mejía, S.** (2019). Versión en punto menor del mapa Provincias Unidas de la Nueva Granada, de Francisco José de Caldas, 1815-1816. *Anuario Colombiano de Historia Social y de la cultura*, 46(1), 256-297.
- Mejía, S.** (en prensa). Nuevo mapa en inmediaciones de Francisco José de Caldas – Campaña de 1812. En prensa en: Gómez A (compilador, editor y coautor), *Caldasiana Neogranadina*.
- Moncada-Maya, J. O.** (2003). *El nacimiento de una disciplina – La geografía en México (siglos XVI a XIX)*, México, UNAM – Instituto de Geografía.
- Nieto, M.** (2006). (Compilador y coautor), *La obra cartográfica de Francisco José de Caldas*. Bogotá, Universidad de los Andes – Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – ICAHN.
- Pombo, L. De.** (1852). Sobre la vida, carácter y servicios patrióticos de Francisco José de Caldas. Periódico *La Siesta* (números 5-12), Imprenta de Francisco Torres Amaya por Carlos López, Bogotá.
- von Humboldt, A.** (1814). *Atlas géographique et physique des régions équinoxiales du Nouveau Continent*; impreso; París, Chez F. Schoell, Libraire.

Artículo original

Contenido de nutrientes, acidez y textura del suelo en áreas degradadas por la minería en el Chocó biogeográfico

Nutrient content, acidity, and soil texture in areas degraded by mining in the biogeographic Chocó

Harley Quinto-Mosquera^{1,*}, Gentil Ayala-Vivas², Harry Gutiérrez²

¹ Programa de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Tecnológica del Chocó “Diego Luis Córdoba”, Quibdó, Colombia

² Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingenierías, Universidad Tecnológica del Chocó Diego Luis Córdoba, Quibdó, Colombia

Resumen

La minería es una de las actividades económicas que más destruyen ecosistemas en el Chocó biogeográfico, por lo que se requiere conocer los efectos que esta tiene en las condiciones fisicoquímicas del suelo con miras a su restauración. En ese contexto el objetivo del presente estudio fue evaluar los cambios en las condiciones edáficas de áreas degradadas por la minería a cielo abierto con diferente edad sucesional en la región. Para ello se establecieron cinco parcelas permanentes de 625 y 2.500 m² en áreas con 15 y 30 años de recuperación, respectivamente. Posteriormente, se tomaron muestras compuestas de suelos a 20 cm de profundidad y se determinaron sus contenidos de nutrientes, pH y textura. Se observó que los suelos eran ácidos (pH=4,73), con altos porcentajes de arena, materia orgánica (6,62 %), nitrógeno (N) total (0,34 %), fósforo (P) disponible (28,21 ppm), potasio (K) (0,38 meq/100g) y aluminio (Al) (2,15 meq/100 g), pero con bajas cantidades de calcio (Ca) (2,28 meq/100 g) y magnesio (Mg) (1,37 meq/100 g). La disponibilidad de P y K fue alta en ambas edades sucesionales, en tanto que la materia orgánica, el N total, el Ca, el Mg, la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), el Al, y el porcentaje de arena incrementaron con la sucesión, aunque el pH y la arcilla, disminuyeron. En síntesis, se evidenció un incremento en la disponibilidad de arena y nutrientes, pero también un aumento en la acidez y la toxicidad del Al con la sucesión. Asimismo, se constató que la recuperación de las condiciones fisicoquímicas del suelo en minas está condicionada por el efecto de la materia orgánica y la vegetación.

Palabras claves: Fertilidad edáfica; Limitación de nutrientes; Minería; Porcentaje de arena; Restauración; Suelos tropicales.

Abstract

Mining is one of the economic activities that most destroy ecosystems in the biogeographic Chocó. Therefore, it is necessary to know the effects of mining on the physicochemical conditions of the soil with a view to its restoration. In this context, in the present study, we evaluated the changes in the edaphic conditions of areas degraded by mining with different successional ages in the region. For this, five permanent plots of 625 and 2,500 m² were established in the areas with 15 and 30 years of recovery, respectively. Subsequently, composite soil samples were taken at a depth of 20 cm to determine their nutrient contents, pH, and texture. We found that the soils were acidic (pH = 4.73), with a high percentage of sand, organic matter (OM) (6.62%), total N (0.34%), available P (28.21 ppm), K (0.38 meq/100 g), and Al (2.15 meq/100 g) but with low amounts of Ca (2.28 meq/100g) and Mg (1.37 meq/100 g). Furthermore, the availabilities of P and K were high in both successional ages whereas the OM, total N, Ca, Mg, effective cation exchange capacity (ECEC), Al, and the percentage of sand increased with the succession while the pH and the clay decreased. In summary, an increase in the availability of sand and nutrients was evidenced but also an increase in acidity and Al toxicity with the succession. Likewise, we confirmed that the recovery of the physicochemical conditions of the soil in mines is conditioned by the effect of organic matter and vegetation.

Keywords: Edaphic fertility; Nutrient limitation; Mining; Percentage of sand; Restoration; Tropical soils.

Citación: Quinto-Mosquera H, Ayala-Vivas G, Gutiérrez H. Contenido de nutrientes, acidez y textura del suelo en áreas degradadas por la minería en el Chocó biogeográfico. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):514-528, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1615>

Editor: Carlos Alberto Jaramillo Muñoz

***Correspondencia:**

Harley Quinto-Mosquera;
d-harley.quinto@utch.edu.co

Recibido: 16 de diciembre de 2021

Aceptado: 27 de mayo de 2022

Publicado: 28 de junio de 2022



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

Introducción

En un reciente análisis de las Naciones Unidas sobre el estado de los bosques del mundo, se concluía que la deforestación y la degradación forestal siguen avanzando a un ritmo alarmante (FAO & PNUMA, 2020) y se estimaba que entre el 2015 y el 2020 la tasa promedio de deforestación había sido de 10 millones de hectáreas al año, con la consecuente pérdida de biodiversidad y degradación de ecosistemas (FAO & PNUMA, 2020). Esta tasa de deforestación se considera la principal responsable de la degradación y pérdida de hábitat en las regiones tropicales y como la causa más importante de extinción de especies (Meffe *et al.*, 1994; Groom & Vynne, 2006). Se concluye que la agricultura, la ganadería, la expansión urbana, la tala de árboles y la minería son las principales responsables de la deforestación de bosques tropicales (FAO & PNUMA, 2020).

La minería, en particular, es una de las actividades económicas más degradantes de los ecosistemas naturales (Environmental Law Alliance Worldwide-ELAW, 2010), y afecta de forma importante el funcionamiento del suelo. El suelo residual de las actividades de minería se caracteriza por tener muy baja fertilidad y texturas gruesas, con muy poco contenido de humedad y bajas proporciones de limo, arcillas y materia orgánica debido al proceso de arrastre y deposición hídrica (Chacón, 1992). Asimismo, dado que el suelo queda totalmente expuesto, los nutrientes se pierden fácilmente por lixiviación (ELAW, 2010), situación que acentúa la infertilidad edáfica, dificulta la recuperación vegetal y obstaculiza la restauración ecológica (Holl, 2002; Chazdon, 2003; Pallavicini *et al.*, 2015). En las áreas afectadas por esta actividad se genera un mosaico de comunidades vegetales en distintas edades sucesionales diferenciadas según el tiempo e intensidad de la perturbación (Díaz & Elcoro, 2009).

Para la restauración de las áreas degradadas por la minería es necesario conocer previamente los factores ambientales y biológicos que limitan su sucesión y recuperación (Holl, 2002; Walker *et al.*, 2007; Pallavicini *et al.*, 2015). En tal sentido, Holl (2002) menciona que la recuperación de bosques degradados está determinada principalmente por factores como la vegetación remanente, el microclima, las micorrizas, y las propiedades fisicoquímicas del suelo (Holl, 2002). Específicamente el tipo de suelo, la textura, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes tienen un efecto fundamental en la revegetación de dichas áreas (Holl, 2002; Chazdon, 2003; Walker & del Moral, 2008). Holl (1999) también señaló que el cambio de uso del suelo genera alteraciones en los contenidos edáficos de nutrientes en bosques tropicales, con lo cual se afecta la recuperación de los ecosistemas previamente degradados.

En un análisis realizado hace algunas décadas, Guariguata & Ostertag (2001) reportaron que, después de la pérdida de la cobertura boscosa en los trópicos, se presentan cambios en las condiciones fisicoquímicas del suelo difíciles de generalizar. En tal sentido, se ha observado que la densidad del suelo, el P disponible y la CICE incrementan, en tanto que la porosidad, la materia orgánica, el N total, la biomasa microbiana, y el Al extraíble disminuyen. Por su parte, el pH, el amonio, el nitrato, el Ca, el Mg y el K muestran, en algunos casos, incrementos pero en otros, disminuciones, en tanto que a veces no cambian significativamente, por lo que es complejo generalizar (Werner, 1984; Guariguata & Ostertag, 2001). En síntesis, en los procesos sucesionales las condiciones edáficas, en especial los nutrientes, pueden cambiar con el tiempo, cambios que dependen en gran medida de los tipos de suelos, bosques y perturbaciones, cuya intensidad y tipo constituyen algunos de los factores más preponderantes (Guariguata & Ostertag, 2001), como sucede en los suelos de las áreas previamente degradadas por la minería.

Se ha planteado la hipótesis de que en suelos tropicales en las edades sucesionales iniciales hay una limitación de N debido a su poca fijación biológica y la escasez de plantas leguminosas (Walker, 1993; Davidson *et al.*, 2004). Sin embargo, en la medida en que se presenta una mayor colonización de plantas fijadoras de N y avanza la sucesión, se reduce tal limitación (Cleveland *et al.*, 1999; Walker & del Moral, 2008). A diferencia del N, algunos estudios muestran que los niveles de P en el suelo tienden a ser altos en

los primeros estadios sucesionales y, con el paso del tiempo, disminuye su disponibilidad edáfica, convirtiéndose en una limitación en el ecosistema (Vitousek *et al.*, 2010) debido a las pérdidas por lixiviación e inmovilización en óxidos de hierro (Fe) y Al, especialmente en suelos arcillosos tropicales de baja altitud (Walker & Syers, 1976; Vitousek *et al.*, 1993; Reed *et al.*, 2011), lo cual evidencia una posible relación inversamente proporcional entre la disponibilidad edáfica del P y del N total a lo largo del tiempo de sucesión.

Experimentalmente, Vitousek *et al.* (1993) corroboraron la limitación del crecimiento vegetal por la disponibilidad de N en etapas tempranas de la sucesión primaria, en tanto que el P fue el nutriente limitante en etapas tardías (Vitousek *et al.*, 1993). Sin embargo, los estudios realizados por Li *et al.* (2013) muestran que las concentraciones pH, NH_4N^+ , P disponible y K disminuyen con el tiempo de sucesión, en tanto que la materia orgánica y los micronutrientes (Zn, Fe, Cu, y B) tienden a aumentar (Li *et al.*, 2013). Controversialmente, esto muestra una posible relación directamente proporcional entre el P y N del suelo semejante a lo encontrado en recientes estudios sucesionales (Ahirwal *et al.*, 2021; Sansupa *et al.*, 2021; Semy & Singh, 2021). Por consiguiente, es necesario evaluar no solo las concentraciones de nutrientes, sino también los cambios en sus relaciones estequiométricas como factores determinantes de la fertilidad del suelo, especialmente en áreas degradadas por la minería que requieren elementos técnicos para su restauración.

En regiones de tropicales, como el Chocó biogeográfico, la minería a cielo abierto de oro y platino tiene particular relevancia, pues se destruyen cerca de 360 hectáreas de bosque cada año en la región (IIAP, 2001; Ramírez & Ledezma, 2007; Leal, 2009). Por ello, es necesario evaluar las condiciones edáficas de las áreas degradadas por la minería, más aun si se tiene en cuenta que esta región es una de las más lluviosas del mundo (10.000 mm anuales) (Poveda *et al.*, 2004), y que las altas tasas de pluviosidad tienden a disminuir los contenidos de nutrientes por la lixiviación (Austin & Vitousek, 1998). Esto es particularmente relevante en áreas degradadas por la minería en las que los suelos han sufrido cambios considerables. Por todo ello, en la presente estudio se evaluaron los cambios en el contenido de nutrientes, las relaciones estequiométricas, la acidez y la textura en áreas degradadas por la minería con diferente edad sucesional en la región. Además, se evaluó qué tanto determinan las coberturas vegetales dichos cambios en el suelo para contar con elementos científicos que contribuyan en la restauración de dichas áreas.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se desarrolló en áreas previamente degradadas por la minería aurífera en la región del Chocó biogeográfico, Colombia, específicamente en bosques pluviales tropicales secundarios de diferente edad sucesional en la localidad de Jigualito (5° 06' 01" N - 76° 32' 44" O), municipio de Condoto, subregión del San Juan (Figura 1). En esa localidad la precipitación promedio es de 8.000 mm anuales y tiene una altitud de 70 m y topografía plana. Hace parte de la subregión Central Norte del Chocó biogeográfico, que comprende las cuencas altas de los ríos Atrato y San Juan, en unidades de paisaje de piedemonte y colinas bajas con suelos húmedos de terrazas y un tipo de roca sedimentaria transicional (Poveda *et al.*, 2004). Los bosques de esta localidad son, en su mayoría, secundarios y están en diversas edades de recuperación debido a que en el área ha habido actividades de minería a cielo abierto de oro y platino en distintas décadas, lo que ha generado bosques de diferentes edades sucesionales (Tabla 1).

Los suelos de estos bosques secundarios son ultisoles, pero al ser una zona en la que previamente se desarrollaron actividades mineras, sus suelos se caracterizan por presentar mucho material rocoso y arena (Figura 2). La composición florística arbórea está dominada por especies típicas del bosque pluvial tropical de la región, como *Anthurium formosum*, *Anthurium alatum*, *Philodendron acutatum*, *Cespedesia spathulata*, *Croton chocoanus*, *Glossoloma*, *Tonina fluviatilis*, y familias botánicas como Annonaceae, Areaceae, Asteraceae, Buseraceae, Chrysobalanaceae, Clusiaceae, Cyatheaceae y Melastomataceae.

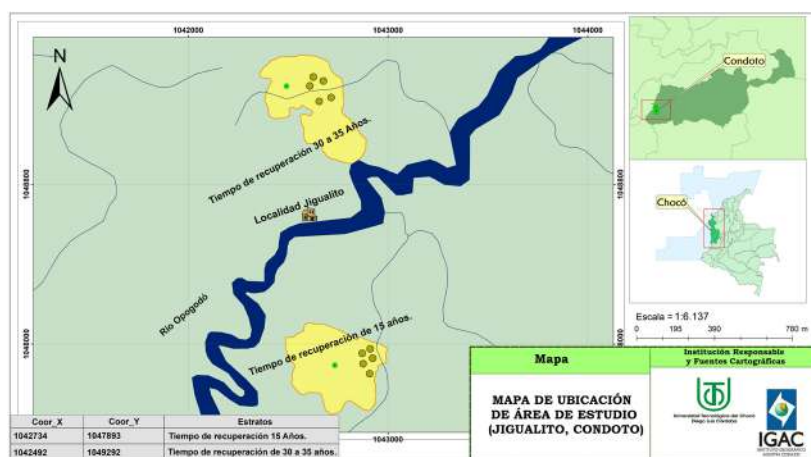


Figura 1. Área de estudio en la localidad de Jigualito, Municipio de Condoto, departamento del Chocó, Colombia

Tabla 1. Características estructurales, ecológicas y edáficas de las áreas degradadas por minería en la localidad de Jigualito, Chocó biogeográfico

Localidades	Jigualito	
Tiempo de sucesión (años)	15	30
Biomasa aérea (toneladas/hectárea)	35,17	56,3
Incremento en biomasa aérea (t/ha/año)	2,34	1,87
Promedio DAP (cm)	5,57	13,89
Altura promedio (m)	7,46	13,44
Riqueza promedio (<i>sp</i> /cuadrante)	5,56	8,68
Abundancia promedio (individuos/cuadrante)	11,12	17,36



Figura 2. Condiciones del suelo en áreas degradadas por minería con diferente edad sucesional en la localidad de Jigualito, Chocó biogeográfico

Diseño experimental

Para evaluar los cambios en las condiciones edáficas en las áreas degradadas con diferentes edades sucesionales, se empleó un diseño estratificado por la edad de sucesión del ecosistema con dos estratos para los muestreos. El estrato 1, edad inicial (EI), incluyó las zonas recientemente degradadas por la minería, con un tiempo de sucesión de 15,5 años expresado como >15 años. Además, este estrato se caracterizó por tener una vegetación arbustiva y leñosa pequeña, con menor biomasa aérea, diámetro promedio y riqueza de especies arbóreas (**Tabla 1**). El estrato 2, edad de recuperación (ER), correspondió a zonas que presentaban un tiempo de recuperación de entre 30 y 35 años, el cual se etiquetó como >30 años. Este estrato se caracterizó por tener una vegetación arbórea con mayor biomasa aérea, diámetro promedio y riqueza de especies (**Tabla 1**). Es importante mencionar que al tener dos variables que cambian (tiempo después del impacto y vegetación), este diseño metodológico tiene la dificultad de que estas se correlacionan entre sí. Puesto que con el paso del tiempo también cambia la vegetación, es difícil diferenciar si los cambios en los parámetros edáficos de los suelos se deben al paso del tiempo o al cambio en el tipo de la vegetación. Por lo tanto, se tomó el tiempo (años) como una variable que integra también los cambios en variables ambientales no evaluadas, como la vegetación.

Establecimiento de parcelas

En el estrato 1 (EI), dado que la vegetación predominante es arbustiva y leñosa pequeña, se establecieron cinco parcelas de 25 x 25 m (625 m²), las cuales se subdividieron en 25 cuadrantes de 5 x 5 m (25 m²) en áreas con antecedentes de actividad minera de más de 15 años de abandono. En este estrato cada mina abandonada se consideró un bloque de muestreo; en total se incluyeron cinco minas en este estrato y en cada bloque se establecieron cinco unidades experimentales permanentes de muestreo. De forma similar, en el estrato 2 (ER), correspondiente a otra área boscosa previamente degradada por la minería, pero con más de 30 años de regeneración, se instalaron cinco parcelas permanentes de 50 x 50 m (2.500 m²) dado que la vegetación es arbórea y arbustiva. Después se establecieron al interior de cada unidad de muestreo 25 cuadrantes de 10 x 10 m (100 m²) que se emplearon como unidades de muestreo, por lo que en ellos se hicieron las mediciones de suelos.

Medición de las características edáficas

En cada una de las unidades se tomaron cinco muestras compuestas de suelo a 20 cm de profundidad en las esquinas y el centro de los cuadrantes de 5 x 5 m y de 10 x 10 m. En total se tomaron 250 muestras compuestas de suelos, 125 en cada estrato sucesional. Las muestras recolectadas se enviaron al laboratorio de biogeoquímica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín en donde se analizó su textura (arena, limo y arcilla), pH, contenido de materia orgánica, Al, CICE y contenido de nutrientes (N, P, K, Ca y Mg) mediante las técnicas las siguientes técnicas: la textura con la técnica de Bouyoucos; el pH en potenciómetro de suelos con agua 1:2; la materia orgánica con la técnica de Walkley y Black y volumetría; el P disponible con ácido L ascórbico en espectrofotómetro UV – VIS; el N total con la técnica analítica micro-Kjeldahl; el Al con KCl 1M/volumetría NTC 5263; los nutrientes (Ca, Mg, K) con el método de acetato de amonio 1N neutro y absorción atómica (**Osorio, 2014**), en tanto que el porcentaje de carbono (C) del suelo se determinó con la ecuación: % C = MO/1.724 (**Vela et al., 2012**).

Análisis estadístico

Para evaluar la variación de las características fisicoquímicas del suelo en función del tiempo de sucesión (>15 años y >30 años), se utilizaron pruebas paramétricas (T-student, TS) y no paramétricas (de Mann-Whitney, MW) según si cumplían los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas de datos y sus residuales evaluados con los estadísticos de Bartlett, Hartley y Kurtosis (entre +2,0 y -2,0). Para determinar las correlaciones lineales y asociaciones entre variables edáficas (pH, materia orgánica, Al, N total, P, K, Ca, Mg, CICE, arena, limo y arcilla) de cada estadio sucesional se emplearon

análisis de componentes principales (ACP) y correlaciones por rangos de Spearman para determinar parches edáficos de mayor o menor fertilidad en cada estrato evaluado. Los análisis se hicieron en el entorno de programación R (**R Core Team**, 2012).

Resultados

En las áreas degradadas por minería a cielo abierto los suelos presentaron altos porcentajes de arena (66,7 %), acidez (pH=4,73), materia orgánica (6,62 %), P disponible (28,21 ppm), N total (0,34 %), K (0,38 meq/100 g) y Al (2,15 meq/100 g), pero bajas cantidades de Ca (2,28 meq/100 g) y Mg (1,37 meq/100 g) (**Tabla 2**). Al comparar los parámetros fisicoquímicos de ambas áreas (>15 y >30 años), se evidenció que los suelos de >15 años presentaron menos materia orgánica (MW=-8,85 p<0,001), N total (MW=-7,11; p<0,001), Mg (MW=-6,93; p<0,001), Ca (MW=-8,29; p<0,001), Al (prueba T= 3,54; p<0,001), CICE (MW=-7,99; p<0,001) y arena (MW=-2,0; p = 0,045) (**Tabla 2, Figuras 3 y 4**). Además, tuvieron un mayor pH (prueba T= 6,39; p<0,001) y arcilla (MW=-3,57; p<0,001), pero similar concentración de P disponible (prueba T= 1,47; p=0,14), K (MW=-1,26; p=0,2) y limo (prueba T= 1,13; p=0,25) (**Tabla 2, Figuras 3 y 4**). En síntesis, al evaluar los cambios en los suelos con el paso tiempo se observó que el P disponible, el K y el limo fueron similares en ambas edades sucesionales, en tanto que las cantidades de materia orgánica, N total, Ca, Mg, CICE, Al y arena aumentaron con la edad (**Figuras 3 y 4**). Por el contrario, el pH y la arcilla disminuyeron (**Figura 4**). En concreto, se encontró un aumento de nutrientes, acidez y disponibilidad de Al con el paso del tiempo de sucesión.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos del suelo en áreas degradadas por minería en la localidad de Jigualito, Chocó biogeográfico

Parámetros fisicoquímicos	Áreas degradadas por minería (promedio de >15 y >30 años)	>15 años de sucesión	>30 años de sucesión
pH	4,73	4,84	4,43
Materia orgánica (%)	6,62	4	13,9
Carbono (%)	3,84	2,32	8,06
Fósforo (ppm)	28,21	26,02	32,09
Nitrógeno total (%)	0,34	0,25	0,58
Aluminio (meq/100 g)	2,15	1,93	2,78
Calcio (meq/100 g)	2,28	1,01	5,8
Magnesio (meq/100 g)	1,37	0,94	2,56
Potasio (meq/100 g)	0,38	0,38	0,36
CICE (meq/100 g)	6,17	4,25	11,51
Saturación de Al (%)	34,85	45,41	24,15
Arena (%)	66,73	65,54	75,85
Limo (%)	22,25	22,76	18,31
Arcilla (%)	11,03	11,7	5,85
Clase textural	Franco arenoso	Franco arenoso	Arenoso franco
Relación C/N	11,29	9,28	13,90
Relación P/N	82,97	104,08	55,33
Relación C/P	0,14	0,09	0,25
Relación Ca/Mg	1,66	1,07	2,27
Relación K/Mg	0,28	0,40	0,14

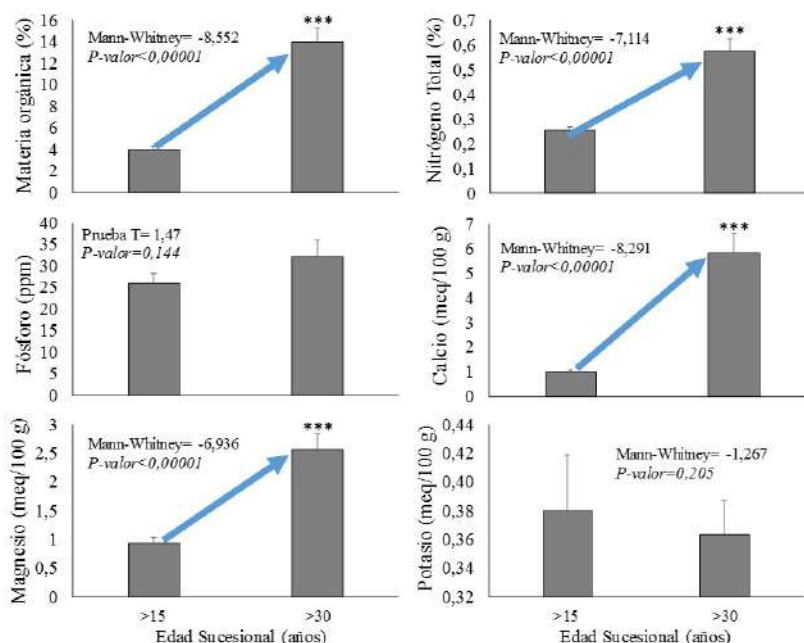


Figura 3. Cambios en los nutrientes del suelo en áreas degradadas por minería con diferente edad sucesional en la localidad de Jigualito, Chocó biogeográfico

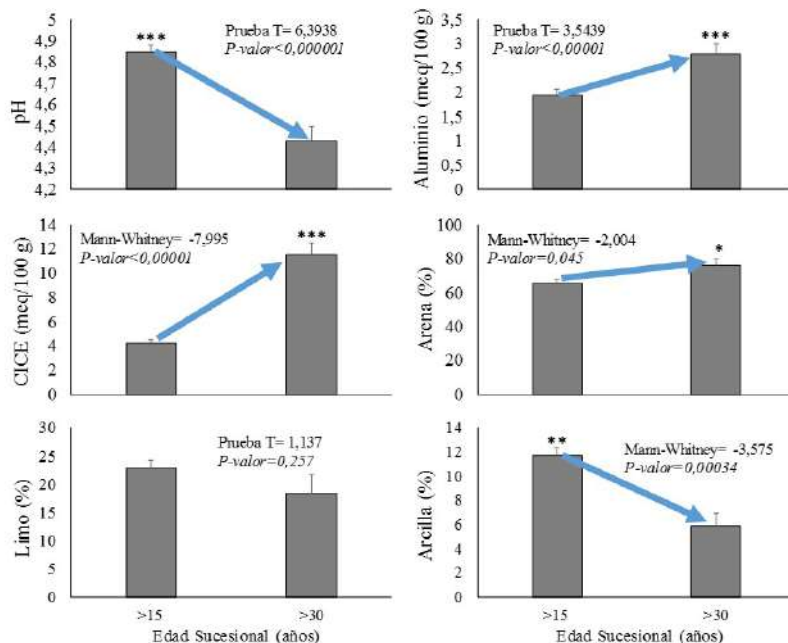


Figura 4. Cambios en los parámetros fisicoquímicos del suelo en áreas degradadas por minería con diferente edad sucesional en la localidad de Jigualito, Chocó biogeográfico

En términos de las relaciones estequiométricas de nutrientes se observó que la saturación de Al disminuyó de 45,41 % en áreas con >15 años de abandono a 24,15 % en zonas mineras de >30 años de recuperación (Tabla 2). Por otra parte, la relación C/N incrementó de 9,28 en áreas con >15 años a 13,9 en zonas con > 30 años de sucesión. Asimismo, las relaciones C/P y Ca/Mg incrementaron con el tiempo, en tanto que las

relaciones de P/N y K/Mg disminuyeron con la edad de sucesión (**Tabla 2**). Mediante el ACP se evidenció que en las áreas degradadas con > 15 años de sucesión hubo asociaciones lineales positivas de variables como la materia orgánica, el Ca, el N total, el K, el Mg y la CICE, formando un primer componente ($C1=38,6\%$; $Eigenvalue=4,64$), mientras que el P y la arena se asociaron de forma inversamente proporcional con la arcilla y limo en un segundo componente ($C2=27,9\%$; $Eigenvalue=3,35$). En las áreas de >30 años las variables de materia orgánica, Ca, N total, K, Mg y CICE se asociaron positivamente formando un componente ($C1=45,1\%$; $Eigenvalue=5,4$), pero el Al y la arena se asociaron de forma inversamente proporcional con el pH, la arcilla y el limo en un segundo componente ($C2=25,7\%$; $Eigenvalue=3,08$) (**Figura 5**).

Discusión

En el presente estudio se evidenciaron cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo de las áreas que han sido afectadas por la minería a cielo abierto; particularmente, se evidenció la pérdida de horizontes orgánicos y superficiales del suelo y, además, un mayor porcentaje de arena (entre 66,7 y 75,8 %), piedras y rocas, lo que coincide con lo reportado en diversos estudios en áreas previamente degradadas por la minería, donde los porcentajes de arena en el suelo aumentaron debido a dicha actividad (**Oktavia et al., 2015; David-Jiraldo, 2017; Wongprom et al., 2020**), lo cual es un retroceso en términos pedogenéticos, pues los suelos de esta región se caracterizan por ser de texturas predominantemente finas (franco arcilloso), ácidos y de baja fertilidad (**Rodríguez, 1989; IGAC, 2006; Quinto & Moreno, 2016**), y con la actividad minera adquieren texturas franco arenosas y arenosas franco, principalmente, con lo que se reduce su capacidad de retener nutrientes debido a los poros de mayor tamaño que facilitan la lixiviación generada por las lluvias (**FAO, 2019**). Esta situación es uno de los factores que posiblemente explica la lenta recuperación de las áreas previamente degradadas por la minería en el Chocó, dado que la precipitación y la consecuente lixiviación son muy altas (**Quinto & Moreno, 2016**) y, por ende, la retención de nutrientes se reduce considerablemente.

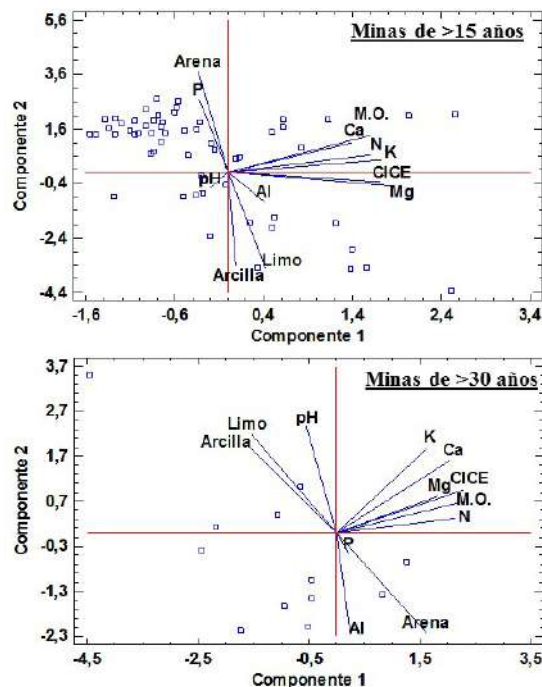


Figura 5. Análisis de componentes principales de los parámetros fisicoquímicos del suelo en áreas degradadas por minería con diferente edad sucesional en la localidad de Jigualito, Chocó biogeográfico

En estudios previos se evidenció que con la minería a cielo abierto el suelo residual tiende a presentar muy baja fertilidad y texturas gruesas, con muy poco contenido de humedad y bajas proporciones de limo, arcillas y materia orgánica, a causa del proceso de arrastre y deposición hídrica (Chacón, 1992; Oktavia *et al.*, 2015; Wongprom *et al.*, 2020). Asimismo, dado que el suelo queda totalmente expuesto, los nutrientes se pierden fácilmente por lixiviación (ELAW, 2010; Wongpro *et al.*, 2020). Esta situación es patente en las minas abandonadas del Chocó, donde los suelos quedaron totalmente expuestos, con texturas gruesas, con muy poco contenido de humedad y bajas proporciones de limo y arcillas, lo cual ha afectado la recuperación del ecosistema en general.

Los suelos del departamento del Chocó son mayoritariamente minerales, poco evolucionados, ácidos y con un lavado intenso de nutrientes por la acción de la precipitación, que supera los 5.000 mm anuales (IGAC, 2006; Quinto & Moreno, 2016). Específicamente, el área en la que se evaluaron los suelos degradados por la minería corresponde a suelos de lomerío infértiles y muy ácidos, que se caracterizan porque se han originado sobre arcillolitas y limolitas (IGAC, 2006). La acidez edáfica de las minas abandonadas es similar a lo registrado previamente en áreas degradadas por la minería en bosques de Indonesia (Oktavia *et al.*, 2015), y en bosques del Chocó biogeográfico. Por ejemplo, Faber-Langendoen & Gentry (1991) registraron un pH de entre 4,0 y 4,6 en los bosques tropicales del Bajo Calima. Asimismo, Quinto & Moreno (2016) evaluaron suelos ácidos en bosques de Pacurita (pH=4,0), Salero (pH=4,8) y Opogodó (pH=5,0), en la misma región geográfica. Por su parte, Copete *et al.* (2019) observaron suelos ácidos en Capurganá (pH=4,97) y Santo Domingo (pH=5,23), así como Ramírez *et al.* (2019), quienes encontraron que tanto los suelos afectados por la minería como los bosques aledaños presentaban acidez, como también quedó registrado en nuestro estudio. Probablemente la acidez registrada en los suelos degradados se debe a factores como la alta precipitación, que promueve la meteorización de rocas ígneas y la liberación de cationes (Ca, Mg, K y Na) (Austin & Vitousek 1998) y su posterior lixiviación, lo que incrementa la acumulación edáfica de iones ácidos (H y Al). Asimismo, el alto contenido de materia orgánica favorece la liberación de ácido carbónico y la fijación biológica del N que libera iones de H, lo que en conjunto produce mayor acidez edáfica (Jenny, 1941; Sadzawka & Campillo, 1993).

El contenido de Al registrado en áreas degradadas por minería fue muy alto, lo que se asemeja a lo reportado en estudios previos en las minas de la región (Ramírez *et al.*, 2019), aunque menor al registrado en suelos del Bajo Calima (Al=4,6-5,7 meq/100 g) (Faber-Langendoen & Gentry, 1991), y mayor a lo registrado en suelos de Salero (0,48 meq/100 g), Opogodó (0,12 meq/100 g), y Pacurita (0,94 meq/100 g) (Quinto & Moreno, 2016) y en ecosistemas boscosos de la región. Estos resultados muestran que la disponibilidad de Al no está directamente determinada por el uso de suelo, en términos de la minería, ni por la presencia de cobertura boscosa y que, al parecer, factores edáficos como la meteorización de rocas tienen un efecto más preponderante (Austin & Vitousek, 1998).

Sin embargo, lo interesante no es solo el contenido de Al, sino su porcentaje de saturación, que en las minas recientemente abandonadas (<15 años) presentó valores muy altos (45,41 %). Esto es preocupante, pues una alta saturación de Al genera toxicidad. En tal sentido, se ha evidenciado que los altos contenidos de Al disminuyen la elongación de las raíces, reducen el crecimiento del tallo, restringen la producción de biomasa, generan desequilibrio de nutrientes, alteran procesos metabólicos y fisiológicos y reducen la productividad del ecosistema (Shetty *et al.*, 2021). Además, la toxicidad por Al genera reducción de la absorción de nutrientes del suelo, clorosis, necrosis, disminución del tamaño de las hojas, estrés nutricional, y reducción de la tasa fotosintética de las plantas (Chandra & Keshavkant, 2021). Esta toxicidad sería la responsable del limitado desarrollo de los ecosistemas en áreas previamente degradadas por la minería en el Chocó biogeográfico. Los datos muestran que esta se reduce con el paso del tiempo, pues en minas con > 30 años, la saturación de Al fue menor, probablemente por la incorporación de materiales orgánicos al suelo que tienen la capacidad de retener estos cationes, por lo que allí la vegetación muestra mayor biomasa, diversidad, estructura y desarrollo ecológico.

El porcentaje de materia orgánica registrado en áreas degradadas por la minería en el Chocó fue alto (6,62 %) y se incrementó con el paso del tiempo. Sin embargo, en estudios previos en áreas degradadas por la minería se ha evidenciado que el contenido de materia orgánica del suelo disminuye drásticamente (**Oktavia et al., 2015; Wongprom et al., 2020**). El hecho de que en áreas degradadas por la minería en el Chocó la materia orgánica sea alta ratifica lo observado en distintos bosques de la región chocoana, en los que también se han encontrado porcentajes altos de esta en el suelo (**Quinto & Moreno, 2016**). Por ejemplo, en los suelos de las localidades de Bajo Calima (13,7 %), Salero (6,7 %), Opogodó (11,9 %), Pacurita (4,1 %) y Jigualito (12,8 %), los valores de materia orgánica evaluados en bosques fueron altos (**Faber-Langendoen & Gentry, 1991; Quinto & Moreno, 2016; Ramírez et al., 2019**). Asimismo, en las minas de Jigualito se evidenció un aumento de materia orgánica con el paso del tiempo (**Ramírez et al., 2019**), similar a lo observado en este estudio. En los estudios de **Wongprom et al. (2020)**, **Ahirwal et al. (2021)**, **Sansupa et al. (2021)** y **Semy & Singh (2021)** también se han reportado incrementos en los contenidos de materia orgánica con el tiempo de sucesión en áreas degradadas por la minería, de forma análoga a lo encontrado en nuestro estudio. Una de las posibles razones de este incremento con la sucesión está relacionada con el aumento en la producción de hojarasca, la productividad primaria neta, el reciclaje de nutrientes, la biomasa aérea de árboles, y la estructura del bosque en cuanto a la sucesión vegetal (**Guariguata & Ostertag, 2001**). Otra razón es que las tasas de descomposición de hojarasca posiblemente son menores que las de producción, que en estos bosques pueden oscilar entre 7,0 y 8,0 t ha año⁻¹ (**Quinto et al., 2007; Quinto et al., 2017**), es decir, que la tasa de adición (producción) es mayor que la de descomposición, lo que genera acumulación de materia orgánica en el suelo (**Bot & Benites – FAO, 2005**). Posiblemente, la alta precipitación afecta la calidad de la hojarasca, reduciendo su contenido de nutrientes (**Santiago et al., 2005**), lo que genera una reducción de la descomposición y explicaría la acumulación de materia orgánica en el suelo. En concreto, se observó que las áreas degradadas recién afectadas (< 15 años) y con menor biomasa aérea arbórea presentaban una adición de materia orgánica mucho menor y menor acumulación en el suelo, en comparación con las áreas degradadas de mayor edad y biomasa aérea.

Es importante mencionar que la acumulación de materia orgánica es fundamental para la fertilidad y la salud del suelo (**David-Jiraldó, 2017**), puesto que esta provee una buena estructura edáfica, representa un suministro continuo de nutrientes, contribuye con el intercambio iónico, es un reservorio de N y otros minerales necesarios para las plantas, ayuda en la formación de agregados estables en el suelo, protege la superficie edáfica, retiene humedad, controla la inmovilización y liberación de nutrientes, y favorece el almacenamiento de carbono del ecosistema (**Ross, 1993; Craswell & Lefroy, 2001**). Además, la materia orgánica es conductora de la actividad biológica del suelo, permite la aireación edáfica, controla el reciclaje de nutrientes, y reduce las pérdidas de minerales por lixiviación (**Bot & Benites – FAO, 2005; Adiaha, 2017**). Por tal razón, es lógico afirmar que su acumulación estaría contribuyendo de forma significativa con la recuperación de las áreas degradadas por la minería en la región del Chocó.

Los cationes básicos (Ca y Mg) presentaron bajos contenidos en áreas degradadas recientemente por la minería a cielo abierto, pero con el paso del tiempo incrementaron su disponibilidad significativamente. Así se ha reportado en otras áreas degradadas por la minería (**Oktavia et al., 2015; Wongprom et al., 2020**). El hecho de presentar bajas concentraciones corrobora lo hallado previamente en la región en distintas investigaciones (**Quinto & Moreno, 2016; Ramírez et al., 2019**). Estas bajas concentraciones de Ca y Mg en suelos del Chocó biogeográfico posiblemente se deben a los altos niveles de precipitación (**Poveda, et al., 2004**), que generan lixiviación y arrastre de nutrientes constantemente (**IGAC, 2006; Austin & Vitousek, 1998; Quinto & Moreno, 2016**). Además, estos minerales (Ca y Mg) aumentaron con el paso del tiempo, a los pocos años (<30 años) en términos sucesionales, como también se ha registrado en minas de bosques tropicales (**Ahirwal et al., 2021; Sansupa et al., 2021; Semy & Singh, 2021**),

y en sucesiones primarias y secundarias (**Guariguata & Ostertag, 2001**). Esta mayor disponibilidad en los contenidos de estos cationes también se debe a la meteorización de las rocas que se presenta en mayor proporción debido a la acción de la minería, pues el subsuelo y las rocas ígneas quedan expuestos, lo que facilita la liberación mineral de nutrientes. Además, otra causa que explica el aumento edáfico de estos minerales está relacionado con la mayor disponibilidad de materia orgánica al transcurrir el tiempo de sucesión (**Guariguata & Ostertag, 2001; Bot & Benites – FAO, 2005**), lo que incrementa el suministro de nutrientes al suelo, incluidos el Ca y Mg. En síntesis, la acción conjunta de la meteorización de rocas, la acumulación de materia orgánica y la minería a cielo abierto explican la mayor parte del aumento de estos nutrientes con el tiempo, en escalas sucesionales breves, en el Chocó.

El contenido edáfico de K fue alto en las áreas degradadas por la minería, lo que posiblemente se debe al hecho de que es un ion mineral muy móvil en los ecosistemas terrestres (**Osorio, 2014**), y las deposiciones provenientes del dosel del bosque por la acción de las lluvias incrementan su disponibilidad (**Quinto & Moreno, 2016**). Asimismo, su disponibilidad edáfica tiende a ser alta en estos ecosistemas probablemente por los suministros constantes provenientes de la meteorización de rocas (**Austin & Vitousek, 1998**) causada, principalmente, por la minería a cielo abierto recientemente realizada en la localidad.

Los contenidos de P disponible y N total en las áreas degradadas por minería fueron altos. La razón de lo primero se relaciona con la acción de la minería sobre el suelo, pues se remueven las rocas, principalmente del tipo apatita, que contienen el P del suelo en sus distintas formas (**Reed et al., 2011**), y por esta acción mecánica y la consecuente meteorización, se incrementa su disponibilidad edáfica. El incremento del N total, por su parte, está relacionado con distintos factores como el aumento en el contenido de materia orgánica del suelo (**Bot & Benites – FAO, 2005**), la colonización de plantas leguminosas que fijan el N (**Cleveland et al., 1999**), y la mayor disponibilidad de P edáfico (**Reed et al., 2011**), que ayudan a incrementar su disponibilidad (**Hedin et al., 2009**).

A pesar de su alto contenido, el P disponible no incrementó su disponibilidad edáfica en la escala relativamente pequeña de tiempo (< 30 años), contrario al comportamiento del N total; en consecuencia, se evidenció que las tendencias del P y el N con la sucesión fueron parcialmente contrarias a lo reportado en otros estudios realizados en minas, en los que estos minerales aumentaron con el tiempo de la sucesión o disminuyeron su contenido en las minas comparadas con los bosques adyacentes, lo que semeja un gradiente sucesional (**Wongprom et al., 2020; Ahirwal et al., 2021; Sansupa et al., 2021; Semy & Singh, 2021**).

Probablemente, el hecho de que el P disponible no mostrara un incremento significativo en sus contenidos edáficos en minas de entre 15 y 30 años, puede estar relacionado con la escala de tiempo evaluada, porque seguramente 30 años no es un tiempo significativo para evidenciar un desarrollo del suelo (**Jenny, 1941**); en efecto, las transformaciones de formas disponibles (biodisponibles) del P a formas no disponibles o inmóviles (ocuidas) requieren escalas temporales mucho mayores, como se ha evidenciado en estudios previos que muestran cómo dichos cambios pueden tener rangos entre los 300 y los 20.000 años de pedogénesis (**Crews et al., 1995**). Asimismo, la poca variación temporal del P disponible indica que, en términos de procesos de pedogénesis, no hubo cambios significativos a nivel edáfico, y ni siquiera se ha formado la cantidad suficiente de arcilla (tipo caolinita) necesaria para la fijación del P en óxidos de Al (AlPO_4) y Fe (FePO_4) (**Reed et al., 2011**). Esta sería, entonces, una de las razones que explicaría por qué el P no cambió sus concentraciones en la escala de tiempo evaluada.

En este sentido, **Walker & Syers (1976)** presentaron un modelo que describe el desarrollo del P en distintas formas (inmovilizado, ocluido, biodisponible, orgánico y total) a través de procesos de formación del suelo (pedogénesis). En dicho modelo se describe que en suelos tropicales como los ultisoles y oxisoles, en las edades tempranas el P se encuentra en mayor proporción en formas biodisponibles (PO_4^{3-}) para las plantas y microorganismos debido a la meteorización de rocas o minerales primarios; posteriormente, en edades intermedias de pedogénesis, el P se encuentra más equitativamente distribuido

entre sus distintas formas, y, finalmente, en edades de mayor desarrollo, se encuentra en su menor concentración (**Walker & Syers, 1976**). Posiblemente en áreas degradadas por la minería la acción mecánica de las retroexcavadoras genera liberación del P en formas biológicamente disponibles como en las edades iniciales de la pedogénesis, lo que también explicaría su alto contenido edáfico en áreas previamente intervenidas por la acción minera en el Chocó biogeográfico. Asimismo, la posterior meteorización de rocas y material parental (**Jenny, 1941**), que tiende a ser mayor debido a la influencia de las altas temperaturas y el clima lluvioso de la región, contribuye a una mayor disponibilidad del P en el suelo.

Al igual que el P disponible, el contenido de N total del suelo fue alto en las áreas degradadas. Entre las posibles razones para ello se pueden mencionar las siguientes: las altas tasas de fijación de N por árboles y arbustos del grupo de las leguminosas (**Cleveland *et al.*, 1999**), en especial de la familia Fabaceae, que están entre las más abundantes, diversas y ampliamente distribuidas en la región chocona (**Rangel & Rivera-Díaz, 2004**); las altas tasas de fijación de N₂ por acción de las bacterias libres en los suelos de la región (**Cleveland *et al.*, 1999**; **Reed *et al.*, 2008**); las tasas de reciclaje de N del ecosistema (**Vitousek, 1984**; **Matson & Vitousek, 1990**); los considerables aportes generados por los porcentajes de materia orgánica de la zona (**Bot & Benites – FAO, 2005**), y la interacción con el P edáfico, que en altas cantidades, regula la fijación de N₂ por parte de las bacterias y leguminosas en el ecosistema (**Reed *et al.*, 2011**), así como la disponibilidad de N total influye en la producción y actividad de la enzima fosfatasa en el suelo (**Treseder & Vitousek, 2001**), enzima que contribuye con la mineralización del P fijado en compuestos edáficos (**Reed *et al.*, 2011**), por lo que se facilita su biodisponibilidad.

El incremento significativo del N total a lo largo del tiempo de recuperación del suelo en áreas degradadas por la minería en la localidad estudiada sigue un patrón similar al descrito en las hipótesis sucesionales, las cuales plantean que en las edades sucesionales iniciales, en los suelos tropicales hay una limitación del N debido a su poca fijación biológica y la escasez de plantas leguminosas (**Walker, 1993**), semejante a lo que ocurre con la actividad minera en la región, pues no quedan árboles que fijen el N₂ atmosférico en el suelo. Según las hipótesis mencionadas, en la medida en que se presenta una mayor colonización de plantas fijadoras de N₂ y avanza la sucesión, se reduce tal limitación (**Cleveland *et al.*, 1999**; **Walker & del Moral, 2008**), como se ha corroborado en las áreas degradadas por minería con 15 y 30 años de recuperación.

Los altos contenidos edáficos de P biodisponible y N total en edades tempranas de la pedogénesis y de la sucesión, muestran que posiblemente estos nutrientes no están limitando aún la productividad primaria neta (PPN) y el funcionamiento del ecosistema. Por el contrario, en estudios realizados en cronosecuencias mediante ensayos de fertilización en bosques lluviosos de Hawái, se evidenció que en suelos de pedogénesis reciente (≈ 300 años) la PPN aérea se vio limitada por el N, en tanto que en suelos de desarrollo intermedio (20,000 años) esta se vio limitada tanto por el N como por el P, y en suelos de mayor desarrollo ($4,1 \times 10^6$ años) por el P disponible (**Vitousek & Farrington, 1997**; **Harrington *et al.*, 2001**). En consecuencia, para poder corroborar la limitación de la PPN y del funcionamiento de los ecosistemas boscosos por el P disponible y el N total en áreas degradadas por la minería, se requiere determinarla mediante mediciones de la PPN, la descomposición y el crecimiento, entre otros, y con ensayos de fertilización en el ecosistema, pues los contenidos de nutrientes del suelo, por sí solos, no permiten evidenciar dicha limitación.

En síntesis, las condiciones edáficas de las áreas degradadas por la minería estudiadas muestran que, según las cantidades de materia orgánica, N total, P disponible, K, Ca, y Mg, los suelos pueden ser fértiles para el desarrollo de la vegetación; sin embargo, las altas concentraciones de Al y la poca concentración de arcilla evidencia que este ecosistema no es favorable para el desarrollo de la vegetación ni para su adecuado funcionamiento. En conclusión, es necesario favorecer el reciclaje de nutrientes y de materia orgánica

que favorece las funciones del suelo, además de corregir la toxicidad debida al Al y, en lo posible, mejorar las condiciones texturales, las cuales requieren un mayor tiempo de desarrollo edáfico.

Agradecimientos

La presente investigación fue financiada con recursos del proyecto titulado “Evaluación del efecto de la fertilización del suelo sobre la producción neta del ecosistema en áreas degradadas por minería, como estrategia para potenciar la captura de carbono y la venta de servicios ambientales en el Chocó Biogeográfico” (Código 1128-852-72243), presentado por la Universidad Tecnológica del Chocó “D.L.C.”, la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, la Universidad de Valladolid (España), el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico “John Von Neumann” – IIAP, y el SENA Chocó, y aprobado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.

Contribución de los autores

HQM: administración del proyecto, experimentación y escritura del manuscrito; GAV: investigación, experimentación y escritura del manuscrito; HG: conceptualización, revisión y escritura del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaramos que no existe conflicto de intereses que pueda afectar la publicación de este estudio.

Referencias

- Adiaha, M. S.** (2017). The role of organic matter in tropical soil productivity. *World Scientific News*, 86(1), 1-58.
- Ahirwal, J., Kumari, S., Singh, A. K., Kumar, A., Maiti, S. K.** (2021). Changes in soil properties and carbon fluxes following afforestation and agriculture in tropical forest. *Ecological Indicators* 123, 107354.
- Austin, A. T. & Vitousek P.M.** (1998). Nutrient dynamics on a precipitation gradient in Hawaii. *Oecologia* 113, 519-529.
- Bot, A. & Benites J. – FAO.** (2005). The importance of soil organic matter Key to drought-resistant soil and sustained food production. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Fao Soils Bulletin 80.
- Chacón, I. E.** (1992). Pequeña y mediana minería aluvional. Oro y diamante. Tomo II. Universidad de Oriente, Núcleo Bolívar. Fundaudo, Ciudad Bolívar. p. 160.
- Chandra, J. & Keshavkant, S.** (2021). Mechanisms underlying the phytotoxicity and genotoxicity of aluminum and their alleviation strategies: A review. *Chemosphere*, 278, 130384.
- Chazdon, R. L.** (2003). Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 6(1), 51-71.
- Cleveland, C. C., Townsend, A. R., Schimel, D. S., Fisher, H., Howarth, R. W., Hedin, L. O., Perakis, S. S., Latty, E. F., Von Fischer, J. C., Elseroad, A., Wasson, M. F.** (1999). Global patterns of terrestrial biological nitrogen (N₂) fixation in natural ecosystems. *Global Biogeochem. Cycles*, 13(2), 623- 645.
- Copete, J. C., Cámara-Leret, R., Sánchez, M., Balslev, H.** (2019). Relación entre la composición florística y los nutrientes del suelo en comunidades de palmas del Chocó biogeográfico en Colombia y Ecuador. *Revista de Biología Tropical*, 67(4), 716-732.
- Craswell, E.T. & Lefroy, R.B.D.** (2001). The role and function of organic matter in tropical soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61, 7-18.
- Crews, T.E., Kitayama, K., Fownes, J.H., Riley, R.H., Herbert, D.A., Mueller-Dombois, D., Vitousek, P.M.** (1995). Changes in soil phosphorus fractions an ecosystem dynamic across a long chronosequence in Hawaii. *Ecology*, 76, 1407-1424.
- Davidson, E.A., de Carvalho, C.J.R. Vieira, I.C.G., Figueiredo, R.D., Moutinho, P., Ishida, F.Y., dos Santos, M.T.P., Guerrero, J.B., Kalif, K., Saba, R. T.** (2004). Nitrogen and phosphorus limitation of biomass growth in a tropical secondary forest. *Ecological Applications*, 14, 150-163.

- David-Jirald, R.D.** (2017). Procesos de degradación de suelos asociados a minería aurífera a cielo abierto, caso de estudio Bajo Cauca Antioqueño. Tesis de Maestría en Geomorfología y Suelos. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Medellín, Colombia.
- Diaz, W.A. & Elcoro, S.** (2009). Plantas colonizadoras en áreas perturbadas por la minería en el Estado Bolívar, Venezuela. *Acta Botánica Venezuela*, 32(2), 453-466.
- Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW).** (2010). Guidebook for Evaluating Mining Project EIAs. 1st Edition. Eugene, OR 97403. U.S.A. p. 122.
- Faber-Langendoen, D. & Gentry, A. H.** (1991). The structure and diversity of rain forests at Bajo Calima, Chocó Region, Western Colombia. *Biotropica*, 23, 2-11.
- FAO & PNUMA.** (2020). El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas. Roma. Italia. FAO. p. 224.
- FAO.** (2019). Textura del suelo. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. p. 18.
- Groom, M. & Vynne, C. H.** (2006). Habitat Degradation and Loss. In Groom, M., G. Meffe, and C. Carroll (Eds). *Principles of Conservation Biology*. Third Edition. Sunderland, Massachusetts. USA. 793 pg.
- Guariguata, M. & R. Ostertag.** (2001). Neotropical secondary forest succession: changes in structural and functional characteristics. *Forest Ecology and Management*, 148, 185-206.
- Harrington, R.A., Fownes, J.H., Vitousek, P. M.** (2001). Production and resource use efficiencies in N and P-limited tropical forests: a comparison of responses to long-term fertilization. *Ecosystems*, 4, 646-657.
- Hedin, L.O., Brookshire, J., D. Menge, Barron. A.R.** (2009). The Nitrogen Paradox in Tropical Forest Ecosystems. *The Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 613-635.
- Holl, K.D.** (1999). Factors limiting tropical rain forest regeneration in abandoned pasture: seed rain, seed germination, microclimate, and soil. *Biotropica*, 31(2), 229-242.
- Holl, K.D.** (2002). Tropical moist forest. In Perrow M.R. & A.J. Davy (Editors). Handbook of ecological restoration. Volume 2. Restoration in Practice. Cambridge University Press. Cambridge. UK. pp. 539-558.
- Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP).** (2001). Informe Técnico Aspectos Mineros en el Chocó. Informe de Proyecto. Quibdó, Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC.** (2006). Chocó Características geográficas. Bogotá. Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 236 p.
- Jenny H.** (1941). Factors of soil formation. McGraw-Hill, New York, NY. p. 281.
- Li, Y., Yang, F., Ou, Y., Zhang, D., Liu, J., Chu, G., Zhang, Y., Otieno, D., Zhou, G.** (2013). Changes in Forest Soil Properties in Different Successional Stages in Lower Tropical China. *PLoS ONE* 8(11), e81359.
- Matson, P. A. & Vitousek P.M.** (1990). Ecosystem approach to a global nitrous oxide budget. *Bioscience*, 40, 667-672.
- Meffe, G. K. & Carroll, C. R.** (1994). Principles of Conservation biology. Sinauer Associates, Inc. Sunderland, Massachusetts. USA. p. 600.
- Osorio, N. W.** (2014). Manejo de nutrientes en suelos del Trópico. Segunda edición. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Medellín, Colombia. p. 416.
- Oktavia, D., Setiadi, Y., Hilwan, I.** (2015). The comparison of soil properties in heath forest and post-tin mined land: Basic for ecosystem restoration. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 124-131.
- Pallavicini, Y., Alday, J.G., Martínez-Ruiz, C.** (2015). Factors affecting herbaceous richness and biomass accumulation patterns of reclaimed coal mines. *Land degradation and Development*, 26, 211-217.
- Poveda, I.C., Rojas, C., Rudas, A., Rangel, O.** (2004). El Chocó biogeográfico: Ambiente Físico. En Rangel, O. (eds.). Colombia Diversidad Biótica IV. El Chocó biogeográfico/Costa Pacífica. Instituto de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 1024 p.
- Quinto, H. & Moreno, F.H.** (2016). Precipitation effects on soil characteristics in tropical rain forests of the Chocó biogeographical region. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 69(1), 7813-7823.
- Quinto, H., & Moreno, F.** (2017). Net primary productivity and edaphic fertility in two pluvial tropical forests in the Chocó biogeographical region of Colombia. *PLoS ONE*, 12(1), e0168211.
- Quinto, H., Ramos, Y. A., Abadía, D.** (2007). Cuantificación de la caída de hojarasca como medida de la productividad primaria neta en un Bosque Pluvial Tropical en Salero, Unión Panamericana, Chocó – Colombia. *Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó*, 26, 28-41.
- R Core Team.** (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

- Ramírez, G., Quinto, H., Vargas-Porras L., Rangel J. O.** (2019). Temporary Effect of Mining on Breathing and on the Physicochemical Conditions of Soil. *Modern Environmental Science and Engineering*, 5(9), 837-848.
- Rangel, J.O. & Rivera-Díaz, O.** (2004). Diversidad y riqueza de espermatófitos en el Chocó biogeográfico. En Rangel, O. (eds.). Colombia Diversidad Biótica IV. El Chocó biogeográfico/ Costa Pacífica. Instituto de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 1024 p.
- Reed, S.C. Townsend, A.R., Taylor, P.G., Cleveland, C.C.** (2011). Phosphorus Cycling in Tropical Forests Growing on Highly Weathered Soils. En E.K. Bunemann *et al.* (eds.), Phosphorus in Action, Soil Biology 26 (p; 339- 369). Berlin, Alemania. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Reed, S.C., Cleveland, C.C., Townsend, A.R.** (2008). Tree species control rates of free-living nitrogen fixation in a tropical rain forest. *Ecology*, 89, 2924-2934.
- Rodríguez, J. C.** (1989). Consideraciones sobre la Biomasa, Composición Química y Dinámica del Bosque Pluvial Tropical de Colinas Bajas. Bajo Calima. Buenaventura, Colombia. Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal. CONIF. Serie Documental N° 16 Bogotá, D.E. – Colombia.
- Ross, S. M.** (1993). Organic matter in tropical soils: current conditions, concerns and prospects for conservation. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 17(3), 265-305.
- Sadzawka R. A. & Campillo, R. R.** (1993). Problemática de la acidez de los suelos de la IX Región. I. Génesis y características del proceso. *Investigación y Progreso Agropecuario Carillanca*, 12(3), 3-7.
- Sansupa, C., Purahong, W., Wubet, T., Tiansawat, P., Pathom-Aree, W., Teaumroong, N., Chantawannakul, P., Buscot, F., Elliott, S., Disayathanoowat, T.** (2021). Soil bacterial communities and their associated functions for forest restoration on a limestone mine in northern Thailand. *PLoS ONE*, 16(4), e0248806.
- Santiago, L.S., Schuur, E.A.G., Silvera, K.** (2005). Nutrient cycling and plant-soil feedbacks along a precipitation gradient in lowland Panama. *Journal of Tropical Ecology*, 21(4), 461-470.
- Semy, K. & Singh, M. R.** (2021). Comparative Assessment on the physico-chemical properties of coal mining affected and non-affected forest soil at Changki, Nagaland. *Indian Journal of Ecology*, 48(1), 36-42.
- Shetty, R., V idya, C.S.N., Prakash, N.B., Lux, A., Vaculik, M.** (2021). Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review. *Science of the Total Environment*, 765(15), 142744.
- Treseder, K. & Vitousek, P.** (2001). Effects of soil nutrient availability on investment in acquisition of N and P in Hawaiian rain forests. *Ecology*, 82, 946-954.
- Vela, G., López-Blanco J., Rodríguez-Gamiño, M.** (2012). Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 77, 18-30.
- Vitousek, P. M.** (1984). Litterfall, Nutrient Cycling and Nutrient Limitation in Tropical Forests. *Ecology*, 65, 285-298.
- Vitousek, P., Porder, S., Houlton, B.Z., Chadwick, O.A.** (2010). Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen–phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 20(1), 5- 15.
- Vitousek, P.M. & Farrington, H.** (1997). Nutrient limitation and soil development: Experimental test of a biogeochemical theory. *Biogeochemistry*, 37, 63-75.
- Vitousek, P.M., Walker, L.R., Whiteaker, L.D., Matson, P. A.** (1993). Nutrient limitations to plant growth during primary succession in Hawaii Volcanoes National Park. *Biogeochemistry*, 23, 197-215.
- Walker L.R. & del Moral. R.** (2008). Lessons from primary succession for restoration of severely damaged habitats. *Applied Vegetation Science*, 12, 55-67.
- Walker, L.R.** (1993). Nitrogen fixers and species replacements in primary succession. In: Miles, J. & Walton, D.W.H. (eds.) Primary succession on land. pp. 249-272. Blackwell, Oxford, UK.
- Walker, L.R., Walker, J., Hobbs, R.J.** (2007). Linking restoration and ecological succession. Springer, New York, NY, USA.
- Walker, T.W. & Syers, J. K.** (1976). The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 15, 1-19.
- Werner, P.** (1984). Changes in soil properties during tropical wet forest succession in Costa Rica. *Biotropica*, 16(1), 43-50.
- Wongprom, J., Poolsiri, R., Diloksumpun S., & Ngernsaengsaruy, C.** (2020). Soil properties and tree composition in a 27-year old *Acacia mangium* Willd. Plantation on abandoned mining area at Phangnga forestry research station. *Biotropica*, 27, 125-133.

Artículo original

Estimación y pronóstico de radiación solar en el valle de Aburrá – Colombia

Estimation and forecast of solar radiation in the Aburrá Valley- Colombia

✉ Luisa M. Cano, M. Alejandra Carmona, ✉ J. Alejandro Martínez, ✉ Paola A. Arias

Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA), Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Resumen

El diagnóstico y pronóstico de la irradiancia solar en superficie son elementos importantes para el aprovechamiento del recurso solar. En este estudio se evaluó el desempeño del reanálisis ERA5, las estimaciones satelitales del GOES16 y los pronósticos del *Weather Research and Forecasting model* (WRF) mediante mediciones en un sitio en el Valle de Aburrá. El análisis se concentró en los ciclos diurnos, el comportamiento estacional y las variaciones interanuales de las estimaciones de irradiancia solar en superficie y energía acumulada diaria. En general, el reanálisis produjo estimaciones más cercanas a las observaciones que los datos derivados del GOES16. A escala diaria, el ERA5 presentó menores sesgos (entre 0,01 y 1,05 kWh/) que las estimaciones del GOES16 (entre -1,23 y 1,07 kWh/). Las estimaciones del ERA5 evidenciaron que la radiación solar fue mayor durante los eventos de El Niño, especialmente en la temporada de diciembre-enero-febrero, con un aumento promedio del 10 % con respecto a las condiciones neutrales o de La Niña. Por otra parte, los pronósticos del WRF exhibieron errores de sesgo medio (MBE) de alrededor del 20 % y errores cuadráticos medios (RMSE) de alrededor del 50 %, semejantes a los de otros estudios. Los análisis de correlaciones mostraron, además, que el WRF puede representar de forma adecuada las variaciones horarias y diarias de la radiación, con correlaciones entre 0,86 y 0,81, respectivamente. Tanto en las estimaciones para el diagnóstico del ERA5 y del GOES16, como en los pronósticos del WRF, los mayores errores se encontraron en días y temporadas de mayor nubosidad y lluvias.

Palabras claves: Recurso solar; Reanálisis ERA5; Satélite GOES16; Pronóstico; *Weather Research Forecasting* (WRF).

Abstract

The diagnostic and forecast of the surface solar irradiance are important elements for the harnessing of solar energy. By validating against in situ measurements, this study assessed the skill of the ERA5 reanalysis, the GOES16 satellite estimates, and the forecasts from the Weather Research and Forecasting model (WRF) for a site in the Aburrá Valley. The analysis focuses on the diurnal cycle, the seasonal behavior, and the inter-annual variations of the estimates of surface solar irradiance and daily accumulated energy. In general, the reanalysis yielded estimates closer to the observations compared to GOES16. At the daily scale, ERA5 exhibited smaller biases (0.01 to 1.05 kWh/) than the GOES16 estimates (-1.23 to 1.07 kWh/). The ERA5 estimates showed that the solar radiation was higher during El Niño events, especially during the December-January-February season, with an average increase of about 10% compared to the neutral and La Niña conditions. On the other hand, similar to other studies, the WRF forecasts exhibited mean bias errors (MBE) of around 20%, and root mean squared errors (RMSE) of about 50%. Furthermore, the correlation analysis showed that the WRF correctly represents the hourly and day to day variations of solar irradiance with correlation values of around 0.86 and 0.81, respectively. Both the diagnostic estimates from ERA5 and GOES16, as well as the WRF forecasts, showed the largest biases during cloudy and rainy days and seasons.

Keywords: Solar resource; ERA5 reanalysis; GOES-16 satellite; Forecasting; Weather Research and Forecasting model (WRF)

Citación: Cano LM, Carmona MA, Martínez JA, Arias PA. Estimación y pronóstico de radiación solar en el valle de Aburrá – Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):529-549, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1576>

Editor: José Daniel Pabón Caicedo

***Correspondencia:**

Luisa M. Cano Uribe;
luisa.canou@udea.edu.co

Recibido: 8 de noviembre de 2021

Aceptado: 2 de junio de 2022

Publicado: 28 de junio de 2022



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

Introducción

La radiación solar, entendida como la energía emitida por el sol mediante ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz, determina la dinámica de procesos atmosféricos y climáticos a diferentes escalas espaciales y constituye una fuente alternativa para la generación de electricidad (**IDEAM**, s.f). En Colombia la disponibilidad del recurso solar tiene un promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh/ y en algunas zonas, como la península de La Guajira y la Orinoquia, puede alcanzar los 6,0 kWh/, valores superiores a los registrados en países referentes en la implementación de sistemas de energía fotovoltaica como Alemania y España (**Vanegas et al.**, 2015), lo que está determinado por la ubicación de Colombia en la región ecuatorial, donde los niveles de radiación son relativamente constantes a lo largo del año (**Checa & De la Cruz**, 2015).

Sin embargo, el sector eléctrico del país se basa principalmente en la generación hidroeléctrica y en el uso de recursos primarios de origen fósil, en tanto que la participación de las energías renovables no convencionales es mínima, pese al potencial que tiene el país en recurso solar y eólico (**Henao et al.**, 2019). Esta poca diversidad en la generación de energía fomenta, a su vez, la vulnerabilidad del sector eléctrico frente al carácter finito de los combustibles fósiles y a los periodos secos asociados con el fenómeno climático El Niño-Oscilación del Sur (*El Niño-Southern Oscillation*, ENSO) (**Henao et al.**, 2020). Otra debilidad del sector eléctrico de Colombia radica en que el 52 % del territorio del país pertenece a las zonas no interconectadas (ZNI), que no tienen acceso a un servicio de energía eléctrica constante y de calidad a través de un sistema interconectado debido a los costos y a los impactos ambientales que tendría la instalación de la infraestructura necesaria, pero que cuentan con soluciones locales, generalmente a partir de combustibles líquidos (**Superservicios**, 2017). Esto afecta directamente la calidad de vida de las personas, ya que se restringen las horas con acceso a energía con la consecuente disminución de las oportunidades de educación, la productividad y el acceso a las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), lo que perpetúa, a su vez, la desigualdad regional en el país (**Bustos et al.**, 2014).

En este sentido, es necesario buscar alternativas que garanticen la generación, el transporte y el consumo de recursos energéticos, con el fin de asegurar la estabilidad económica, el suministro en la totalidad del territorio, la equidad social y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático. En este contexto, en distintas zonas del país existe una variedad de recursos renovables con capacidad de ser transformados en energía, entre los cuales el recurso solar es de gran importancia, ya que la tecnología fotovoltaica para la producción de energía solar permite hacer instalaciones que alimentan sistemas alejados de la red de distribución, generan bajas emisiones de gases de efecto invernadero durante la operación y tienen costos de fabricación decrecientes con tecnología mejorada y eficiente (**UPME**, 2015, **Cuervo & Méndez**, 2011).

El recurso solar, sin embargo, se comporta de forma variable e impredecible (**Ren et al.**, 2019), por lo que su aprovechamiento en sistemas de energía renovable requiere de un conocimiento profundo de la distribución espaciotemporal, así como de los niveles de intensidad de la radiación solar sobre la superficie de un lugar determinado, lo que a su vez implica un reto, dada la escasez de información derivada de mediciones en superficie (**Lohmann et al.**, 2016). El pronóstico de la radiación solar es, asimismo, un elemento esencial en la gestión y planificación del recurso, necesario para mitigar el posible impacto de la variabilidad de la energía generada por radiación solar que provoca cambios en las plantas de producción y afecta la infraestructura eléctrica (**Aryaputera et al.**, 2015, **Urrego-Ortíz et al.**, 2019). En este sentido, contar con modelos adecuados para el pronóstico de la radiación solar a partir de los datos disponibles es de vital importancia para los estudios de planificación energética.

La poca disponibilidad de mediciones locales de radiación solar con coberturas temporales extensas y continuas ha hecho que el uso de datos derivados de reanálisis y satélites se consolide como una práctica común para la estimación del recurso solar. Son

varios los estudios en que se han empleado bases de datos derivadas de los reanálisis para estimar y evaluar la energía solar (Boilley & Wald, 2015, Zhang *et al.*, 2020, Ramírez-Camargo & Schmidt, 2020). Se ha encontrado que las estimaciones de radiación solar provenientes del reanálisis ERA5 del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Mediano Plazo (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, ECMWF) son de utilidad cuando no se dispone de series de tiempo más robustas como las provenientes de mediciones *in situ* o satélites (Urraca *et al.*, 2018). No obstante, con el reanálisis se han observado sobreestimaciones, principalmente en condiciones de cielos nublados o en áreas con alta variabilidad de radiación solar superficial (Babar *et al.*, 2019, Sianturi *et al.*, 2020, Urraca *et al.*, 2018). Por su parte, los datos satelitales geoestacionarios se emplean más en la evaluación de la energía solar, pues presentan resoluciones espacio-temporales más altas que permiten capturar la variabilidad de la radiación solar en superficie de forma más precisa que los reanálisis (Ramírez-Camargo & Schmidt, 2020, Jiang *et al.*, 2019) mediante múltiples sensores que miden los parámetros que influyen en la cantidad de radiación solar en la superficie terrestre, entre ellos el ozono, el vapor de agua y los aerosoles (Yeom *et al.*, 2019). Sin embargo, tienen cobertura espacial limitada como consecuencia de su localización sobre el ecuador y se pueden presentar errores considerables en cielos cubiertos (Ameen *et al.*, 2018, Laszlo *et al.*, 2020, Xia *et al.*, 2017).

Se han elaborado diferentes modelos para la predicción de la radiación solar: los métodos estadísticos, los modelos numéricos de predicción meteorológica (*numerical weather prediction*, NWP), los modelos basados en imágenes satelitales y los híbridos que combinan diferentes modelos. Entre los NWP se encuentra el modelo de *Weather Research and Forecasting* (WRF), el cual ha sido ampliamente utilizado para pronosticar las variables meteorológicas asociadas a la producción fotovoltaica con una antelación hasta de 72 horas (Olarte, 2017). Este modelo ha demostrado una capacidad considerable para el cálculo de la radiación solar, pero también una marcada dependencia de la cobertura de las nubes, pues entrega resultados más precisos para cielos despejados, lo que refleja su capacidad limitada para pronosticar adecuadamente las condiciones nubladas (Lara *et al.*, 2012).

En Colombia se han venido adelantando investigaciones sobre el recurso solar. Por ejemplo, Henao *et al.* (2020) analizan el nivel de complementariedad entre energías renovables en Colombia a escalas anuales e interanuales. Entre sus resultados se destaca cómo los recursos solares y eólicos en la Costa Caribe y las regiones de los Andes centrales pueden ser un complemento del sector eléctrico durante las estaciones secas del ciclo climatológico anual y durante los eventos ENSO, tanto en su fase cálida como en su fase fría. Por otra parte, en el Atlas de Radiación Solar de Colombia (IDEAM, 2017) se presentan datos, mapas y análisis sobre la radiación solar en las diferentes zonas del país que representan una herramienta esencial para determinar la energía solar disponible en el territorio, principalmente, en lugares alejados de las redes de transporte y distribución de energía eléctrica.

Este estudio tuvo dos objetivos. En primer lugar, se estudió la estimación del recurso solar en el Valle de Aburrá a partir de diferentes bases de datos cuantificando las discrepancias entre los datos de los reanálisis y los satélites y las observaciones *in situ* en diferentes escalas temporales. El segundo objetivo consistió en estudiar el desempeño de un modelo de pronóstico meteorológico en la predicción de la radiación solar incidente en el Valle de Aburrá. A través de la evaluación sistemática de errores en la estimación y el pronóstico del recurso solar en un contexto concreto, se buscó contribuir con información y métodos relevantes a las tareas de dimensionamiento y gestión en la implementación de nuevos proyectos de energía solar.

Datos y métodos

Área de estudio

El área de estudio incluyó todo el Valle de Aburrá, el cual se localiza en la cordillera Central de Colombia entre las coordenadas 6°N y 6,5°N – 75,3°W y 75,6°W, específicamente en el

centro-sur del departamento de Antioquia. Este valle está conformado por 10 municipios: Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, Envigado, Itagüí, Sabaneta, La Estrella y Caldas, que, en total, cubren un área de 1.152 K, es decir, el 1,8 % de la extensión de Antioquia. Tiene una población de aproximadamente 3,72 millones de personas, es decir, el 62 % de la población del departamento (DANE, 2020).

El Valle de Aburrá es un valle estrecho de aproximadamente 64 km de longitud y el ancho de sus secciones oscila entre 3 km y 18,2 km, aproximadamente (Herrera-Mejía & Hoyos, 2019). Presenta una topografía compleja, con elevaciones que van desde los 1.300 m s.n.m. hasta aproximadamente los 3.000. Según estudios anteriores, el ciclo medio anual de la precipitación sobre la región andina colombiana, incluido el Valle de Aburrá, exhibe un comportamiento bimodal como consecuencia del doble paso de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) sobre la región (Bedoya-Soto *et al.*, 2019; Mesa *et al.*, 2000; Poveda *et al.*, 2004). Los máximos de precipitación ocurren en abril-mayo y octubre-noviembre, cuando la ZCIT pasa por Colombia en su desplazamiento hacia sus posiciones más septentrional y meridional, respectivamente, en dirección al hemisferio que se encuentra en verano. El ciclo diario de la precipitación en el Valle de Aburrá tiene un carácter bimodal, cuyos máximos ocurren en las tardes y alrededor de la medianoche (Poveda *et al.*, 2005).

Datos

Con el fin de analizar los comportamientos típicos y la variabilidad temporal del recurso solar en el Valle de Aburrá, se usaron tres conjuntos de datos correspondientes a las mediciones en superficie a través de piranómetros del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), a las estimaciones del reanálisis ERA5, y a los datos satelitales derivados del GOES16. Además, se estudiaron los pronósticos provenientes de simulaciones obtenidas con el modelo WRF. Para todos los conjuntos de datos se consideró la información de la radiación solar descendente en superficie, que comprende tanto la componente directa como la difusa.

Mediciones *in situ*

Se emplearon los datos *in situ* de la radiación solar en superficie expresada en unidades de W/ provenientes del SIATA. Actualmente el SIATA cuenta con una red de sensores en superficie que integra cinco piranómetros ubicados en las estaciones Torre SIATA (Medellín), Concejo de Itagüí (Itagüí), Institución Educativa Joaquín Vallejo (Medellín), Parque de las Aguas (Barbosa) y AMVA (Medellín). Los datos se encuentran disponibles en el portal de Internet de la institución (<https://siata.gov.co/>), con una resolución temporal de un (1) minuto. En el presente estudio se seleccionó el piranómetro de la estación Torre SIATA, ubicado en la latitud 6,2593° y la longitud -75,5887°, ya que tiene información disponible desde el 9 de marzo del 2017 hasta el presente y es la serie de tiempo más extensa de radiación solar (Tabla 1) (Anexo). Se estudiaron los datos de cuatro años calendario comprendidos entre el 1 de enero del 2017 y el 31 de diciembre del 2020 para caracterizar el recurso solar y evaluar el desempeño del reanálisis ERA5. Para la comparación con las estimaciones del GOES16, se usaron los datos desde enero del 2018, fecha de inicio de las estimaciones del satélite. Para la evaluación del modelo WRF se emplearon los datos entre marzo del 2019 y enero del 2021.

Tabla 1. Detalles de la resolución temporal y periodos de estudio empleados para la evaluación de cada conjunto de datos

Conjunto de datos	Resolución temporal	Horario de cobertura (LT)	Periodo de estudio
ERA5	1 hora	7:00 - 18:00	2017-2020 1979-2020
GOES16	1 hora	8:00 - 16:00	2018- 2020
WRF	15 minutos	6:00 - 18:00	2019 2020-2021

Producto ABI L2 + DSR del GOES16

El producto ABI L2 + DSR del GOES16 proporciona datos sobre la radiación solar de onda corta descendente (*downward shortwave radiation*, DSR) en la superficie terrestre y representa los flujos instantáneos de dicha variable en un tiempo de observación dado. Los datos de este producto se generan con una frecuencia temporal horaria y una resolución espacial que depende del dominio seleccionado (FD, CONUS o MESO). En este estudio se emplearon los datos de DSR para el dominio de disco completo (FD), los cuales tienen una cobertura casi completa del hemisferio occidental, con una resolución espacial de 50 km (Laszlo *et al.*, 2020).

Laszlo *et al.* (2020) plantean que la calidad de los datos de este producto depende de la ubicación y de si la medición se realiza bajo condiciones de cielo cubierto o despejado. No obstante, la calidad general es aceptable y para su uso operativo se dispuso de los datos desde el 23 de octubre de 2018, incluyendo la información desde enero del 2018 hasta el presente. Estas mediciones se encuentran disponibles, principalmente, para el rango horario comprendido entre las 8:00 hora local (LT) y las 16:00 LT. Los datos se descargan a través de CLASS (<https://www.avl.class.noaa.gov/saa/products/welcome>) y AIRS (<https://www.ncdc.noaa.gov/airs-web/search>), dos plataformas que permiten el acceso directo a los datos del Centro Nacional de Información Ambiental (*National Centers for Environmental Information*, NCEI) de la NOAA. Para evaluar el desempeño del producto ABI L2 + DSR de GOES16, se empleó información desde el inicio de las estimaciones del GOES16, en enero del 2018, hasta diciembre del 2020.

Reanálisis ERA5

El conjunto de datos del reanálisis ERA5 (Hershbach *et al.*, 2020) abarca el período desde 1950 hasta el presente, aclarándose que la información entre 1950 y 1978 es una extensión posterior y que, a partir de 1979, los datos corresponden a una versión final con un mayor uso de observaciones. La información se encuentra disponible en el servidor de *Climate Data Store* (<https://cds.climate.copernicus.eu>), con una frecuencia temporal de 1 hora y un rango espacial de 0,25° x 0,25°. En este estudio se emplearon datos de la variable de flujo promedio de radiación de onda corta descendente en superficie expresada en unidades de W/. Para la evaluación del desempeño del reanálisis en la representación de la radiación solar, se descargaron promedios horarios desde enero del 2017 hasta diciembre del 2020, así como los datos de los ciclos diurnos mensuales entre 1979 y el 2020, con el fin de analizar algunos aspectos climatológicos de la radiación solar en superficie y los posibles efectos de los eventos ENSO en ella.

Simulaciones con el WRF

Para la evaluación del uso del modelo WRF en el pronóstico de irradiancia solar en superficie, se utilizaron pronósticos para un dominio exterior que incluía todo el territorio de Colombia, con un tamaño de celda de 12 km, y para uno interior que incluía el departamento de Antioquia, con un tamaño de celda de 4 km (Figura 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1576/3232>). Los datos evaluados corresponden a los resultados del dominio interno almacenados con una frecuencia de 15 minutos. Para el estudio se emplearon simulaciones con horizontes de 24 y 48 horas. El periodo de estudio comprendió 138 días de simulaciones de 24 horas entre marzo y noviembre del 2019. Estos pronósticos comenzaban a las 6 UTC (1:00 hora local (LT)) y terminaban a las 6 UTC del día siguiente; se evaluaron los datos correspondientes al periodo entre las 6:00 LT y las 18:00 LT (es decir, con un *spin-up* de 6 horas). Las simulaciones mencionadas se compararon con un modelo de persistencia, es decir, la suposición de que los valores para el día siguiente corresponden a los valores del presente. Todos los datos utilizados para el modelo de persistencia se tomaron del piranómetro de Torre SIATA. Debido a la cantidad de datos faltantes no fue posible estudiar la persistencia en los 138 días de simulaciones sino en 124.

Por otra parte, se estudiaron 294 pronósticos de 48 horas realizados para días diferentes entre marzo del 2020 y enero del 2021. Los pronósticos iniciaban a la 00 UTC (19:00 LT del día anterior) y corrían por 54 horas; como los pronósticos de radiación se consideraron desde las 7:00 LT, el *spin-up* del modelo fue de 12 horas. La diferencia de tiempo del *spin-up* entre ambos conjuntos de simulaciones (6 horas *Vs.* 12 horas) permitió hacer algunas inferencias cualitativas sobre el papel del tiempo de inicialización en el pronóstico de la radiación. El estudio de las simulaciones de 48 horas se dividió en dos partes: se analizaron primero las horas de sol del primer día (D1-WRF) y por separado se estudiaron las horas de sol del segundo día pronosticado (D2-WRF). Las simulaciones de 48 horas también se compararon con modelos de persistencia. Las horas de sol del primer día se compararon con un modelo de persistencia que también suponía que la irradiancia del presente correspondía a la de las 24 horas anteriores (Persistencia D1), en tanto que las horas de sol del segundo día se compararon con un modelo de persistencia que suponía que la irradiancia del presente correspondía a la de las 48 horas previas (Persistencia D2).

Procesamiento de los datos

El procesamiento de los datos derivados del piranómetro de la estación Torre SIATA se inició con un control de calidad consistente en reemplazar con un valor faltante aquellos datos de calidad inválida o dudosa siguiendo los criterios de validación de los datos del SIATA. Teniendo en cuenta que la resolución temporal de las mediciones de Torre SIATA difiere de las correspondientes a los conjuntos de datos provenientes de las simulaciones de WRF, del reanálisis ERA5 y del satélite GOES16, todos los conjuntos de datos se llevaron a una misma resolución temporal de 1 hora para una adecuada comparación. Cabe destacar que cuando el porcentaje de datos faltantes del SIATA excedía el 10 %, el promedio para esa hora se definía como un valor faltante. Según la disponibilidad de los datos, se estableció un rango horario y un periodo de estudio para cada conjunto, como se ve en la **tabla 1**. Es importante destacar que para la validación de las estimaciones del GOES16 entre el 2018 y el 2020, los datos del SIATA se llevaron a escala horaria al ponderar los primeros 10 minutos de cada hora, siguiendo los tiempos de cobertura proporcionados por los metadatos de los archivos de radiación solar derivados del satélite. Para efectos prácticos, los datos del SIATA usados para la evaluación del GOES16 se denotan en adelante como “SIATA 10-min”.

En primera instancia se seleccionó la cuadrícula que contenía la ubicación del piranómetro empleado y se encontró que para el ERA5, esta correspondía al píxel con centroide en la longitud $-75,5^\circ$ y la latitud $6,25^\circ$, en tanto que para el GOES16, el píxel se centraba en la longitud $-75,75^\circ$ y la latitud $6,25^\circ$. Con los datos del GOES16 se realizó, además, el procedimiento explicado con detalle en el estudio de **Robledo-Delgado (2020)**, que consiste en controlar la calidad de los datos al reemplazar por un valor faltante aquellos de calidad degradada o inválida, los cuales correspondían a un 8,85 % del total de los datos del período de estudio.

Métricas de error

Se usaron tres métricas de error: la desviación media del error (MBE), el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación de Pearson (r) que, como se mencionó anteriormente, son métricas comúnmente usadas en estudios de evaluación del recurso solar.

Error de sesgo medio (MBE)

Es el promedio de la diferencia entre lo pronosticado por el modelo WRF y lo observado en los registros del SIATA, de modo que los valores positivos de la métrica representan sobreestimaciones de las observaciones medidas, en tanto que los valores negativos representan su subestimación (**Porrini, 2017**):

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (I_{MODELO,i} - I_{SIATA,i}) \quad \frac{W}{m^2}, \quad \text{Ec.1}$$

donde, n es el número de datos, I_{MODELO} es el valor estimado de irradiancia y I_{SIATA} corresponde al valor observado de irradiancia. Para comparar el tamaño del MBE con respecto al valor típico de las observaciones también se cuantificó el MBE normalizado (nMBE):

$$nMBE = \frac{MBE}{\bar{I}_{SIATA}} \quad \% \quad \text{Ec.2.}$$

Error cuadrático medio (RMSE)

El error cuadrático medio es la raíz cuadrada de las diferencias cuadráticas entre los valores estimados por el modelo WRF y los valores medidos *in situ* del SIATA. Esta medida es sensible a valores extremos, lo que permite detectar claramente los cambios repentinos de la radiación en las series de tiempo evaluadas; además, es una medida usada frecuentemente para evaluar la precisión de los pronósticos (Porrini, 2017).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (I_{MODELO,i} - I_{SIATA,i})^2} \quad W/m^2 \quad \text{Ec.3.}$$

Para comparar el tamaño del RMSE con respecto al valor típico de las observaciones, se calculó el valor de RMSE normalizado:

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{I}_{SIATA}} \quad \% \quad \text{Ec.4.}$$

Coficiente de correlación de Pearson (r)

El coeficiente de correlación de Pearson (r) mide el grado de covariación entre dos variables (Wilks, 2006); se obtiene dividiendo la covarianza de las dos variables por el producto de sus desviaciones estándar. El coeficiente de correlación se empleó en este estudio para cuantificar la covarianza entre los valores horarios de las observaciones del SIATA y los pronósticos (WRF y persistencia), con el fin de evaluar el desempeño del modelo en la representación de las variaciones de la radiación durante el día. Análogamente, se cuantificó el coeficiente de correlación de promedios diarios de la radiación del SIATA y de los pronósticos (WRF y persistencia) para evaluar el desempeño del modelo al representar variaciones entre diferentes días.

$$r_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(I_{MODELO,i} - \bar{I}_{MODELO})(I_{SIATA,i} - \bar{I}_{SIATA,i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_{MODELO,i} - \bar{I}_{MODELO})^2 \sum_{i=1}^n (I_{SIATA,i} - \bar{I}_{SIATA,i})^2}} \quad \text{Ec.5.}$$

Análisis de información observacional, satelital y de reanálisis

Análisis del ciclo diurno. La **figura 1a** muestra la evolución mensual del ciclo diurno promedio de irradiancia solar en superficie obtenido a partir de los valores registrados por el piranómetro de la estación Torre SIATA entre el 2017 y el 2020. A escala mensual, se observa que los valores de radiación solar en el lugar de estudio exhibieron un comportamiento bimodal marcado a lo largo del año, caracterizado por dos temporadas de valores altos correspondientes a los trimestres de diciembre-enero-febrero (DEF) y junio-julio-agosto (JJA), y por dos temporadas de valores bajos en los trimestres de marzo-abril-mayo (MAM) y septiembre-octubre-noviembre (SON). Además, se observa que los meses que en promedio registraron mayores valores de irradiancia solar fueron febrero ($469,28 \text{ W/m}^2$), julio ($467,59 \text{ W/m}^2$) y agosto ($472,44 \text{ W/m}^2$), en tanto que los meses con menores promedios multianuales fueron abril ($406,96 \text{ W/m}^2$), mayo ($398,21 \text{ W/m}^2$) y noviembre ($393,89 \text{ W/m}^2$). A escala diurna, en la **figura 1-a** se observa que los valores promedios máximos de radiación solar horaria se presentaron al mediodía, alcanzando las mayores magnitudes en febrero (823 W/m^2), julio (792 W/m^2) y agosto (826 W/m^2). En términos generales, se ve que a lo largo del año los valores de irradiancia solar se extendieron de forma más o menos simétrica alrededor del mediodía, formando una franja aproximadamente uniforme para las horas de insolación comprendida entre las 7:00 LT y las 18:00 LT. Aunque la franja horaria de insolación no varió abruptamente durante el año, pues el Valle de Aburrá se encuentra ubicado en la región tropical y su estacionalidad es leve en comparación con las zonas externas a los trópicos, es posible evidenciar ciertos

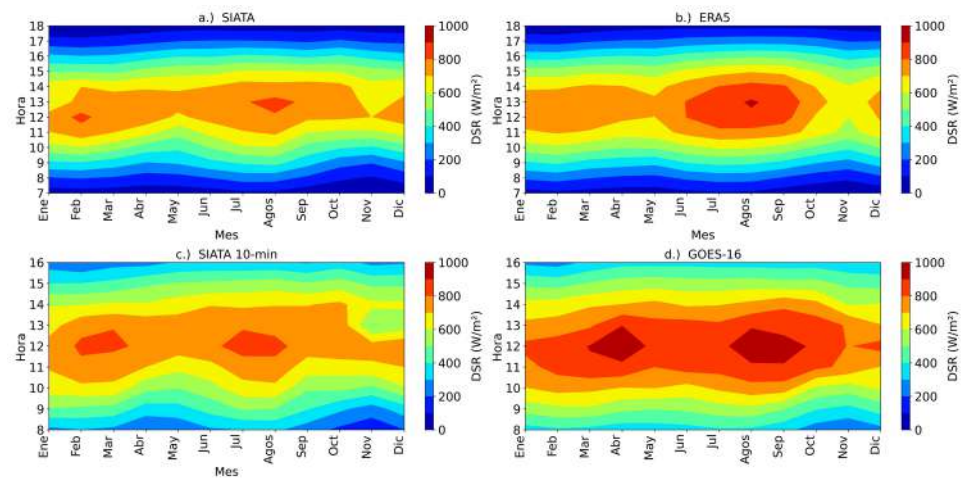


Figura 1. Evolución de la irradiancia solar en superficie en el Valle de Aburrá entre 2017 y 2020 según los registros de la estación Torre SIATA. **a)** Ciclo anual. **b)** Ciclo diario

cambios en el número de horas de sol y en su intensidad. Por ejemplo, en los períodos de abril-mayo y octubre-noviembre se observa una menor cantidad de horas de sol y una radiación solar en superficie que tiende hacia magnitudes más bajas.

Por otra parte, los ciclos diarios de radiación solar para cada mes del año obtenidos a partir del reanálisis ERA5 (**Figura 1-b**) muestran que este captó, en términos generales, la variabilidad diurna de la radiación solar en el área de estudio al registrar los crecimientos y decrecimientos, así como las franjas horarias de máxima radiación, como lo muestran las observaciones obtenidas para el mismo periodo (**Figura 1-a**). Sin embargo, según el reanálisis, las magnitudes de la radiación solar fueron frecuentemente mayores que las obtenidas a partir de los registros del SIATA, principalmente en la temporada de valores altos de JJA, que se extiende hasta septiembre. Por otra parte, se destaca que el ERA5 representó adecuadamente la disminución en las magnitudes de la radiación, así como las horas de sol para los períodos de abril-mayo y octubre-noviembre, al exhibir un estrechamiento de la banda de máximas magnitudes al mediodía, así como valores bajos en las mañanas y al finalizar la tarde. Los errores correspondientes al ERA5 (**Figura 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1576/3232>) evidencian que en el rango horario comprendido entre las 9:00 LT y las 16:00 LT, la mayor parte de los valores del RMSE para las temporadas secas representaron porcentajes mayores al 25 % e inferiores al 50 %, en tanto que para los meses correspondientes a las temporadas húmedas, los errores oscilaron entre el 30 % y el 57 % para la misma franja horaria. En las horas restantes, los valores del nRSME generalmente fueron mayores al 60 % e, incluso, alcanzaron magnitudes superiores al 100 %.

Al comparar los ciclos diarios de radiación solar derivados del satélite GOES16 (**Figura 1d**) con las observaciones del SIATA para el mismo periodo (**Figura 1-c**), un primer contraste notable fue la diferencia en las magnitudes entre las franjas de las horas de mayor radiación solar (entre las 10:00 LT y las 14:00 LT), puesto que en las observaciones los valores máximos de radiación solar en el día oscilaron entre 600 W/ y 900 W/, en tanto que según el GOES16 las horas de mayor radiación solar en el día presentaron, primordialmente, magnitudes entre 700 W/ y 1.000 W/. Por otra parte, se observó que la banda de magnitudes altas alrededor del mediodía según el GOES16 fue bastante uniforme, sin exhibir los estrechamientos que se presentaron en los registros del SIATA 10-min entre marzo-abril y octubre-noviembre-diciembre. Además, en las observaciones (**Figura 1-c**), los picos máximos de radiación solar por hora se presentaron, típicamente, en febrero, marzo, julio y agosto al mediodía, mientras que con el GOES16 (**Figura 1-d**) se obtuvieron los picos máximos de radiación solar por hora en marzo, abril, agosto y

septiembre, es decir, que los datos satelitales exhibieron un retraso de aproximadamente un mes con respecto a los registros del SIATA 10-min. Al analizar los errores del satélite (**Figura 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1576/3232>), se encontró que para el trimestre DEF, los ciclos diurnos mostraron valores de nRMSE entre el 20 % y el 60 %, aproximadamente. Por su parte, la primera temporada de lluvias del año (MAM) presentó ciclos diurnos de nRMSE con valores mínimos cercanos al 30 %, en tanto que los valores máximos de nRMSE tuvieron magnitudes aproximadas del 70 % para marzo, 105 % para abril y 92 % para mayo. En el trimestre JJA se observó que los ciclos diurnos de nRMSE tuvieron valores en el rango entre el 20 % y el 55 %, aproximadamente. En SON, correspondiente al segundo pico de precipitaciones de la región de estudio, los ciclos diurnos del nRMSE exhibieron valores mínimos entre el 25 % y el 35 %, en tanto que los valores máximos oscilaron entre el 75 % y el 98 %. Se destaca que en la mayoría de los meses los porcentajes de RMSE más altos se presentaron en las tardes, lo cual se explicaría considerando el supuesto de que el GOES16 tiene limitaciones para representar la radiación solar en superficie bajo condiciones de alta nubosidad, puesto que el ciclo diurno de precipitaciones en el Valle de Aburrá se caracteriza por presentar eventos de lluvia convectiva de alta intensidad y de corta duración en las tardes (14:00 LT - 17:00 LT) y precipitaciones estratiformes poco intensas pero de alta duración en las madrugadas (00:00 LT - 04:00 LT), en tanto que en las mañanas se presentan los mínimos de precipitación (**Poveda et al., 2005**).

Evaluación de la energía media diaria

Las distribuciones mensuales de los promedios diarios de energía obtenidos a partir del GOES16 y de las mediciones *in situ* de SIATA 10-min se representaron con los diagramas de cajas y bigotes de la **figura 2a**. La primera diferencia notable entre los valores diarios de energía provenientes del satélite y de las observaciones fue la prevalencia de magnitudes altas para las medianas del GOES16 con respecto al SIATA 10-min en el periodo comprendido entre enero y junio, en el cual los valores de energía para el satélite se centraron en magnitudes superiores a 5,3 kWh/m², en tanto que los valores centrales de la energía en el

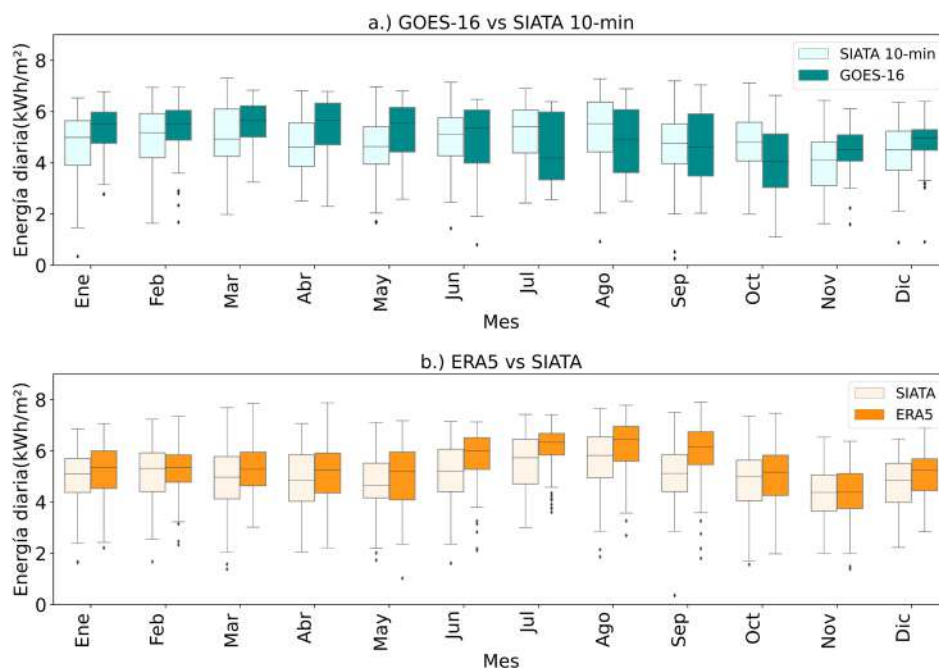


Figura 2. Distribución mensual de los valores medios diarios de energía solar. **a)** GOES16 *Vs.* SIATA. **b)** ERA5 *Vs.* SIATA

SIATA 10-min oscilaron entre 4,60 kWh/m² y 5,18 kWh/m² (**Tabla 2**). Específicamente, se observó que en la primera temporada húmeda del año las diferencias en los valores centrales de las distribuciones del satélite y las observaciones fueron más marcadas que en los meses restantes debido a que en MAM las medianas correspondientes a las estimaciones del GOES16 tuvieron valores de 5,65 kWh/m², 5,67 kWh/m², y 5,58 kWh/m² respectivamente, en tanto que las medianas del SIATA 10-min fueron de 4,93 kWh/m², 4,60 kWh/m², y 4,63 kWh/m². Este comportamiento no se observó en la segunda temporada de lluvias del año, pues para septiembre y octubre las magnitudes de las medianas correspondientes al SIATA 10-min fueron mayores que las del GOES16. Esto estaría relacionado con diferencias en la estructura de los sistemas convectivos de ambas temporadas y es posible que en SON la conjugación del paso de la ZCIT con la dinámica del chorro del Chocó y el paso de ondas tropicales del este sobre la región genere sistemas convectivos de gran extensión (**Bedoya-Soto et al., 2019; Poveda, 2004; Poveda & Mesa, 1999**), cuyos efectos sobre la extinción de la radiación pueden ser captados y sobredimensionados por el satélite. En contraste, en MAM pueden ser comunes los cielos con presencia de nubes, cuya extensión es considerablemente menor a la resolución de las estimaciones del satélite, por lo que su influencia en el comportamiento de la radiación solar no es percibida completamente. No obstante, se plantea como consideración futura el estudio detallado del comportamiento y la variabilidad del tamaño de los sistemas convectivos en el Valle de Aburrá, con el fin de establecer con mayor precisión su efecto en la energía solar disponible.

Además, en la **figura 2a** se puede observar que el producto ABI del satélite GOES16 tuvo limitaciones para representar la variabilidad de la energía solar en el área de estudio. Las distribuciones mensuales para meses como enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre evidencian que aproximadamente el 75 % de los datos de energía estimados a partir del GOES16 tuvieron magnitudes mayores a las medianas correspondientes a las distribuciones de la energía según el SIATA 10-min. Asimismo, se observa que en junio, julio y agosto las distribuciones de la energía derivadas del SIATA 10-min se concentraron hacia mayores magnitudes, en tanto que las distribuciones relativas a la energía del GOES16 presentaron una mayor concentración hacia menores magnitudes y un rango intercuartil más amplio.

Según se observa en la **figura 2b** y la **tabla 2**, las distribuciones de la energía diaria del ERA5 se centraron en valores superiores a los asociados al SIATA, encontrándose que esta diferencia entre las medianas fue menor en noviembre, puesto que se registraron valores

Tabla 2. Medianas de la energía media diaria de cada mes en el Valle de Aburrá obtenidas a partir de las observaciones de SIATA y las estimaciones del GOES16 y el reanálisis ERA5

Mediana de energía diaria (kWh/-día)				
Mes	GOES-16	SIATA 10-min	ERA5	SIATA
Enero	5,49	4,99	5,34	5,09
Febrero	5,5	5,18	5,35	5,32
Marzo	5,65	4,93	5,29	4,97
Abril	5,67	4,6	5,27	4,85
Mayo	5,58	4,63	5,21	4,65
Junio	5,35	5,1	6	5,21
Julio	4,19	5,42	6,34	5,74
Agosto	4,89	5,53	6,45	5,82
Septiembre	4,62	4,76	6,17	5,12
Octubre	4,05	4,8	5,17	4,98
Noviembre	4,51	4,1	4,39	4,38
Diciembre	4,97	4,52	5,24	4,86

de 4,39 kWh/m² con el ERA5 y de 4,38 kWh/m² con el SIATA, y en febrero, al obtenerse medianas de 5,35 kWh/m² con el ERA5 y 5,32 kWh/m² con el SIATA. En noviembre también se destaca que el ERA5 y el SIATA presentaron concentraciones similares para el 50 % de los valores de energía más cercanos a la medianas (es decir, los valores que comprenden la caja); asimismo, la longitud de los bigotes no divergió de forma importante, exceptuando que el ERA5 registró valores atípicos con magnitudes cercanas a 1 kWh/m². Además, se observa que en junio, julio, agosto y septiembre, el reanálisis sobreestimó de forma importante los valores de energía, pues aproximadamente el 75 % de los datos de energía diaria provenientes de este presentaron magnitudes superiores a las medianas correspondientes a las distribuciones asociadas con el SIATA. Se observa, asimismo, que los bigotes inferiores son más cortos que los obtenidos para las distribuciones del SIATA en dichos meses, lo que indica que el 25 % de los valores más bajos de energía correspondientes al ERA5 registraron magnitudes superiores y menor variabilidad con respecto a las observaciones. En marzo se observa que las distribuciones de la energía según el ERA5 se concentraron hacia valores más altos que las observaciones, y que los valores mínimos según el ERA5 alcanzaron valores ligeramente inferiores a 3 kWh/m² en tanto que los valores mínimos según el SIATA fueron menores a 2 kWh/m². En abril también se observa una distribución según el ERA5 concentrada hacia valores más altos que los del SIATA, y que la energía derivada del reanálisis alcanzó valores máximos cercanos a 8 kWh/m², en tanto que los valores máximos según el SIATA alcanzaron magnitudes cercanas a 7 kWh/m².

Ciclos diurnos de radiación solar derivada del ERA5 en el período 1979-2020

Después de constatar las bondades y limitaciones de las estimaciones de la radiación del ERA5 (ver sección anterior), aprovechamos el largo periodo de registro de esta base de datos para estudiar la variabilidad de la radiación solar en el Valle de Aburrá durante las diferentes fases del fenómeno ENSO. En este caso, se empleó información horaria promedio para el periodo 1979-2020. Específicamente, se estudiaron los valores de radiación durante los años de El Niño (14 eventos), La Niña (15 eventos) y los neutros. Este tipo de análisis no sería posible con los datos originales *in situ* o con las estimaciones del GOES debido a sus cortos períodos de registro.

Los ciclos diurnos de cada temporada del año se presentan en la **figura 3** y se analizan de forma conjunta con los valores medios de radiación solar presentados en la **tabla 3**. En general, las distribuciones (**Figura 3**) muestran que la mayor dispersión de los datos se presentó alrededor del mediodía y en las tardes, en tanto que entre las 7:00 LT y las 9:00 LT y desde las 17:00 LT hasta las 18:00 LT, el rango de variabilidad de los promedios horarios fue más bajo. En cuanto a las distribuciones de los ciclos diurnos durante los eventos de La Niña, se observa que el rango intercuartil para todas las horas y todas las estaciones se ubicó entre los valores inferiores comparado con las condiciones neutras, principalmente a partir de las 12:00 LT. Asimismo, los valores medios de radiación solar (**Tabla 3**) correspondientes a los eventos de La Niña fueron inferiores que los obtenidos para las condiciones neutras del ENSO, siendo mayor la diferencia en SON. Por otra parte, el rango intercuartil de las distribuciones de los ciclos diurnos durante los eventos de El Niño (**Figura 3**), se centró en valores más altos que los de las condiciones neutras en todas las horas de los trimestres DEF y JJA, siendo más pronunciadas las altas magnitudes durante DEF, cuando se observó que entre las 7:00 LT y las 15:00 LT el cuartil 0,25 de las distribuciones para los eventos de El Niño fue mayor que la mediana de las condiciones neutras. En MAM se observa que entre las 7:00 LT y las 12:00 LT las distribuciones durante El Niño se centraron en valores cercanos o inferiores a las medianas correspondientes a las condiciones neutras, en tanto que en las tardes las distribuciones durante El Niño generalmente tuvieron asimetrías negativas y medianas mayores que en las condiciones neutras (**Tabla 3**). En SON el rango intercuartil en los eventos de ENSO en sus dos fases estuvieron comprendidos entre valores de menor magnitud para casi todas las horas, lo que sugiere que en este trimestre la radiación solar en superficie en el Valle de Aburrá presenta, típicamente, valores inferiores durante La Niña y El Niño comparados con las condiciones neutras.

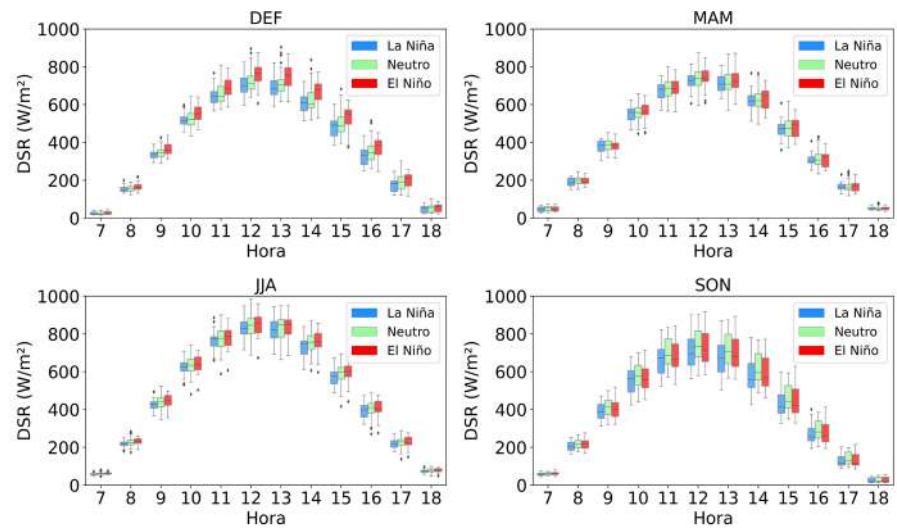


Figura 3. Distribución trimestral de los ciclos diurnos de radiación solar en superficie derivada del ERA5 durante el periodo 1979-2020 en el Valle de Aburrá. Los diagramas azules corresponden a los valores de radiación solar superficial durante la fase fría del ENSO (La Niña). Los diagramas verdes corresponden a los valores de radiación solar superficial en condiciones neutras del ENSO. Los diagramas rojos corresponden a los valores de radiación superficial en la fase cálida del ENSO (El Niño).

Tabla 3. Valores medios trimestrales de radiación solar en superficie durante eventos ENSO

Trimestre	Fase ENSO	Radiación (W/)
DEF	La Niña	393,75
DEF	Neutro	405,89
DEF	El Niño	427,54
MAM	La Niña	407,44
MAM	Neutro	414,20
MAM	El Niño	415,11
JJA	La Niña	478,12
JJA	Neutro	487,72
JJA	El Niño	494,68
SON	La Niña	390,97
SON	Neutro	415,93
SON	El Niño	404,69

Evaluación de simulaciones del modelo WRF

Horizonte de 24 horas. En la **figura 4** se observan los diagramas de cajas y bigotes para los errores RMSE y nRMSE de los valores horarios de irradiancia solar obtenidos de la comparación estadística entre los modelos WRF y de persistencia y las mediciones *in situ* del SIATA. El RMSE es un indicador de desempeño que permite comparar las desviaciones reales entre los valores calculados y los medidos, pero este error no distingue sobreestimaciones o subestimaciones del modelo, por lo tanto, todos los valores observados en la **figura 4** están por encima de cero. En la **figura 4a** se observa que los meses en los que el WRF obtuvo valores de RMSE más altos fueron marzo, abril, mayo, octubre y noviembre, los cuales hacen parte de la temporada lluviosa de la región. Por otra parte,

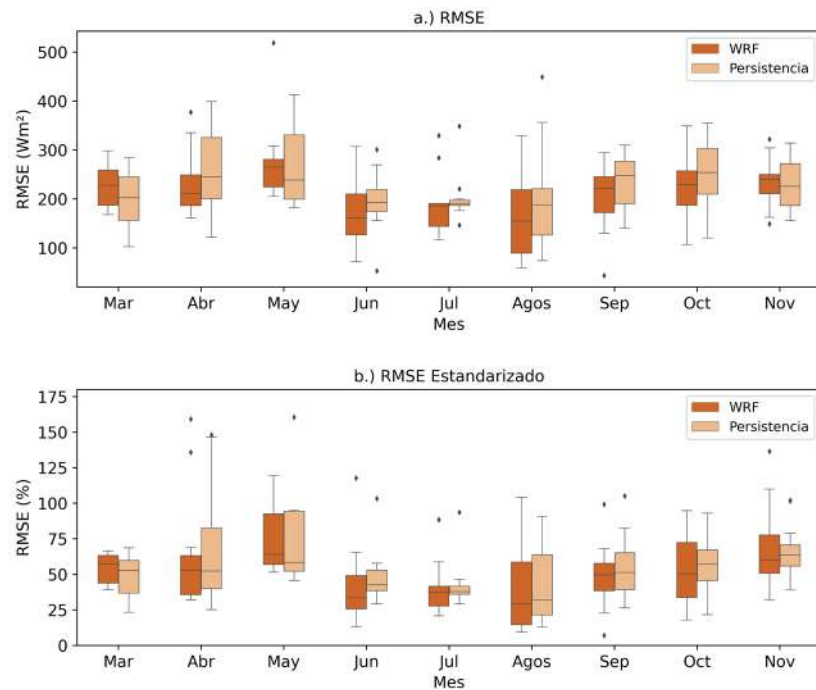


Figura 4. Diagramas de caja y bigotes para los errores de los valores horarios de irradiancia solar. **a)** RMSE. **b)** RMSE estandarizado

los valores de RMSE más bajos se registraron en junio, julio y agosto, que son meses de temporada seca en el Valle de Aburrá. Esto podría indicar que el rendimiento del modelo disminuye sustancialmente a medida que aumenta la nubosidad. La **figura 4c** muestra que, en general, la mayoría de los errores (nRMSE) de WRF se ubicaron por debajo del 100 %, con excepción de algunos días de abril, mayo y noviembre. Mayo fue el mes que reportó mayores valores de nRMSE, superando en su totalidad errores del 50 % e, inclusive, llegando a tener errores de aproximadamente el 350 %. Por su parte, junio y julio fueron los meses con menores porcentajes de nRMSE: junio registró la menor mediana (33,60 %) y julio la menor variabilidad, con un valor máximo de 43,33 %, sin tener en cuenta el dato atípico, y un valor mínimo de 20,92 %. Por otra parte, las **figuras 4b y 4d** muestran que el modelo de persistencia, al igual que el WRF, obtuvo mejor rendimiento para los meses de temporada seca. En comparación con el WRF, el de persistencia obtuvo mejores medianas de RMSE para los meses de marzo, mayo y noviembre y mejores medianas de nRMSE para marzo, abril y mayo, en tanto que en los demás meses, el WRF obtuvo medianas menores. Aun así, según los diagramas de caja y bigotes del RMSE en meses como abril y mayo, el modelo de persistencia, en general, presentó un peor rendimiento que el WRF, ya que alcanzó valores por encima de los $320 W/m^2$, pero en meses como marzo y agosto los modelos presentaron rendimientos muy similares, inclusive con un mejor desempeño para el de persistencia.

En la **figura 5** se observan los diagramas de caja y bigotes de los errores MBE y nMBE de los valores horarios de irradiancia solar obtenidos de la comparación estadística entre los modelos WRF y de persistencia y las mediciones *in situ* del SIATA. Los valores positivos de MBE y nMBE indican sobreestimación de las observaciones medias, en tanto que los valores negativos representan su subestimación. Teniendo esto en cuenta, en gran parte del periodo de estudio el modelo WRF sobreestimó la radiación solar, aunque en algunos días de abril, septiembre y octubre la subestimó. En la **figura 5a** se destacan marzo, mayo y noviembre por ser los meses donde el WRF obtuvo las medianas más altas de MBE, con valores de $129,30 W/m^2$, $120,80 W/m^2$ y $133,04 W/m^2$, respectivamente. Por el contrario,

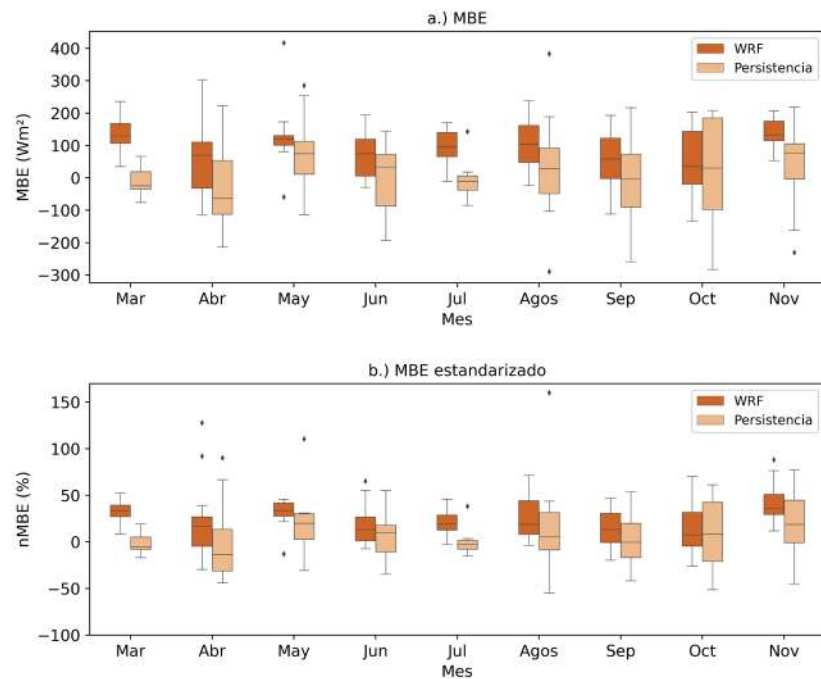


Figura 5. Diagramas de caja y bigotes para los errores de los valores horarios de irradiancia solar. **a)** MBE. **b)** MBE estandarizado

octubre exhibió la mediana más pequeña ($35,244 W/m^2$), aunque con una alta variabilidad. La **figura 5c** muestra que la gran mayoría de errores obtenidos del WRF estuvieron, en general, por debajo del 50 % y las medianas no superaron el 20 %, exceptuando algunos meses como marzo, mayo y noviembre, que presentaron las medianas más altas, 33,56%, 33,95% y 36,28%, respectivamente. Por su parte, octubre, junio y julio presentaron las menores medianas, con valores de 7,61%, 13,40% y 19,45%, respectivamente. Aun así, no se evidenció una inclinación a mayores sobreestimaciones en los meses de la temporada lluviosa, puesto que, según el tamaño de los diagramas, los meses de temporada seca como agosto y junio registraron valores de MBE mayores que mayo, septiembre y octubre, que son meses de temporada lluviosa. En general, el WRF exhibió errores positivos con magnitudes mayores que los del modelo de persistencia, aunque presentó errores negativos más pequeños en magnitud, alcanzando como máximo $-133,84 W/m^2$, en tanto que el modelo de persistencia llegó a tener errores cercanos a los $-300 W/m^2$, es decir, no exhibió una inclinación a sobreestimar la irradiancia solar como el WRF.

En general, la magnitud de los errores del WRF concuerda con lo registrado en la literatura, sin tener en cuenta los días extremos que superan errores del 100 %. En algunos estudios en Turquía se han documentado valores de nMBE entre el 17 % y el 30 % para condiciones nubladas y del 10 % y el 18 % para condiciones despejadas y valores de nRMSE para condiciones nubladas entre el 41 % y el 70 %, y para condiciones despejadas entre el 20 % y el 39 % (Incecik *et al.*, 2019). Otros autores han encontrado magnitudes de errores más bajas, por ejemplo, en España, donde se encontraron valores de nMBE del 2 % para cielos despejados y del 18 % para condiciones nubladas y valores de nRMSE del 10 % en cielos despejados y del 50 % en condiciones nubladas (Lara-Fanego *et al.*, 2012). En la Isla Reunión, algunos autores encontraron valores de nRMSE de hasta 57,3 % y de nMBE hasta de 16,08 % (Diagne *et al.*, 2014).

Horizonte de 48 horas. En la **tabla 4** se presentan las correlaciones de los valores horarios de irradiancia solar entre los modelos D1, D2, persistencia D1 y persistencia D2 y las mediciones *in situ*. Todas las correlaciones en la **tabla 4** fueron significativas, con un

Tabla 4. Correlaciones de los valores horarios de irradiancia solar para D1-WRF, D2-WRF, Persistencia D1 y Persistencia D2

Mes	Correlación			
	D1-WRF	D2-WRF	Persistencia D1	Persistencia D2
Marzo	0,78	0,74	0,63	0,61
Abril	0,74	0,68	0,71	0,68
Mayo	0,79	0,76	0,60	0,70
Junio	0,81	0,78	0,63	0,60
Julio	0,80	0,80	0,75	0,72
Agosto	0,84	0,80	0,76	0,77
Septiembre	0,78	0,79	0,64	0,67
Octubre	0,82	0,80	0,66	0,67
Noviembre	0,79	0,78	0,74	0,70
Diciembre	0,84	0,85	0,79	0,80
Enero	0,86	0,85	0,78	0,74

nivel de confianza de 0,05. En general, las correlaciones para el D1-WRF fueron mayores que para el D2-WRF, salvo en los meses de septiembre y diciembre, y fueron mayores que las correlaciones de ambos modelos de persistencia en todos los meses. El D2-WRF también presentó correlaciones más altas que los del respectivo modelo de persistencia. Por otra parte, al igual que el D1-WRF, el D2-WRF mostró correlaciones más altas en los meses de las temporadas secas de la región, exceptuando octubre. El modelo de persistencia D1 presentó correlaciones más altas (por encima de 0,70) para abril, julio, agosto, noviembre, diciembre y enero. El de persistencia D2 presentó las mayores correlaciones en mayo, julio, agosto, noviembre, diciembre y enero, lo que indica que, al igual que las simulaciones del WRF, el de persistencia para ambos días presentó las mayores correlaciones en los meses de temporada seca, salvo en abril (persistencia D1), mayo (persistencia D2) y noviembre (ambas persistencias), que son meses de temporada lluviosa en la región de estudio.

En la **figura 6** se muestran las medianas de los errores RMSE, los nRMSE, los valores horarios de irradiancia solar para el D1-WRF, el D2-WRF, el de persistencia D1 y de persistencia D2. En las **figura 6a y b** se aprecia que, en general, las persistencias presentaron medianas de RMSE y nRMSE más altas que las simulaciones del WRF. Por otra parte, las medianas del RMSE y del nRMSE en el WRF y de los modelos de persistencia siguen un comportamiento bimodal en el que las medianas más grandes se registraron en los meses de temporada lluviosa en la región de estudio, en tanto que en la temporada seca se apreciaron las más pequeñas. En el D1-WRF y el D2-WRF, los meses de temporada seca mostraron medianas de nRMSE entre el 25 % y el 40 % aproximadamente, es decir, que el 50 % de los errores estuvieron por debajo de estos valores, mientras que en los meses de temporada lluviosa las medianas de los errores estuvieron alrededor del 40 % y el 55 %. El D2-WRF presentó las menores medianas de RMSE y nRMSE en casi todos los meses, exceptuando marzo y abril para el RMSE y marzo, abril, junio y diciembre para el nRMSE, obteniéndose las menores medianas con el D1-WRF.

En la **figura 7a, b** se aprecia que, en general, el D1-WRF y el D2-WRF presentaron medianas positivas para los errores, con valores que oscilaron entre 0 W/m² y 100 W/m² para el MBE, y entre el 0 % y el 20 % para el nMBE, exceptuando noviembre en el D2-WRF, en el que las medianas presentaron valores negativos de aproximadamente -20 W/m² (RMSE) y -5 % (nRMSE). Esto evidencia la inclinación del WRF a sobreestimar la radiación solar en superficie tanto en el D1 como en el D2. En contraste, los modelos de persistencia no presentaron una tendencia tan marcada a la sobreestimación, pues la persistencia en el D1 presentó medianas negativas en 6 meses y en el D2 en 3 meses.

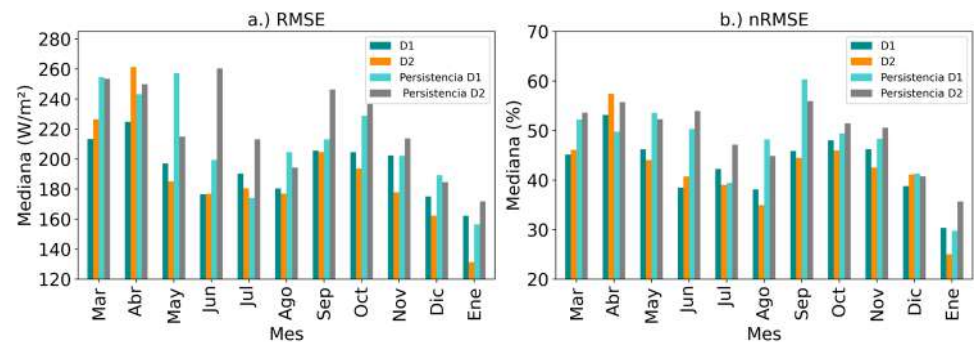


Figura 6. a) Medianas del error RMSE de los valores horarios de irradiancia solar para D1-WRF, D2-WRF, Persistencia D1 y Persistencia D2. **b)** Medianas del error nRMSE de los valores horarios de irradiancia solar para D1-WRF, D2-WRF, Persistencia D1 y Persistencia D2

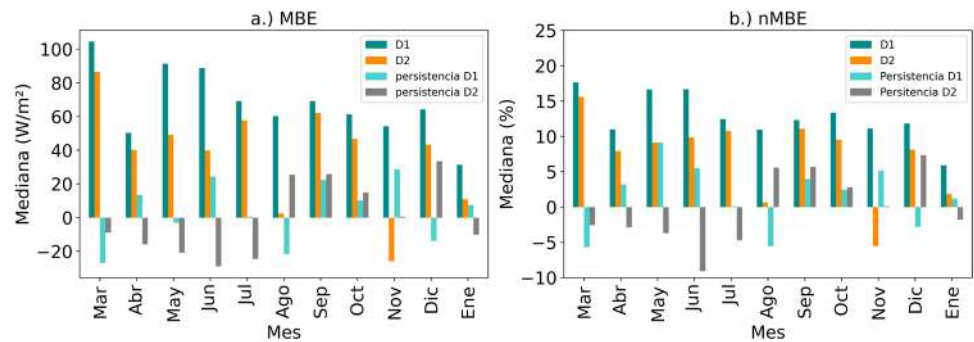


Figura 7. a) Medianas del error MBE de los valores horarios de irradiancia solar para D1-WRF, D2-WRF, Persistencia D1 y Persistencia D2. **b)** Medianas del error nMBE de los valores de irradiancia solar para D1-WRF, D2-WRF, Persistencia D1 y Persistencia D2

Asimismo, el MBE presentó las magnitudes más bajas en las horas cercanas al mediodía; además, al estandarizarlo, se evidenciaron las mayores magnitudes de error en las horas de la tarde, notándose un pico generalmente a las 17:00 LT (**Figura 5S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1576/3232>). Esto podría darse por lo mencionado anteriormente: en la tarde los valores de radiación son bajos, y al dividir el MBE por promedios de radiación bajos se incrementa el error (nMBE).

En la **tabla 5** se presentan las correlaciones entre los promedios diarios de irradiancia solar de los modelos (D1-WRF, D2-WRF, la persistencia D1, la persistencia D2) y los promedios diarios de las mediciones *in situ* del piranómetro de Torre SIATA. El D1 de simulaciones del WRF presentó correlaciones significativas para todos los meses, exceptuando abril y agosto. En general, el D2-WRF también exhibió correlaciones significativas, salvo para marzo y abril. Por el contrario, ambos modelos de persistencia presentaron correlaciones muy bajas, menos para julio (persistencia D1) y para septiembre (persistencia D2), es decir, que mostraron problemas para predecir el promedio diario de irradiancia solar, en tanto que el WRF mostró mejor capacidad para hacerlo. Se esperaba que el D1 presentara correlaciones más altas que el D2; aun así, el D2 presentó correlaciones más altas que el D1 para 6 de los 11 meses analizados. Por otra parte, las correlaciones de los valores diarios no presentaron valores más altos para las temporadas secas de la región, inclinación que sí mostraron las correlaciones de los valores horarios. Las correlaciones de los valores diarios las observamos en la tabla 5 y la de los valores horarios en la tabla 4.

Tabla 5. Correlaciones de los valores diarios de irradiancia solar para D1-WRF, D2-WRF, Persistencia D1 y Persistencia D2

Mes	Correlación			
	D1	D2	Persistencia D1	Persistencia D2
Marzo	0,72	0,47	0,08	-0,33
Abril	0,10	-0,28	0,06	0,01
Mayo	0,47	0,49	0,09	0,25
Junio	0,69	0,40	0,12	-0,01
Julio	0,53	0,56	0,41	-0,01
Agosto	0,26	0,53	0,26	0,08
Septiembre	0,62	0,52	0,01	0,54
Octubre	0,71	0,81	0,27	0,12
Noviembre	0,67	0,57	0,28	0,21
Diciembre	0,45	0,54	0,05	0,11
Enero	0,42	0,56	0,24	-0,02

Conclusiones

La caracterización y la comprensión del recurso solar en un lugar determinado son fundamentales para plantear e implementar nuevos proyectos de energía solar, para lo cual es de vital importancia disponer de estimaciones de irradiancia solar continuas y a largo plazo, y contar con pronósticos confiables para la operación de la red. En el Valle de Aburrá solo se tienen mediciones en superficie para un periodo corto y frecuentemente hay valores faltantes, aunque la situación es mucho mejor que la del resto del país, pues gran parte del territorio no cuenta con redes de medición *in situ*. Dada la escasez de datos locales, los conjuntos de datos derivados de reanálisis, estimaciones de satélites y pronósticos meteorológicos constituyen una fuente de información alterna, pero la evaluación de su desempeño entraña la necesidad de determinar su utilidad en los diferentes campos de aplicación. En este estudio se usaron mediciones en superficie del SIATA para evaluar el desempeño de los datos derivados del reanálisis ERA5 y del satélite GOES16, con el fin de dimensionar el recurso solar en el Valle de Aburrá. Específicamente, se evaluó la capacidad del ERA5 y el GOES16 para representar el comportamiento típico y la variabilidad de la radiación solar en el lugar de estudio. Por último, se evaluó el modelo atmosférico WRF para el pronóstico de la irradiancia solar en el Valle de Aburrá, con horizontes de 24 y 48 horas de antelación (D1 y D2, respectivamente).

Los resultados de la evaluación de las estimaciones de la radiación solar provenientes del producto ABI L2 del GOES16 sugieren un mejor desempeño del ABI L2 + DSR bajo condiciones de cielo despejado, en tanto que los mayores errores se notaron en las tardes y en las temporadas de lluvia, lo que indica que la presencia de nubes genera dificultades en la representatividad de la variabilidad de la radiación solar por parte del satélite. Los estudios de evaluación del recurso solar con datos derivados del GOES16 son limitados, por lo tanto, no fue posible establecer si los errores encontrados eran típicos, mayores con respecto a otras regiones, o si se debían a la ubicación geográfica y la complejidad de la topografía del territorio de estudio. Por su parte, la evaluación del desempeño del reanálisis ERA5 mostró que este conjunto representa bien la estacionalidad de la irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá, puesto que exhibió los períodos de aumento y disminución de la variable a lo largo del año. No obstante, presentó limitaciones para estimar las magnitudes de la irradiancia solar y los valores diarios de energía y, en general, tuvieron distribuciones concentradas hacia valores mayores que las observaciones, siendo más altos los sesgos para el trimestre JJA. En estudios previos se ha evidenciado que el desempeño

del ERA5 es bajo en áreas con altas precipitaciones, lo que indica que el reanálisis tiene dificultades para interpretar las propiedades de las nubes y sus efectos sobre la radiación en la superficie (Babar *et al.*, 2019; Jiang *et al.*, 2020; Salazar *et al.*, 2020). En general, las estimaciones de irradiancia solar en superficie para el Valle de Aburrá derivados del reanálisis ERA5 presentaron menores valores de RMSE que el GOES16. Además, el ERA5 cuenta con estimaciones disponibles para un período más extenso que los datos satelitales y cobertura para todo el dominio espacial de Colombia. En ese sentido, el ERA5 puede representar una mejor alternativa que los datos satelitales para dar una primera estimación del recurso solar en el Valle de Aburrá y en otras regiones de Colombia donde no se disponga de instrumentos para la medición *in situ* de la radiación solar en superficie.

Por otra parte, la climatología de la radiación solar en superficie obtenida a partir de los ciclos diurnos mensuales del ERA5 entre 1979 y 2020 evidenció que los datos derivados del reanálisis sugerían un aumento de por lo menos 10 % en los valores de radiación incidente sobre la superficie terrestre del Valle de Aburrá en DEF durante los eventos ENSO en su fase cálida (El Niño) con respecto a las condiciones neutras. Sin embargo, para las temporadas restantes y para la interpretación de la variabilidad de la irradiancia solar durante los eventos de La Niña, la señal de las estimaciones del reanálisis no fue clara.

Los resultados de la evaluación del modelo WRF mostraron que, en general, todas las simulaciones presentaron errores nMBE con medianas por debajo del 20 % aproximadamente. Según el comportamiento de este error, el WRF tendió a sobreestimar la radiación solar en todos los meses de estudio, tanto en las simulaciones de 24 horas como en el D1 y el D2 de las simulaciones de 48 horas. Al contrario de lo encontrado en estudios anteriores, la sobreestimación no fue dependiente de la temporada, es decir, los meses de lluvia no siempre mostraron mayores valores de MBE positivos que los meses de temporada seca. En cuanto al nRMSE, el modelo presentó porcentajes de error más altos, pero la mayoría de las medianas estuvieron por debajo del 50 %. Al contrario del MBE, el RMSE presentó dependencia estacional, es decir, los errores más altos se registraron en los meses de temporada lluviosa, lo que podría relacionarse con limitaciones para simular las nubes, puesto que en estudios anteriores se ha encontrado que el modelo se caracteriza por presentar mayores errores en días nublados. A esto se sumó el hecho de que las correlaciones horarias entre el WRF y las mediciones *in situ* fueron casi en su totalidad más altas en los meses de temporada seca, lo que indica que el modelo presenta pronósticos más precisos para estos meses.

Las simulaciones del WRF presentaron, en general, mejor rendimiento que el modelo más simple de predicción de irradiancia solar (la persistencia), ya que fueron más los meses en los que presentó errores RMSE menores a la persistencia. Aun así, hubo meses en que los modelos obtuvieron errores muy similares. Asimismo, la persistencia obtuvo MBE positivos similares, pero los negativos fueron de magnitud mucho mayor. Además, los promedios horarios y diarios del WRF mostraron correlaciones más altas con las mediciones *in situ* que las presentadas por el modelo de persistencia. El WRF mostró correlaciones horarias cercanas a 0,80 y diarias alrededor de 0,60, mientras que la persistencia presentó correlaciones horarias próximas a 0,70 y diarias cercanas a 0,2.

Contrario a lo que se esperaba, el rendimiento del modelo no disminuyó con el horizonte de tiempo, ya que las simulaciones del D2-WRF presentaron medianas de MBE y nMBE menores en magnitud a las del D1-WRF; además, este último alcanzó medianas positivas hasta 45 W/m^2 más altas que las del D2-WRF, aproximadamente. Asimismo, las medianas de RMSE y nRMSE fueron menores en el D2-WRF que en el D1-WRF, exceptuando marzo y abril para el RMSE, y marzo, abril, junio y diciembre para el nRMSE. Sin embargo, el D1-WRF representó de mejor manera otras propiedades, como las correlaciones horarias con las mediciones *in situ*, ya que 9 de los 11 meses analizados mostraron correlaciones más altas para el D1 que para el D2; en cuanto a las correlaciones diarias, el D2 presentó 6 meses con correlaciones más altas. En estudios anteriores (Lara-Fanego *et al.*, 2012) se reportaron resultados similares y se concluyó que los errores de pronóstico de simulaciones con horizontes más prolongados fueron similares o, en algunos casos,

menores a los de horizontes más cortos, probablemente porque el tiempo de evaluación del modelo fue relativamente corto, lo que podría explicar también que el rendimiento del modelo de persistencia estuviera cerca del rendimiento del modelo WRF en algunos periodos de estudio, tal como se evidenció en el nuestro.

En estudios anteriores se ha comprobado que Colombia depende extremadamente de los recursos hídricos para la generación de energía eléctrica, siendo particularmente vulnerable en los periodos de sequía que se presentan durante el fenómeno climático ENSO (Henao *et al.*, 2019; Zapata *et al.*, 2018). Henao *et al.* (2020) han señalado que durante El Niño la entrada de agua hacia los sistemas hidroeléctricos del país se reduce considerablemente, afectando la producción de energía eléctrica. En ese sentido, los resultados del presente estudio indican que los aumentos importantes en el recurso solar disponible en el Valle de Aburrá durante los eventos de El Niño, especialmente en DEF, pueden constituir una alternativa para complementar la energía hidroeléctrica en la región y reducir el riesgo en el suministro de energía. Asimismo, las simulaciones de WRF podrían ser una herramienta de importancia para ayudar a complementar el sistema, teniendo en cuenta que este modelo representó adecuadamente la radiación solar en superficie, especialmente en los meses de temporada seca, lo que podría garantizar una planificación adecuada del recurso precisamente en los meses de mayor incidencia de radiación solar en superficie.

Información suplementaria

Ver información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1576/3232>

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el programa “Colombia Científica” dentro del marco del proyecto “Ecosistema Científico” (Contrato No. FP44842-218-2018). Agradecemos al Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá por facilitar la información de piranómetros usada en este estudio.

Contribución de los autores

PAA y JAM diseñaron y dirigieron la investigación; LMC y MAC procesaron la información y realizaron los análisis. Las simulaciones obtenidas a partir del modelo WRF fueron realizadas por JAM. El manuscrito fue elaborado por todos los autores.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses con respecto al contenido de este artículo.

Referencias

- Ameen, B., Balzter, H., Jarvis, C., Wey, E., Thomas, C., Marchand, M. (2018). Validation of Hourly Global Horizontal Irradiance for Two Satellite-Derived Datasets in Northeast Iraq. *Remote Sensing*, 10(10), 1651. <https://doi.org/10.3390/RS10101651>
- Aryaputera, A. W., Yang, D., Walsh, W. M. (2015). Day-Ahead Solar Irradiance Forecasting in a Tropical Environment. *Journal of Solar Energy Engineering*, 137(5), 051009. <https://doi.org/10.1115/1.4030231>
- Babar, B., Graversen, R., Boström, T. (2019). Solar radiation estimation at high latitudes: Assessment of the CMSAF databases, ASR and ERA5. *Solar Energy*, 182, 397-411. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.058>
- Bedoya-Soto, J. M., Aristizábal, E., Carmona, A. M., Poveda, G. (2019). Seasonal shift of the diurnal cycle of rainfall over Medellín's valley, Central Andes of Colombia (1998–2005). *Frontiers in Earth Science*, 7, 92. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00092>
- Bustos, J., Sepúlveda, A., Triviño, L. (2014). Zonas no interconectadas eléctricamente en Colombia: problemas y perspectiva (Non Electric Interconnection Zones in Colombia: Problems and Perspectives). *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/SSRN.2603023>

- Boilley, A. & Wald, L.** (2015). Comparison between meteorological re-analyses from ERA-Interim and MERRA and measurements of daily solar irradiation at surface. *Renewable Energy*, 75, 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.042>
- Checa, F.E. & De La Cruz, O.E.** (2015). Potencial natural para el desarrollo fotovoltaico en Colombia. *Libros Editorial UNIMAR*. Pasto, Colombia.
- Cuervo, R. & Mendez, J. M.** (2011). Energía solar fotovoltaica. FC Editorial. Madrid, España.
- DANE** (2020). Censo nacional de población y vivienda 2018 - Valle de Aburrá. Technical report, Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Fecha de consulta: agosto y diciembre de 2020. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/presentaciones-territorio/190822-CNPV-presentacion-Antioquia-Valle-de-Aburra.pdf>
- Diagne, M., David, M., Boland, J., Schmutz, N., Lauret, P.** (2014). Post-processing of solar irradiance forecasts from WRF model at Reunion Island. *Solar Energy*, 105, 99-108.
- Henao, F., Rodríguez, Y., Viteri, J. P., Dyer, I.** (2019). Optimising the insertion of renewables in the Colombian power sector. *Renewable Energy*, 132, 81-92. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.07.099>
- Henao, F., Viteri, J. P., Rodríguez, Y., Gómez, J., Dyer, I.** (2020). Annual and interannual complementarities of renewable energy sources in Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134(August). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110318>
- Herrera-Mejía, L. & Hoyos, C. D.** (2019). Characterization of the atmospheric boundary layer in a narrow tropical valley using remote-sensing and radiosonde observations and the WRF model: the Aburrá Valley case-study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(723), 2641-2665. <https://doi.org/10.1002/QJ.3583>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A.,... Thépaut, J-N.** (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- IDEAM & UPME.** (2017). Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia (p. 172). p. 172. Fecha de consulta: agosto y diciembre 2020. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- IDEAM.** (s.f). Importancia de la radiación solar. Fecha de consulta: agosto a diciembre del 2020. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta#:~:text=La%20radiaci%C3%B3n%20solar%20nos%20proporciona,s%C3%ADntesis%20de%20los%20neurotransmisores%20cerebrales>
- Incecik, S., Sakarya, S., Tilev, S., Kahraman, A., Aksoy, B., Caliskan, E., ... Odman, M. T.** (2019). Evaluation of WRF parameterizations for global horizontal irradiation forecasts: A study for Turkey. *Atmósfera*, 32(2), 143-158.
- Jiang, H., Lu, N., Qin, J., Tang, W., Yao, L.** (2019). A deep learning algorithm to estimate hourly global solar radiation from geostationary satellite data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109327. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109327>
- Lara-Fanego, V., Ruiz-Arias, J. A., Pozo-Vázquez, D., Santos-Alamillos, F. J., Tovar-Pescador, J.** (2012). Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (Southern Spain). *Solar Energy*, 86(8), 2200-2217.
- Laszlo, I., Liu, H., Kim, H. Y., Pinker, R. T.** (2020). Shortwave Radiation from ABI on the GOES-R Series. In *Shortwave Radiation from ABI on the GOES-R Series, 1979*, 179–191. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814327-8.00015-9>
- Lohmann, G. M., Monahan, A. H., Heinemann, D.** (2016). Local short-term variability in solar irradiance. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(10), 6365–6379. <https://doi.org/10.5194/acp-16-6365-2016>
- Mesa Sánchez, Ó. J., Poveda Jaramillo, G., Vélez Upegui, J. I., Mejía Valencia, J. F., Hoyos Ortiz, C. D., Mantilla Gutiérrez, R., Barco Mejía, O. J., Cuartas Pineda, L. A., Botero Hernández, B., Montoya, M. I.** (2000). *Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/12102>
- Olarte, M. S. T.** (2017). *Nuevos modelos de predicción a corto plazo de la generación eléctrica en plantas basadas en energía solar fotovoltaica*. Tesis doctoral, Universidad de La Rioja, España.
- Porrini, C.** (2017). *Evaluación del modelo regional WRF para pronósticos de radiación solar en superficie dentro del territorio uruguayo*. Tesis de grado, Universidad de la República, Uruguay.
- Poveda, G. & Mesa, O.** (1999). La corriente de chorro superficial del Oeste (“del Chocó”) y otras dos corrientes de chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 23(89), 517-528.

- Poveda, G.** (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 28(107), 201-222.
- Poveda, G., Mesa, O. J., Salazar, L. F., Arias, P. A., Moreno, H. A., Vieira, S. C., Agudelo, P. A., Toro, V. G., Álvarez, J. F.** (2005). The Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Monthly Weather Review*, 133(1), 228-240. <https://doi.org/10.1175/MWR-2853.1>
- Ramírez-Camargo, L. & Schmidt, J.** (2020). Simulation of multi-annual time series of solar photovoltaic power: Is the ERA5-land reanalysis the next big step? *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100829. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100829>
- Ren, G., Wan, J., Liu, J., Yu, D.** (2019). Spatial and temporal assessments of complementarity for renewable energy resources in China. *Energy*, 177, 262-275. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.023>
- Robledo-Delgado, V.** (2020). Validación de datos satelitales de irradiancia solar de GOES-East sobre Medellín-Colombia. [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia. <http://hdl.handle.net/10495/15085>
- Salazar, G., Gueymard, C., Galdino, J. B., de Castro Vilela, O., Fraidenraich, N.** (2020). Solar irradiance time series derived from high-quality measurements, satellite-based models, and reanalyses at a near-equatorial site in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109478. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109478>
- Sianturi, Y., Marjuki, Sartika, K.** (2020). Evaluation of ERA5 and MERRA2 reanalyses to estimate solar irradiance using ground observations over Indonesia region. *AIP Conference Proceedings*, 2223 (1), 020002. <https://doi.org/10.1063/5.0000854>
- Superservicios.** (2017). ZONAS NO INTERCONECTADAS - ZNI Diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica 2017. Recuperado de: <http://webdav.superservicios.gov.co:8080/Media/Imagenes/Destacados/ZNI-Diagnostico-de-la-prestacion-del-servicio-de-energia-electrica-2017>
- UPME.** (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Ministerio de Minas y Energía. Recuperado de: http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf
- Urraca, R., Huld, T., Gracia-Amillo, A., Martínez-de-Pison, F. J., Kaspar, F., Sanz-García, A.** (2018). Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data. *Solar Energy*, 164, 339–354. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.02.059>
- Urrego-Ortiz, J., Alejandro Martínez, J., Arias, P. A., Jaramillo-Duque, Á.** (2019). Assessment and day-ahead forecasting of hourly solar radiation in Medellín, Colombia. *Energies*, 12 (22), 1–29. <https://doi.org/10.3390/en12224402>
- Vanegas-Chamorro, M., Villicaña-Ortiz, E., Arrieta-Viana, L.** (2015). Quantification and characterization of solar radiation at the department of La Guajira-Colombia by calculating atmospheric transmissivity. *Prospectiva*, 13 (2), 54-63.
- Wilks, D.S.** (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2nd Edition, Academic Press, London.
- Xia, S., Mestas-Núñez, A. M., Xie, H., Vega, R.** (2017). An Evaluation of Satellite Estimates of Solar Surface Irradiance Using Ground Observations in San Antonio, Texas, USA. *Remote Sensing*, 9(12), 1268. <https://doi.org/10.3390/RS9121268>
- Yeom, J.-M., Park, S., Chae, T., Kim, J.-Y., Lee, C. S.** (2019). Spatial Assessment of Solar Radiation by Machine Learning and Deep Neural Network Models Using Data Provided by the COMS MI Geostationary Satellite: A Case Study in South Korea. *Sensors*, 19(9), 2082. <https://doi.org/10.3390/S19092082>
- Zapata, S., Castañeda, M., Jiménez, M., Aristizábal, A. J., Franco, C. J., Dyner, I.** (2018). Long-term effects of 100% renewable generation on the Colombian power market. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 30, 183–191. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2018.10.008>
- Zhang, X., Lu, N., Jiang, H., Yao, L.** (2020). Evaluation of Reanalysis Surface Incident Solar Radiation Data in China. *Scientific Reports*, 10(1), 1-20. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60460-1>

Artículo original

Análisis matemático de un modelo metapoblacional para la dinámica del dengue

Mathematical analysis of a metapopulation model for dengue dynamics

✉ Aarom Llanos*, ✉ Heliana Arias

Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad del Valle, Cali, Colombia

Resumen

No es una novedad que el crecimiento de las poblaciones urbanas está aumentando, especialmente en zonas de bajos recursos. Dicho crecimiento viene acompañado de servicios de saneamiento ambiental deficientes y falta de recursos para el almacenamiento adecuado del agua, lo que ha favorecido el crecimiento de la población de mosquitos y, por ende, la propagación del dengue. El dengue es una enfermedad viral transmitida principalmente por los mosquitos *Aedes aegypti* que constituye uno de los mayores problemas de salud pública. El análisis cualitativo y cuantitativo de la propagación de esta enfermedad es de suma importancia para la sociedad, pues permite plantear un plan de choque para la prevención de una epidemia. Presentamos el análisis de un modelo metapoblacional del tipo SIR-SI que representa la dinámica del dengue para dos zonas conectadas por los tiempos de permanencia de la población humana en ellas, así como el análisis cualitativo del modelo, considerando diferentes escenarios de conexión entre las dos zonas estudiadas.

Palabras claves: Dengue; Metapoblación; Modelamiento matemático; Número reproductivo básico.

Abstract

The growth of urban populations is increasing especially in areas with low resources. Such growth has been accompanied by deficient sanitation services and a lack of resources for storing water in adequate ways helping to the increase of the mosquito population and, consequently, dengue transmission. Dengue is a viral disease transmitted mainly by *Aedes aegypti* mosquitoes and is considered one of the greatest public health problems. The qualitative and quantitative analysis of the spread of this disease is important as it contributes to the design of plans for the prevention of an epidemic. Here, we present the analysis of a metapopulation model of the SIR-SI type representing the dynamics of dengue for two zones connected by the residence times of the human population in each one. Subsequently, we carried out the qualitative analysis of the model considering different connection scenarios between the two areas.

Keywords: Dengue; Metapopulation; Mathematical Modeling; Basic Reproduction Number.

Introducción

El dengue, una de las enfermedades transmitidas por vectores más importantes, constituye uno de los mayores problemas de salud pública a nivel mundial. Sus características biológicas implican un alto poder endémico en territorios por debajo de los 1.800 m s.n.m. (Travi & Montoya, 1994). Por su geografía, todo el territorio colombiano es propicio para la aparición del virus causante de la enfermedad y el Valle del Cauca es uno de los departamentos que reporta más casos (Padilla *et al.*, 2012), siendo su capital, ubicada aproximadamente a 1.000 m s.n.m., la que mayor número de casos reporta. Por ello es de vital importancia estudiar la propagación de la enfermedad y, en este sentido, la modelación matemática resulta ser una herramienta útil, ya que permite describir en forma simplificada el comportamiento del fenómeno (Jacquez & Simon, 1993).

Citación: Llanos A, Arias H.
Análisis matemático de un modelo metapoblacional para la dinámica del dengue. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):550-564, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1604>

Editor: Clara Helena Sánchez

***Correspondencia:**
Aarom Llanos;
aarom.llanos@correounivalle.edu.co

Recibido: 22 de noviembre de 2021

Aceptado: 12 de mayo de 2022

Publicado: 24 de junio de 2022



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

El acelerado aumento de las poblaciones urbanas, especialmente en zonas de bajos recursos, ha agudizado las conductas que promueven los problemas de salubridad, entre ellos, el mal almacenamiento del agua (Velandia & Castellanos, 2011). Esta situación puede favorecer el crecimiento de la población de mosquitos y, por ende, la propagación de enfermedades de transmisión indirecta como el dengue, el Zika y el chikungunya (MinSalud, 2017). Ahora bien, las personas prefieren vivir en lugares cercanos a las ciudades para garantizar una cierta distancia de las grandes concentraciones de personas propias del área urbana y evitar, entre otras cosas, el contagio de enfermedades. En consecuencia, deben desplazarse para llegar a sus sitios de estudio, trabajo y atención médica. Es lo que sucede con los municipios aledaños a la ciudad de Santiago de Cali, cuyos habitantes se desplazan frecuentemente hacia la capital, donde permanecen un tiempo (que aquí denominamos tiempo de permanencia, entendido como la fracción de tiempo promedio que una persona pasa en una zona), para luego volver a su lugar de residencia. Estos desplazamientos son factores importantes en la propagación de enfermedades, ya que facilitan que una infección pueda extenderse de una zona a otra.

Lasluisa *et al.* (2019) presentan un análisis de un modelo metapoblacional en el que consideran que la población de humanos se divide en susceptible de infectarse e infectada, lo cual supone que no se adquiere inmunidad contra la enfermedad. En el caso del dengue se considera la circulación de varias cepas del virus, por lo que las personas pueden infectarse cada que tienen contacto con un mosquito infectado. La simplicidad de este modelo permite un análisis clásico de la situación de manera sencilla. Por otra parte, Barrios *et al.* (2018) consideran que la población de humanos está dividida en susceptible, expuesta, infectada y recuperada, lo que permite modelar la transmisión del dengue considerando un solo serotipo en circulación; este modelo es más complejo y su análisis resulta más complicado. Nuestro interés se centró únicamente en la circulación de un solo serotipo de dengue porque es un modelo más próximo a la realidad que el de Lasluisa *et al.* (2019) y más sencillo que el de Barrios *et al.* (2018), lo que permite que matemáticamente sea más tratable y los resultados sean igual de importantes.

Nuestro objetivo fue diseñar y analizar un modelo metapoblacional de tipo SIR-SI para estudiar la dinámica del dengue en dos zonas independientes con interacción entre sus individuos y hacer un análisis cualitativo clásico bajo los siguientes supuestos: se consideraron dos zonas y se tuvo en cuenta el tiempo de permanencia de las personas en cada una de ellas; las tasas de natalidad, mortalidad y recuperación de los humanos se consideraron las mismas en las dos zonas, así como las tasas de natalidad y mortalidad de los mosquitos; no se consideró el desplazamiento de los mosquitos entre las zonas y se contempló un único serotipo de dengue. Por último, se presentaron y analizaron las simulaciones numéricas de posibles desplazamientos.

Materiales y métodos

Descripción del modelo

El dengue es una infección vírica transmitida por la picadura de mosquitos, principalmente *Aedes aegypti*. Para la transmisión del dengue, el mosquito debe entrar en contacto con un humano infectado durante la fase de viremia de la enfermedad, lo que lo deja infectado por el resto de su vida. El mosquito infectado entra en contacto con un humano susceptible de infectarse con el virus, quien pasa a ser un humano infectado. La enfermedad no se transmite de persona a persona y sus síntomas más comunes son la fiebre, el dolor de cabeza y de articulaciones y la erupción rojiza en la piel (MinSalud, 2017). Con esto presente, se describió la interacción de humanos y mosquitos infectados con dengue considerando los siguientes supuestos:

- Dos zonas en las que las poblaciones de humanos y mosquitos permanecen constantes en el tiempo, las cuales se expresaron como N_{h_i} y N_{m_i} , respectivamente, con i tomando el valor 1 para la zona 1 y 2 para la zona 2.

- En nuestro modelo se consideró una clasificación de tipo SIR (Castillo & Brauer, 2001) para la población de humanos infectados; los humanos susceptibles de infectarse se representaron como s_{h_i} , los humanos infectados como i_{h_i} y los recuperados por r_{h_i} en cada zona, planteándose la ecuación $N_{h_i} = s_{h_i} + i_{h_i} + r_{h_i}$.

- Para la población de mosquitos se empleó una clasificación de tipo SI, es decir, mosquitos susceptibles, denotados como s_{m_i} , e infectados como i_{m_i} para la ecuación $N_{m_i} = s_{m_i} + i_{m_i}$.

- En cuanto a los desplazamientos de los humanos, se tuvo en cuenta el tiempo de su permanencia en cada zona representado como q_{ij} donde i y j tomaron el valor de 1 o 2. Además, este parámetro de movilidad cumplió con $q_{11} + q_{12} = 1$ y $q_{22} + q_{21} = 1$, considerando que q_{ij} correspondía a la fracción de tiempo promedio que un humano de la zona i pasa en la zona j . Por el contrario, no se consideró el desplazamiento de la población de mosquitos entre las zonas. Debe anotarse que debido a los desplazamientos de los humanos, las poblaciones en las zonas cambiaron según su tiempo de permanencia en ellas, por lo que $\sum_{j=1}^2 q_{ji} N_{h_j}$, donde $i = 1, 2$ es la población efectiva de humanos en la zona i .

- Se supuso que la tasa de natalidad y mortalidad de la población de humanos, μ , y la tasa de recuperación, γ , eran iguales en ambas zonas.

- Asimismo, se asumió que las tasas de natalidad y mortalidad de los mosquitos, δ , eran iguales en ambas zonas.

- Además de γ se planteó β_{h_i} como la tasa de contactos efectivos entre un humano susceptible y un mosquito infectado de la zona i y β_{m_i} como la tasa de contactos efectivos entre un mosquito susceptible y un humano infectado en la zona i .

Así, se estableció que las dinámicas de infección en humanos y mosquitos de la zona i tenía dos formas de llevarse a cabo:

Dinámica de infección en humanos

1. Cuando permanecen en su zona y allí tienen contacto con un mosquito infectado, lo cual se representó con la expresión $\frac{q_{ii}\beta_{h_i}s_{h_i}i_{m_i}}{q_{ii}N_{h_i}+q_{ji}N_{h_j}}$, donde el numerador representa el número de contactos efectivos de infección y el denominador, la población efectiva de la zona i .

2. Cuando pasan un tiempo en la otra zona y tienen contacto con un mosquito infectado de dicha zona, lo cual se representó con la expresión $\frac{q_{ij}\beta_{h_j}s_{h_i}i_{m_j}}{q_{ii}N_{h_i}+q_{jj}N_{h_j}}$, donde el numerador nuevamente corresponde al número de contactos efectivos de infección y el denominador, a la población efectiva de la zona j .

Dinámica de infección en los mosquitos

1. Cuando tienen contacto con los humanos infectados que no se desplazaron de la zona i , lo cual se representó con la expresión $\frac{q_{ii}\beta_{m_i}i_{h_i}s_{m_i}}{q_{ii}N_{h_i}+q_{ji}N_{h_j}}$, donde el numerador corresponde al número de contactos efectivos de infección y el denominador, a la población efectiva de la zona i .

2. Cuando tienen contacto con los humanos infectados de la zona j que se desplazaron a la zona i , lo cual se representó con la expresión $\frac{q_{ij}\beta_{m_i}i_{h_j}s_{m_i}}{q_{ii}N_{h_i}+q_{jj}N_{h_j}}$, donde el numerador corresponde al número de contactos efectivos de infección y el denominador, a la población efectiva de la zona i .

En la **figura 1** se presenta esquemáticamente la dinámica de transmisión del dengue aquí expuesta. Las flechas verticales indican la entrada por nacimientos y la salida por muerte de la población en cada etapa, en tanto que las flechas punteadas de color rojo y verde representan cómo se contagia el humano susceptible de las zonas 1 y 2 con un mosquito de las correspondientes zonas 1 y 2. Las flechas punteadas de color amarillo y naranja representan cómo se contagia el mosquito susceptible de las zonas 1 y 2. Por último, las flechas horizontales verdes, rojas y negras indican el cambio de etapa de un humano susceptible a infectado y de infectado a recuperado. Análogamente, las flechas horizontales amarillas y naranjas indican el cambio de etapa de un mosquito susceptible a infectado.

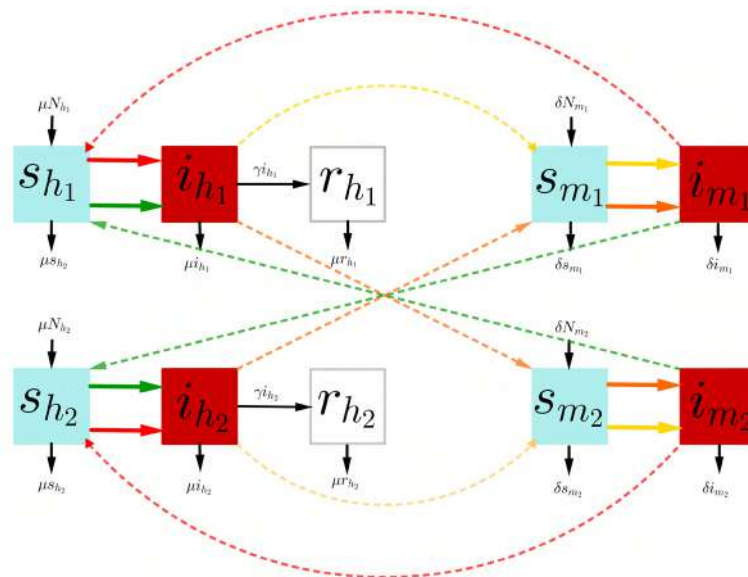


Figura 1. Diagrama de la dinámica del dengue para dos Zonas conectadas.

El sistema de ecuaciones que describe el modelo metapoblacional SIR-SI es el siguiente:

$$\frac{ds_{h1}}{dt} = \mu N_{h1} - \frac{q_{11}\beta_{h1}s_{h1}i_{m1}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}} - \frac{q_{12}\beta_{h2}s_{h1}i_{m2}}{q_{12}N_{h1} + q_{22}N_{h2}} - \mu s_{h1} \quad (1a)$$

$$\frac{di_{h1}}{dt} = \frac{q_{11}\beta_{h1}s_{h1}i_{m1}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}} + \frac{q_{12}\beta_{h2}s_{h1}i_{m2}}{q_{12}N_{h1} + q_{22}N_{h2}} - \mu i_{h1} - \gamma i_{h1}, \quad (1b)$$

$$\frac{dr_{h1}}{dt} = \gamma i_{h1} - \mu r_{h1}, \quad (1c)$$

$$\frac{ds_{m1}}{dt} = \delta N_{m1} - \frac{q_{11}\beta_{m1}i_{h1}s_{m1}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}} - \frac{q_{21}\beta_{m1}i_{h2}s_{m1}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}} - \delta s_{m1}, \quad (1d)$$

$$\frac{di_{m1}}{dt} = \frac{q_{11}\beta_{m1}i_{h1}s_{m1}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}} + \frac{q_{21}\beta_{m1}i_{h2}s_{m2}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}} - \delta i_{m1}, \quad (1e)$$

$$\frac{ds_{h2}}{dt} = \mu N_{h2} - \frac{q_{22}\beta_{h2}s_{h2}i_{m2}}{q_{22}N_{h2} + q_{12}N_{h1}} - \frac{q_{21}\beta_{h1}s_{h2}i_{m1}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}} - \mu s_{h2}, \quad (1f)$$

$$\frac{di_{h2}}{dt} = \frac{q_{22}\beta_{h2}s_{h2}i_{m2}}{q_{22}N_{h2} + q_{12}N_{h1}} + \frac{q_{21}\beta_{h1}s_{h2}i_{m1}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}} - \mu i_{h2} - \gamma i_{h2}, \quad (1g)$$

$$\frac{dr_{h2}}{dt} = \gamma i_{h2} - \mu r_{h2}, \quad (1h)$$

$$\frac{ds_{m2}}{dt} = \delta N_{m2} - \frac{q_{22}\beta_{m2}i_{h2}s_{m2}}{q_{22}N_{h2} + q_{12}N_{h1}} - \frac{q_{12}\beta_{m2}i_{h1}s_{m2}}{q_{22}N_{h2} + q_{12}N_{h1}} - \delta s_{m2}, \quad (1i)$$

$$\frac{di_{m2}}{dt} = \frac{q_{22}\beta_{m2}i_{h2}s_{m2}}{q_{22}N_{h2} + q_{12}N_{h1}} + \frac{q_{12}\beta_{m2}i_{h1}s_{m2}}{q_{22}N_{h2} + q_{12}N_{h1}} - \delta i_{m2}, \quad (1j)$$

Las ecuaciones (1b) y (1g) indican la variación de la población de humanos infectados en el tiempo en las zonas 1 y 2, respectivamente. Los dos primeros términos corresponden al número de nuevas infecciones y el tercer y cuarto términos, a la desaparición por muerte

y recuperación de los humanos infectados. Las ecuaciones (1e) y (1j) indican la variación de la población de mosquitos infectados en el tiempo en las zonas 1 y 2, respectivamente. Los dos primeros términos representan el número de nuevas infecciones y el tercer término, la desaparición por muerte de los mosquitos infectados.

Tomando en cuenta la definición del parámetro q_{ij} , se tiene que cuando $q_{11} = 1$ y $q_{22} = 1$, no hay movilidad entre las zonas, es decir, hay dinámicas aisladas. Por el otro lado, si $q_{11} = 0$ y $q_{22} = 0$, hay intercambio de poblaciones entre las zonas. En los casos en que $q_{11} = 1$ y $q_{22} = 0$ o $q_{11} = 0$ y $q_{22} = 1$, se tiene que solo hay movilidad hacia la zona 1 o la zona 2, respectivamente, situación a la que se denominó movilidad completa en una zona.

Para efectos de facilitar los cálculos, se normalizó el modelo mediante la introducción de las siguientes variables que representan la proporción de humanos y mosquitos existentes en cada zona:

$$\text{Zona 1: } S_{h1} = \frac{S_{h1}}{N_{h1}}, I_{h1} = \frac{i_{h1}}{N_{h1}}, R_{h1} = \frac{r_{h1}}{N_{h1}}, S_{m1} = \frac{s_{m1}}{N_{m1}} \text{ y } I_{m1} = \frac{i_{m1}}{N_{m1}}.$$

$$\text{Zona 2: } S_{h2} = \frac{S_{h2}}{N_{h2}}, I_{h2} = \frac{i_{h2}}{N_{h2}}, R_{h2} = \frac{r_{h2}}{N_{h2}}, S_{m2} = \frac{s_{m2}}{N_{m2}} \text{ y } I_{m2} = \frac{i_{m2}}{N_{m2}}$$

En consecuencia, el sistema (1) de ecuaciones se convierte en

$$\frac{dS_{h1}}{dt} = \mu - \frac{q_{11}\beta_{h1}S_{h1}I_{m1}N_{m1}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}} - \frac{q_{12}\beta_{h2}S_{h1}I_{m2}N_{m2}}{q_{12}N_{h1} + q_{22}N_{h2}} - \mu S_{h1}, \tag{2a}$$

$$\frac{dI_{h1}}{dt} = \frac{q_{11}\beta_{h1}S_{h1}I_{m1}N_{m1}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}} + \frac{q_{12}\beta_{h2}S_{h1}I_{m2}N_{m2}}{q_{12}N_{h1} + q_{22}N_{h2}} - (\mu + \gamma)I_{h1} \tag{2b}$$

$$\frac{dR_{h1}}{dt} = \gamma I_{h1} - \mu R_{h1}, \tag{2c}$$

$$\frac{dS_{m1}}{dt} = \delta - \frac{q_{11}\beta_{m1}N_{h1}I_{h1}S_{m1}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}} - \frac{q_{21}\beta_{m1}N_{h2}I_{h2}S_{m1}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}} - \delta S_{m1}, \tag{2d}$$

$$\frac{dI_{m1}}{dt} = \frac{q_{11}\beta_{m1}N_{h1}I_{h1}S_{m1}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}} + \frac{q_{21}\beta_{m1}N_{h2}I_{h2}S_{m1}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}} - \delta S_{m1} \tag{2e}$$

$$\frac{dS_{h2}}{dt} = \mu - \frac{q_{22}\beta_{h2}S_{h2}I_{m2}N_{m2}}{q_{22}N_{h2} + q_{12}N_{h1}} - \frac{q_{21}\beta_{h1}S_{h2}I_{m1}N_{m1}}{q_{21}N_{h2} + q_{11}N_{h1}} - \mu S_{h2}, \tag{2f}$$

$$\frac{dI_{h2}}{dt} = \frac{q_{22}\beta_{h2}S_{h2}I_{m2}N_{m2}}{q_{22}N_{h2} + q_{12}N_{h1}} + \frac{q_{21}\beta_{h1}S_{h2}I_{m1}N_{m1}}{q_{21}N_{h2} + q_{11}N_{h1}} - (\mu + \gamma)I_{h2}, \tag{2g}$$

$$\frac{dR_{h2}}{dt} = \gamma I_{h2} - \mu R_{h2}, \tag{2h}$$

$$\frac{dS_{m2}}{dt} = \delta - \frac{q_{22}\beta_{m2}N_{h2}I_{h2}S_{m2}}{q_{22}N_{h2} + q_{12}N_{h1}} - \frac{q_{12}\beta_{m2}N_{h1}I_{h1}S_{m2}}{q_{22}N_{h2} + q_{12}N_{h1}} - \delta S_{m2}, \tag{2i}$$

$$\frac{dI_{m2}}{dt} = \frac{q_{22}\beta_{m2}N_{h2}I_{h2}S_{m2}}{q_{22}N_{h2} + q_{12}N_{h1}} + \frac{q_{12}\beta_{m2}N_{h1}I_{h1}S_{m2}}{q_{22}N_{h2} + q_{12}N_{h1}} - \delta I_{m2}, \tag{2j}$$

Para comenzar, es importante saber si el sistema (2) tiene sentido biológico, para lo cual se adoptó el siguiente teorema.

Teorema 1. La región de interés biológico

$$\Omega = \{(S_{h1}, I_{h1}, R_{h1}, S_{m1}, I_{m1}, S_{h2}, I_{h2}, R_{h2}, S_{m2}, I_{m2})^T \in [0,1]^{10} : S_{hi} + I_{hi} + R_{hi} = 1, i = 1,2\}$$

es positivamente invariante.

Demostración 1. Al considerar la población constante, bastaría demostrar que el cambio del sistema de ecuaciones apunta hacia el interior de la región cuando se toma algún punto de los hiperplanos que limitan la región.

Sean

$$\Omega_{hi} = \{(S_{hi}, I_{hi}, R_{hi}) \in [0,1]^3: S_{hi} + I_{hi} + R_{hi} = 1, \quad i = 1,2\}$$

$$\Omega_{mi} = \{(S_{mi}, I_{mi}) \in [0,2]^2: S_{mi} + I_{mi} = 1, \quad i = 1,2\},$$

considerando $\Omega = \Omega_{h1} \times \Omega_{m1} \times \Omega_{h2} \times \Omega_{m2}$.

Se pasó a demostrar que Ω_{hi} era positivamente invariante. En efecto Ω_{hi} está limitado por los siguientes hiperplanos:

- $S_{hi} = 0$
- $I_{hi} = 0$
- $R_{hi} = 0$
- $S_{hi} + I_{hi} + R_{hi} = 1,$

donde $i = 1,2$.

Luego se analizó el cambio del sistema de ecuaciones (2) al tomar un punto arbitrario de los hiperplanos que limitan Ω_{hi} .

- Si $S_{hi} = 0$, entonces $\frac{dS_{hi}}{dt} = \mu > 0$. Es decir, S_{hi} es creciente, lo que indica que, al tomar un punto arbitrario del hiperplano, el cambio es hacia el interior de Ω_{hi} .
- Si $I_{hi} = 0$, entonces $\frac{dI_{hi}}{dt} = \sum_{j=1}^2 \frac{q_{ij}\beta_{hi}S_{hi}I_{mj}}{q_{1j}N_{h1} + q_{2j}N_{h2}} \geq 0$. Es decir, I_{hi} es creciente, lo que indica que, al tomar un punto arbitrario del hiperplano, el cambio es hacia el interior de Ω_{hi} .
- Si $R_{hi} = 0$, entonces $\frac{dR_{hi}}{dt} = \gamma I_{hi}$. Es decir, R_{hi} es creciente, lo que indica que, al tomar un punto arbitrario del hiperplano, el cambio es hacia el interior de Ω_{hi} .
- Si $S_{hi} + I_{hi} + R_{hi} = 1$, sea ϕ_{hi} el ángulo formado entre el vector normal del hiperplano y el vector de cambio del sistema, el cual está dado por la ecuación, indicando que $\phi_{hi} = \frac{\pi}{2}$. Es decir, que el vector de cambio del sistema está sobre el hiperplano.

Análogamente, se continuó para demostrar que Ω_{mi} era positivamente invariante. Se analizó el cambio del sistema de ecuaciones (2) al tomar un punto arbitrario de los hiperplanos que limitan Ω_{mi} .

- Si $S_{mi} = 0$, entonces $\frac{dS_{mi}}{dt} = \delta > 0$. Es decir, S_{mi} es creciente, lo que indica que, al tomar un punto arbitrario del hiperplano, el cambio apunta hacia el interior de Ω_{mi} .
- Si $I_{mi} = 0$, entonces $\frac{dI_{mi}}{dt} = \sum_{j=1}^2 \beta_{mi} p_{ji} I_{hj} S_{mj} \geq 0$. Luego, I_{mi} es creciente, lo que indica que, al tomar un punto arbitrario del hiperplano, el cambio es hacia el interior de Ω_{mi} .
- Si $S_{mi} + I_{mi} = 1$, sea ϕ_m el ángulo formado entre el vector normal del hiperplano y el vector de cambio del sistema, el cual está dado por la ecuación:

$$\cos(\phi_m) = \frac{(1,1) \left(\frac{dS_{mi}}{dt}, \frac{dI_{mi}}{dt} \right)}{\|(1,1)\| \left\| \left(\frac{dS_{mi}}{dt}, \frac{dI_{mi}}{dt} \right) \right\|} = \frac{\frac{dS_{mi}}{dt} + \frac{dI_{mi}}{dt}}{\sqrt{2} \left\| \left(\frac{dS_{mi}}{dt}, \frac{dI_{mi}}{dt} \right) \right\|} = 0,$$

indicándonos que $\phi_m = \frac{\pi}{2}$, es decir, que el vector de cambio del sistema está sobre el hiperplano.

Además, se denotó el número de mosquitos en la zona i por humanos efectivos en la zona i como θ_i , lo que está dado por:

$$\theta_1 = \frac{N_{m1}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}}, \quad \theta_2 = \frac{N_{m2}}{q_{22}N_{h2} + q_{12}N_{h1}}.$$

Asimismo, se denotó como p_{ij} la proporción de humanos efectivos de la zona i en la zona j , lo que está dado por:

$$p_{11} = \frac{q_{11}N_{h1}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}}, \quad p_{12} = \frac{q_{12}N_{h1}}{q_{22}N_{h2} + q_{12}N_{h1}},$$

$$p_{22} = \frac{q_{22}N_{h2}}{q_{22}N_{h2} + q_{12}N_{h1}}, \quad p_{21} = \frac{q_{21}N_{h2}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}}.$$

Además, el modelo (2) se pudo reducir a seis ecuaciones, ya que se que se consideraron poblaciones constantes, es decir, $R_{hi} = 1 - S_{hi}$ y $S_{mi} = 1 - I_{mi}$ para $i = 1,2$.

Con lo anterior, el modelo metapoblacional (2) se reescribió como:

$$\frac{dS_{h_1}}{dt} = \mu - q_{11}\beta_{h_1}\theta_1 S_{h_1} I_{m_1} - q_{12}\beta_{h_2}\theta_2 S_{h_1} I_{m_2} - \mu S_{h_1} \tag{3a}$$

$$\frac{dI_{h_1}}{dt} = q_{11}\beta_{h_1}\theta_1 S_{h_1} I_{m_1} + q_{12}\beta_{h_2}\theta_2 S_{h_1} I_{m_2} - (\mu + \gamma) I_{h_1} \tag{3b}$$

$$\frac{dI_{m_1}}{dt} = \beta_{m_1} p_{11} I_{h_1} (1 - I_{m_1}) + \beta_{m_1} p_{21} I_{h_2} (1 - I_{m_1}) - \delta I_{m_1} \tag{3c}$$

$$\frac{dS_{h_2}}{dt} = \mu - q_{22}\beta_{h_2}\theta_2 S_{h_2} I_{m_2} - q_{21}\beta_{h_1}\theta_1 S_{h_2} I_{m_1} - \mu S_{h_2} \tag{3d}$$

$$\frac{dI_{h_2}}{dt} = q_{22}\beta_{h_2}\theta_2 S_{h_2} I_{m_2} + q_{21}\beta_{h_1}\theta_1 S_{h_2} I_{m_1} - (\mu + \gamma) I_{h_2} \tag{3e}$$

$$\frac{dI_{m_2}}{dt} = \beta_{m_2} p_{22} I_{h_2} (1 - I_{m_2}) + \beta_{m_2} p_{12} I_{h_1} (1 - I_{m_2}) - \delta I_{m_2} \tag{3f}$$

Puntos de equilibrio

Para analizar el comportamiento cualitativo del sistema se calcularon los puntos de equilibrio, los cuales correspondían a las soluciones del sistema de ecuaciones

$$\mu - q_{11}\beta_{h_1}\theta_1 S_{h_1} I_{m_1} - q_{12}\beta_{h_2}\theta_2 S_{h_1} I_{m_2} - \mu S_{h_1} = 0 \tag{4a}$$

$$q_{11}\beta_{h_1}\theta_1 S_{h_1} I_{m_1} + q_{12}\beta_{h_2}\theta_2 S_{h_1} I_{m_2} - (\mu + \gamma) I_{h_1} = 0 \tag{4b}$$

$$\beta_{m_1} p_{11} I_{h_1} (1 - I_{m_1}) + \beta_{m_1} p_{21} I_{h_2} (1 - I_{m_1}) - \delta I_{m_1} = 0 \tag{4c}$$

$$\mu - q_{22}\beta_{h_2}\theta_2 S_{h_2} I_{m_2} - q_{21}\beta_{h_1}\theta_1 S_{h_2} I_{m_1} - \mu S_{h_2} = 0 \tag{4d}$$

$$q_{22}\beta_{h_2}\theta_2 S_{h_2} I_{m_2} + q_{21}\beta_{h_1}\theta_1 S_{h_2} I_{m_1} - (\mu + \gamma) I_{h_2} = 0 \tag{4e}$$

$$\beta_{m_2} p_{22} I_{h_2} (1 - I_{m_2}) + \beta_{m_2} p_{12} I_{h_1} (1 - I_{m_2}) - \delta I_{m_2} = 0 \tag{4f}$$

Por un lado, mediante inspección se pudo verificar que $x^* = (1,0,0,1,0,0)$ era una solución del sistema (4), lo que se denomina punto de equilibrio libre de enfermedad, por el otro, debido a la complejidad del sistema (4) no es posible hallar una forma explícita de otro punto de equilibrio. Más adelante se muestra la existencia y unicidad de este.

Número reproductivo básico (\mathcal{R}_0)

En los modelos epidemiológicos uno de los principales objetivos es hallar qué condiciones determinan la aparición de una epidemia. Estas condiciones se pueden determinar mediante el \mathcal{R}_0 , número reproductivo básico, que representa el número de nuevas infecciones producidas por un individuo infeccioso introducido en una población libre de enfermedad (**Van den Driessche & Watmough, 2002**), por lo que es importante determinarlo.

Siguiendo los lineamientos planteados en **Van den Driessche & Watmough (2002)** y **Martcheva (2015)** para calcular el \mathcal{R}_0 , es necesario determinar el cuadrado del radio espectral de la matriz de la próxima generación, la cual está dada por FV^{-1} (**Material suplementario 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1604/3231>).

$$F = \begin{pmatrix} 0 & q_{11}\beta_{h_1}\theta_1 & 0 & q_{12}\beta_{h_2}\theta_2 \\ \beta_{m_1}P_{11} & 0 & \beta_{m_1}P_{21} & 0 \\ 0 & q_{21}\beta_{h_1}\theta_1 & 0 & q_{22}\beta_{h_2}\theta_2 \\ \beta_{m_2}P_{12} & 0 & \beta_{m_2}P_{22} & 0 \end{pmatrix}, \quad V = \begin{pmatrix} \mu + \gamma & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu + \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta \end{pmatrix}.$$

Por consiguiente, el \mathcal{R}_0 del modelo (3) queda dado por

$$\mathcal{R}_0 = \frac{1}{2(\mu + \gamma)\delta} (k_1 + k_2 + \sqrt{(k_1 - k_2)^2 + 4\theta\omega}),$$

donde

$$k_1 = \beta_{h_1} \beta_{m_1} \theta_1 (p_{11} q_{11} + p_{21} q_{21}), \quad k_2 = \beta_{h_2} \beta_{m_2} \theta_2 (p_{12} q_{12} + p_{22} q_{22}),$$

$$\vartheta = \beta_{h_1} \beta_{m_1} \theta_1 \beta_{h_2} \beta_{m_2} \theta_2, \quad \omega = \frac{(q_{11} q_{12} N_{h_1} + q_{22} q_{21} N_{h_2})^2}{(q_{11} N_{h_1} + q_{21} N_{h_2})(q_{22} N_{h_2} + q_{12} N_{h_1})}.$$

Se utilizó la misma técnica de **Van den Driessche & Watmough (2002)** para hallar el número reproductivo básico de la zona i , \mathcal{R}_{0_i} , y se encontró que

$$\mathcal{R}_{0_i} = \frac{\beta_{h_1} \beta_{m_i} \hat{\theta}_i}{(\mu + \gamma) \delta},$$

donde $\hat{\theta}_i = \frac{N_{m_i}}{N_{h_i}}$.

Ahora bien, al analizar los casos en que no hay movilidad y se intercambian las poblaciones de las zonas, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. Sin movilidad entre las zonas, es decir cuando $q_{11} = 1$ y $q_{22} = 1$, se obtuvieron las siguientes igualdades:

$$k_1 = \beta_{h_1} \beta_{m_1} \hat{\theta}_1, \quad k_2 = \beta_{h_2} \beta_{m_2} \hat{\theta}_2, \quad \vartheta = k_1 k_2, \quad \omega = 0,$$

lo que implica que cuando no hay movilidad, se obtiene

$$\mathcal{R}_0 = \text{máx}\{\mathcal{R}_{0_1}, \mathcal{R}_{0_2}\}.$$

2. Al intercambiar las poblaciones entre las zonas, es decir, $q_{11} = 0$ y $q_{22} = 0$, se obtuvieron las siguientes igualdades:

$$k_1 = \beta_{h_1} \beta_{m_1} \hat{\theta}_1 \frac{N_{h_1}}{N_{h_2}}, \quad k_2 = \beta_{h_2} \beta_{m_2} \hat{\theta}_2 \frac{N_{h_1}}{N_{h_2}}, \quad \vartheta = \kappa_1 \kappa_2, \quad \omega = 0,$$

lo que implica que al hacer intercambio de poblaciones entre las zonas,

$$\mathcal{R}_0 = \text{máx}\left\{\mathcal{R}_{0_1} \frac{N_{h_1}}{N_{h_2}}, \mathcal{R}_{0_2} \frac{N_{h_2}}{N_{h_1}}\right\}$$

Así, el \mathcal{R}_0 es dependiente del número de humanos en la zona i por el número de humanos en la zona j .

Estabilidad del equilibrio libre de enfermedad

Se presenta un resultado que establece bajo qué condición la enfermedad tiende a desaparecer, es decir, el punto de equilibrio libre de enfermedad del modelo (3) asintóticamente estable.

Teorema 2. Si $\mathcal{R}_0 < 1$, entonces el punto de equilibrio libre de enfermedad es asintóticamente estable.

Demostración 2. Al calcular el jacobiano del sistema (3) y evaluarlo en x^* , se obtiene:

$$J(x^*) = \begin{pmatrix} -\mu & 0 & -\beta_{h_1} q_{11} \theta_1 & 0 & 0 & -\beta_{h_2} q_{12} \theta_2 \\ 0 & -(\mu + \gamma) & \beta_{h_1} q_{11} \theta_1 & 0 & 0 & \beta_{h_2} q_{12} \theta_2 \\ 0 & \beta_{m_1} p_{11} & -\delta & 0 & \beta_{m_1} p_{21} & 0 \\ 0 & 0 & -\beta_{h_1} q_{21} \theta_1 & -\mu & 0 & -\beta_{h_2} q_{22} \theta_2 \\ 0 & 0 & \beta_{h_1} q_{21} \theta_1 & 0 & -(\mu + \gamma) & \beta_{h_2} q_{22} \theta_2 \\ 0 & \beta_{m_2} p_{12} & 0 & 0 & \beta_{m_2} p_{22} & -\delta \end{pmatrix},$$

cuyos valores propios están dados por:

$$\lambda_1 = -\mu, \quad \lambda_{2_{\pm}} = \frac{1}{2} \left(-\sigma \pm \sqrt{\sigma^2 - 4\delta(\mu + \gamma)(1 - \mathcal{R}_0^2)} \right),$$

donde $\sigma = \mu + \gamma + \delta$ y λ_1 y $\lambda_{2_{\pm}}$ son de multiplicidad dos, cada uno. Claramente, λ_1 siempre es negativo, ya que $\mu > 0$. Para estudiar $\lambda_{2_{\pm}}$, se tomaron dos casos:

1. Si $\mathcal{R}_0 > 1$, se tiene que $1 - \mathcal{R}_0^2 > 0$, por lo tanto, $\sqrt{\sigma^2 - 4\delta(\mu + \gamma)(1 - \mathcal{R}_0^2)} < \sigma$, es decir que $-\sigma \pm \sqrt{\sigma^2 - 4\delta(\mu + \gamma)(1 - \mathcal{R}_0^2)} < 0$. Luego, $\lambda_{2_{\pm}} < 0$.

2. Si $\mathcal{R}_0 < 1$, se tiene que $1 - \mathcal{R}_0^2 < 0$, por lo tanto, $\sqrt{\sigma^2 - 4\delta(\mu + \gamma)(1 - \mathcal{R}_0^2)} > \sigma$, es decir que $-\sigma \pm \sqrt{\sigma^2 - 4\delta(\mu + \gamma)(1 - \mathcal{R}_0^2)}$ no siempre es menor que cero. Luego, $\lambda_{2_+} > 0$ y $\lambda_{2_-} < 0$.

En conclusión, se tiene que cuando $\mathcal{R}_0 < 1$, el punto de equilibrio libre de enfermedad es asintóticamente estable.

Dado que el equilibrio libre de enfermedad, x^* , es estable cuando $\mathcal{R}_0 < 1$, interesa saber cómo se comporta cualitativamente el sistema cuando $\mathcal{R}_0 > 1$.

Teorema 3. Suponga que la red de contacto (la red de movilidad entre las zonas) está fuertemente conectada, entonces el sistema (3) tiene un equilibrio endémico único si $1 < \mathcal{R}_0$. Además, este equilibrio es localmente asintóticamente estable.

Como nuestro interés se centró en ver el efecto de la propagación del dengue cuando hay movilidad de las personas entre las zonas, se supuso que siempre había flujo de población humana entre ellas, excluyendo los casos de intercambio de poblaciones entre las zonas o de movilidad hacia una sola zona. Por lo tanto, con base en el teorema (3.1) de **Iggidr et al.** (2016), y considerando una red de contacto fuertemente conectada, se obtuvo el resultado del teorema 3 (**Jacquez & Simon**,1993; **Smith**, 1995) (**Material suplementario 2**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1604/3231>).

Análisis de sensibilidad del \mathcal{R}_0

Al calcular el \mathcal{R}_0 , se observó que estaba en función de nueve parámetros, por lo que se procedió a estudiar la sensibilidad de \mathcal{R}_0 frente a cada uno de ellos para así analizar cuál era el efecto de los parámetros sobre el \mathcal{R}_0 , determinar cuáles parámetros deberían ser afectados para intentar controlar la dinámica del sistema y lograr cambios cualitativos en el sistema.

Primero, se analizó la derivada parcial de \mathcal{R}_0 con respecto a cada uno de los parámetros:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{R}_0}{\partial \beta_{h_1}} &= \frac{\beta_{m_1} \theta_1 [(p_{11} q_{11} + p_{12} q_{12})(\kappa_1 - \kappa_2 + \sqrt{(\kappa_1 - \kappa_2)^2 + 4\vartheta\omega}) + 2\beta_{h_2} \beta_{m_2} \theta_2 \omega]}{4\delta(\mu + \gamma)\mathcal{R}_0 \sqrt{(\kappa_1 - \kappa_2)^2 + 4\vartheta\omega}} > 0 \\ \frac{\partial \mathcal{R}_0}{\partial \beta_{h_2}} &= \frac{\beta_{m_2} \theta_2 [(p_{12} q_{12} + p_{22} q_{22})(\kappa_2 - \kappa_1 + \sqrt{(\kappa_1 - \kappa_2)^2 + 4\vartheta\omega}) + 2\beta_{h_1} \beta_{m_1} \theta_1 \omega]}{4\delta(\mu + \gamma)\mathcal{R}_0 \sqrt{(\kappa_1 - \kappa_2)^2 + 4\vartheta\omega}} > 0 \\ \frac{\partial \mathcal{R}_0}{\partial \beta_{m_1}} &= \frac{\beta_{h_1} \theta_1 [(p_{11} q_{11} + p_{21} q_{21})(\kappa_1 - \kappa_2 + \sqrt{(\kappa_1 - \kappa_2)^2 + 4\vartheta\omega}) + 2\beta_{h_2} \beta_{m_2} \theta_2 \omega]}{4\delta(\mu + \gamma)\mathcal{R}_0 \sqrt{(\kappa_1 - \kappa_2)^2 + 4\vartheta\omega}} > 0 \\ \frac{\partial \mathcal{R}_0}{\partial \beta_{m_2}} &= \frac{\beta_{h_2} \theta_2 [(p_{12} q_{12} + p_{22} q_{22})(\kappa_2 - \kappa_1 + \sqrt{(\kappa_1 - \kappa_2)^2 + 4\vartheta\omega}) + 2\beta_{h_1} \beta_{m_1} \theta_1 \omega]}{4\delta(\mu + \gamma)\mathcal{R}_0 \sqrt{(\kappa_1 - \kappa_2)^2 + 4\vartheta\omega}} > 0 \\ \frac{\partial \mathcal{R}_0}{\partial \mu} &= -\frac{\mathcal{R}_0}{2(\mu + \gamma)} < 0; \quad \frac{\partial \mathcal{R}_0}{\partial \gamma} = -\frac{\mathcal{R}_0}{2(\mu + \gamma)} < 0 \\ \frac{\partial \mathcal{R}_0}{\partial \delta} &= -\frac{\mathcal{R}_0}{2\delta} < 0 \end{aligned}$$

Estos cálculos evidenciaron que \mathcal{R}_0 era una función creciente con respecto a β_{h_1} , β_{h_2} , β_{m_1} , β_{m_2} y decreciente con respecto a μ , γ , δ . Así, para que \mathcal{R}_0 fuera pequeño debían disminuirse una o varias de las tasas de infección, β_{h_1} , β_{h_2} , β_{m_1} , β_{m_2} o aumentar las tasas de natalidad, mortalidad o recuperación en humanos y mosquitos dada por μ , δ , γ .

Por otra parte,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{R}_0}{\partial q_{11}} &= \frac{N_{h_1} N_{h_2} (-1 + q_{11} + q_{22})}{2\sqrt{(\kappa_1 - \kappa_2)^2 + 4v\omega}(\mu + \gamma)\delta\mathcal{R}_0} \left[\left(\frac{\beta_{h_1} \beta_{m_1} \theta_1 (1 - q_{22})}{(q_{11} N_{h_1} + (1 - q_{22}) N_{h_2})^2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{\beta_{h_2} \beta_{m_2} \theta_2 q_{22}}{((1 - q_{11}) N_{h_1} + q_{22} N_{h_2})^2} \right) \sqrt{(\kappa_1 - \kappa_2)^2 + 4v\omega} \right. \\ &\quad \left. + 2v(N_{h_1}(1 - q_{11})q_{11} + N_{h_2}(1 - q_{22})q_{22}) (2N_{h_2}(1 - q_{22})q_{22} \right. \\ &\quad \left. + N_{h_1}((1 - q_{11})(1 - q_{22}) + q_{11}q_{22})) \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\beta_{h_1} \beta_{m_1} \theta_1 (1 - q_{22})}{(q_{11} N_{h_1} + (1 - q_{22}) N_{h_2})^2} + \frac{\beta_{h_2} \beta_{m_2} \theta_2 q_{22}}{((1 - q_{11}) N_{h_1} + q_{22} N_{h_2})^2} \right) (\kappa_1 - \kappa_2) \right], \end{aligned}$$

donde A sería el conjunto con la siguiente propiedad: $A = \{q_{11}, q_{22} \in (0,1) : q_{11} + q_{22} - 1 = 0\}$, es decir, que los puntos que pertenecen a A son un cero de $\frac{\partial \mathcal{R}_0}{\partial q_{11}}$, y hay un punto crítico de \mathcal{R}_0 en dirección de q_{11} . Sin embargo, no se logró establecer la naturaleza de los puntos que pertenecen a A , por ende, no se pudo ver el efecto que causa el parámetro q_{11} en \mathcal{R}_0 . Es decir, q_{11} no afecta monótonamente a \mathcal{R}_0 .

Procediendo análogamente para $\frac{\partial \mathcal{R}_0}{\partial q_{22}}$ se obtuvo el mismo resultado (**Material suplementario 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1604/3231>).

Segundo, para tener un mejor análisis de la sensibilidad de \mathcal{R}_0 con respecto a los parámetros del modelo, se utilizó el índice de sensibilidad normalizado presentado en **Chitnis et al. (2008)**. Este índice de \mathcal{R}_0 con respecto al parámetro p , se definió como $\Upsilon_p^{\mathcal{R}_0} := \frac{\partial \mathcal{R}_0}{\partial p} \frac{p}{\mathcal{R}_0}$, el cual fue útil para medir la sensibilidad o la capacidad de respuesta del \mathcal{R}_0 a un cambio en su parámetro.

$$\begin{aligned} \Upsilon_{\beta_{h_1}}^{\mathcal{R}_0} = \Upsilon_{\beta_{m_1}}^{\mathcal{R}_0} &= \frac{k_1 - k_2 + \sqrt{(k_1 - k_2)^2 + 4\vartheta w}}{4\sqrt{(k_1 - k_2)^2 + 4\vartheta w}} \in \left[0, \frac{1}{2}\right], \\ \Upsilon_{\beta_{h_2}}^{\mathcal{R}_0} = \Upsilon_{\beta_{m_2}}^{\mathcal{R}_0} &= \frac{k_2 - k_1 + \sqrt{(k_1 - k_2)^2 + 4\vartheta w}}{4\sqrt{(k_1 - k_2)^2 + 4\vartheta w}} \in \left[0, \frac{1}{2}\right], \\ \Upsilon_{\mu}^{\mathcal{R}_0} &= -\frac{\mu}{2(\mu + \gamma)} \in \left[-\frac{1}{2}, 0\right], \quad \Upsilon_{\gamma}^{\mathcal{R}_0} = -\frac{\gamma}{2(\mu + \gamma)} \in \left[-\frac{1}{2}, 0\right], \quad \Upsilon_{\delta}^{\mathcal{R}_0} = -\frac{1}{2}. \end{aligned}$$

Por ejemplo, para el caso de $\Upsilon_{\delta}^{\mathcal{R}_0} = -\frac{1}{2}$, este índice de sensibilidad permite obtener la siguiente relación: cuando la tasa de natalidad de los mosquitos aumenta un 10 %, el \mathcal{R}_0 disminuye en un $1 - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1,1}\right) = 54,5$ % (**Smith, 1995**). Cabe anotar que los índices de sensibilidad en valor absoluto no son mayores que 0,5.

Resultados y discusión

Se presentan las simulaciones numéricas del modelo (3) para estudiar qué tanta influencia tienen los tiempos de permanencia de los humanos en las diferentes zonas en la variación de la población de humanos infectados.

Las gráficas de las simulaciones se obtuvieron mediante la herramienta tecnológica Wolfram Mathematica utilizando los valores estimados de los parámetros del modelo SIR-SI (**Sepulveda, 2015**) obtenidos al ajustar los casos de dengue reportados a la Secretaría Municipal de Salud de Cali en el 2010, dado que este modelo SIR-SI describe una situación similar a esta (**Tabla 1**).

Para las simulaciones numéricas se tomaron iguales valores estimados de los parámetros, así como iguales condiciones iniciales en ambas zonas (se tomó una zona con población más alta que la otra para simular un escenario más común, en el que una zona es una ciudad grande y la otra una ciudad cercana, pero más pequeña) (**Tablas 1 y 2**). Se consideraron dos situaciones en cada zona para el \mathcal{R}_{0i} , es decir, $\mathcal{R}_{0i} < 1$ o $\mathcal{R}_{0i} > 1$, $i \in \{1,2\}$, para lo cual se varió la probabilidad de infección en los humanos tomando dos valores para β_{h_i} , correspondientes a $\beta_{h_i} = 3,52 \times 10^{-2}$, $10,58 \times 10^{-2}$, y haciendo que \mathcal{R}_0 tomara valores de 0,5866 y 1,1734, respectivamente.

Tabla 1. Valores de los parámetros para realizar las simulaciones numéricas

Parámetros	Descripción	Valor
β_{m_i}	Tasa de contactos efectivos en mosquitos zona i	$3,57 \times 10^{-2}$
μ	Tasa de natalidad y mortalidad en humanos	$3,714 \times 10^{-5}$
γ	Tasa de recuperación en humanos	0,1
δ	Tasa de natalidad y mortalidad en mosquitos	$6,45 \times 10^{-2}$

Tabla 2. Condiciones iniciales para realizar las simulaciones numéricas

Notación	Descripción	Valor
N_{h_1}	Cantidad de humanos en la zona 1	3000
N_{m_1}	Cantidad de mosquitos en la zona 1	9000
N_{h_2}	Cantidad de humanos en la zona 2	150
N_{m_2}	Cantidad de mosquitos en la zona 2	450
PS_{h_i}	Porcentaje de humanos susceptibles zona	98 %
PI_{h_i}	Porcentaje de humanos infectados zona	1,5 %
PI_{m_i}	Porcentaje de mosquitos infectados zona	4,5 %

Dinámica aislada

Mostramos cómo se comporta la dinámica del dengue sin incluir la movilidad, es decir, que $q_{11} = q_{22} = 1$. La dinámica aislada permitió saber el porcentaje de infectados en cada zona y observar el impacto de la movilidad en cada una de ellas.

Las gráficas en la **figura 2** muestran el porcentaje de humanos infectados cuando $\mathcal{R}_{0_i} < 1$ y $1 < \mathcal{R}_{0_i}$, respectivamente. Puede observarse que las gráficas se superponen, lo que se debe a que se trabajó en proporciones con condiciones iniciales iguales; debe aclararse que en poblaciones absolutas estas difieren completamente, cuando está dado \mathcal{R}_{0_i} para hacer las simulaciones.

En los casos en que $\mathcal{R}_{0_1} < 1$, $1 < \mathcal{R}_{0_2}$ y $1 < \mathcal{R}_{0_1}$, $\mathcal{R}_{0_2} < 1$, se obtuvo una combinación de las gráficas presentadas en la **figura 2**.

Intercambio de poblaciones entre las zonas

Se evidenció el efecto del cambio de zona de la población completa de humanos, es decir que $q_{11} = q_{22} = 0$. Los resultados fueron dos parejas de gráficas equivalentes, es decir, que cualitativamente se comportan de igual manera (**Figura 3**), con la proporción de humanos infectados de las zonas 1 y 2 en las zonas 2 y 1, respectivamente.

En este escenario se pudo empezar a notar que la movilidad afectó fuertemente a la población de humanos de la zona 2, ya que al hacer el intercambio de población de humanos, la densidad de mosquitos, es decir, el número de mosquitos por humano en la zona 1, fue mucho mayor, con el consecuente aumento de la probabilidad de infección en esa zona y un mayor riesgo para la población de humanos de la zona 2. Además, la infección de humanos de la zona 2 fue más alta en la situación en que $\mathcal{R}_{0_1} > 1$.

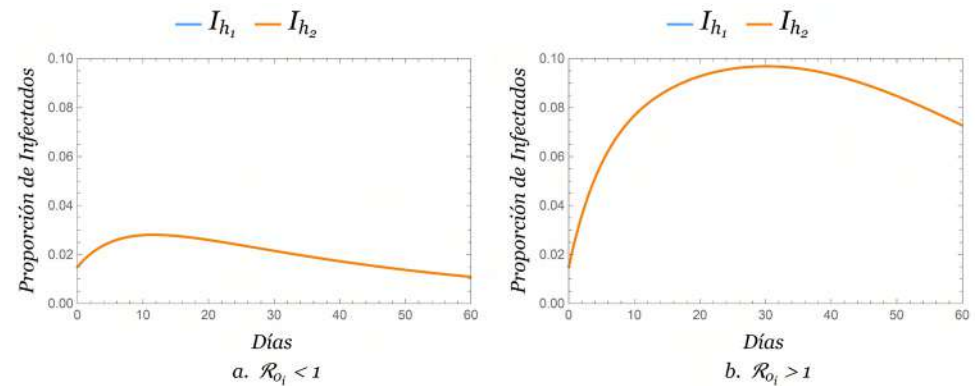


Figura 2. Proporción de humanos infectados cuando $q_{11} = q_{22} = 1$.

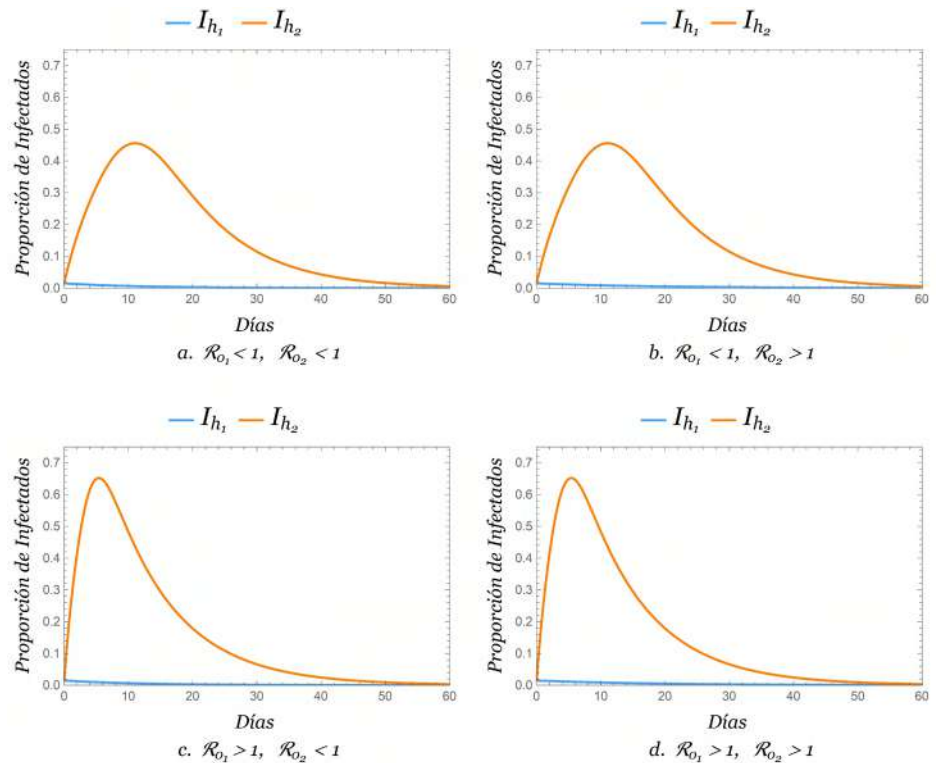


Figura 3. Proporción de humanos infectados cuando $q_{11} = q_{22} = 0$.

Movilidad entre las zonas

Se evidenció el efecto de la movilidad en la propagación del dengue tomando un valor para q_{11} y viendo el efecto que causaba la variación de q_{22} , es decir, tomando la proporción de tiempo de permanencia de los humanos de la zona 1 como $q_{11} = 0,8, 0,6, 0,4$ y $0,2$, y considerando la proporción de tiempo de permanencia de los humanos en la zona 2 como $q_{22} = 0,8, 0,6, 0,4$ y $0,2$. Además, se consideró que $\mathcal{R}_0 > 1$.

En todos los escenarios se encontró que al aumentar la movilidad de la zona 2 hacia la zona 1, el porcentaje de humanos infectados de la zona 2 aumentaba, en tanto que el porcentaje de infectados de la zona 1 relativamente seguía siendo el mismo. Se plantearon los casos en los que $q_{11} = 0,8$ y $q_{11} = 0,2$, respectivamente, los cuales se observan en las gráficas de las **figuras 4 y 5**.

Esto nos lleva a concluir que la movilidad afectó fuertemente a la población de la zona pequeña, es decir, la zona 2. Además, cuando $q_{11} + q_{22} = 1$, las **figuras 4a y 5d** se superpusieron debido a las condiciones iniciales consideradas, lo que sugiere que las ecuaciones de humanos infectados de la zona 1 y la zona 2 fueron proporcionalmente iguales.

En efecto,

$$\frac{dI_{h1}}{dt} = q_{11}\beta_{h1}S_{h1}I_{m1}\theta_1 + q_{12}\beta_{h2}S_{h1}I_{m2}\theta_2 - (\mu + \gamma)I_{h1}, \tag{5a}$$

$$\frac{dI_{h2}}{dt} = q_{22}\beta_{h2}S_{h2}I_{m2}\theta_2 + q_{21}\beta_{h1}S_{h2}I_{m1}\theta_1 - (\mu + \gamma)I_{h2}, \tag{5b}$$

como se tiene que $\sum_{j=1}^2 q_{ij} = \mathbf{1}$ con $i = 1, 2$, para el primer término de la ecuación (5a) se puede notar que

$$q_{11}\theta_1 = \frac{q_{11}N_{m1}}{q_{11}N_{h1} + q_{21}N_{h2}} = \frac{N_{m1}}{N_{h1} + \frac{q_{21}}{q_{11}}N_{h2}} = \frac{N_{m1}}{N_{h1} + N_{h2}}$$

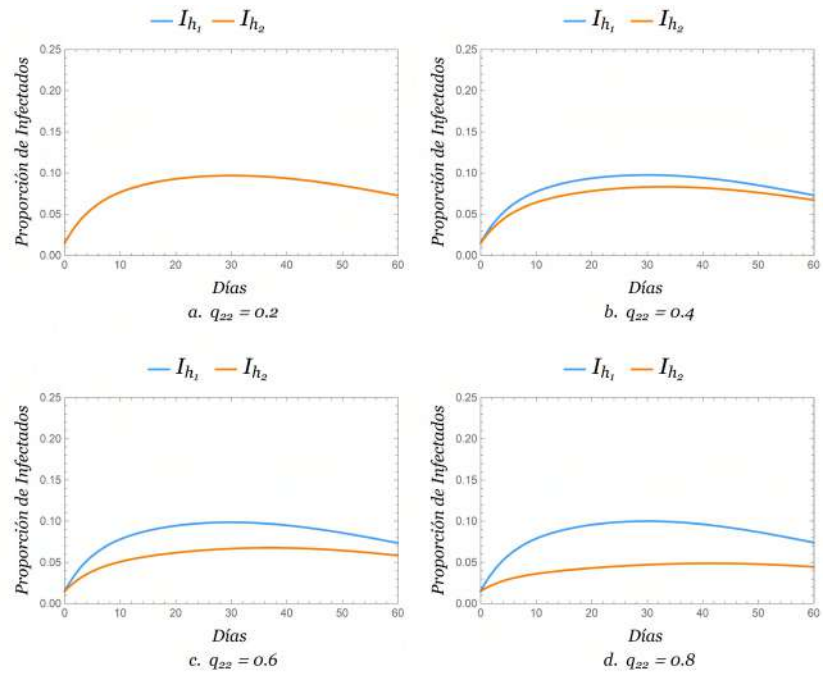


Figura 4. Proporción de humanos infectados para valores distintos de q_{22} cuando $q_{11} = 0.8$

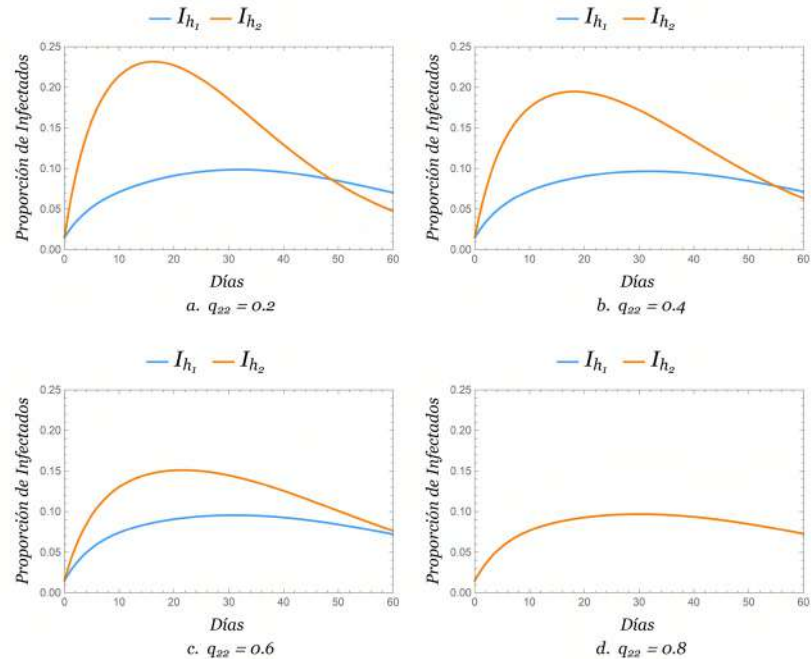


Figura 5. Proporción de humanos infectados para valores distintos de q_{22} cuando $q_{11} = 0.2$

Procediendo análogamente para los factores $q_{12}\theta_2$, $q_{22}\theta_2$ y $q_{21}\theta_1$, se obtuvo que $q_{11}\theta_1 = q_{21}\theta_1$ y $q_{22}\theta_2 = \frac{N_{m_2}}{N_{h_1} + N_{h_2}}$.

Por último, en las simulaciones numéricas se observó que cuando $\mathcal{R}_{01} < 1$ y $\mathcal{R}_{02} > 1$ se obtuvo que $\mathcal{R}_0 < 1$, y cuando $\mathcal{R}_{01} > 1$ y $\mathcal{R}_{02} < 1$, se obtuvo $\mathcal{R}_0 > 1$. Luego \mathcal{R}_0 estuvo directamente relacionado con el valor de \mathcal{R}_{01} .

Conclusiones

En este estudio se propone un modelo metapoblacional de tipo SIR-SI que representa la dinámica de transmisión del dengue en dos zonas conectadas por el tiempo de permanencia de los humanos en ellas.

Se hizo el análisis cualitativo al modelo mediante el cálculo de los puntos de equilibrio y se estudiaron las condiciones en que se logró su estabilidad. El primero, es decir, el libre de enfermedad, se encontró trivial en la inspección, en tanto que, para el segundo, el endémico, no fue posible establecer una expresión analítica, por lo que se procedió a demostrar mediante los lineamientos expuestos en **Iggidr et al.** (2016) que este punto existía y era único.

También se calculó el número reproductivo básico asociado a nuestro modelo para concluir que si $\mathcal{R}_0 < 1$, el punto de equilibrio libre de enfermedad era asintóticamente estable, es decir, la enfermedad tendía a desaparecer. Además, se comprobó que si $\mathcal{R}_0 > 1$, el punto de equilibrio endémico era asintóticamente estable, es decir, la enfermedad persistía en el tiempo. A continuación se procedió a analizar la sensibilidad de \mathcal{R}_0 con respecto a los parámetros del modelo. Así, primero, mediante las derivadas parciales de \mathcal{R}_0 con respecto a cada uno de los parámetros, se obtuvo \mathcal{R}_0 en función de un solo parámetro y se concluyó que esta era una función que crecía a medida que β_{n1} , β_{h2} , β_{m1} , β_{m2} aumentaban y decrecía al aumentar μ , γ , δ . Luego, utilizando el índice de sensibilidad normalizado se tomó como ejemplo $\gamma_{\delta}^{\mathcal{R}_0} = -\frac{1}{2}$, con lo cual se evidenció que cuando δ aumentaba en un 10 %, el \mathcal{R}_0 disminuía en un 54,5 %. Además, se evidenció que los valores de los índices de sensibilidad en valor absoluto no eran mayores que 0,5.

En las simulaciones numéricas, después de analizar varios escenarios, se pudo concluir que la movilidad afectó fuertemente la zona más pequeña, la zona 2, debido a que con la movilidad, la proporción de mosquitos en la zona 1 resultaba ser mucho más alta, aumentando la probabilidad de infección en los humanos de la zona 2 cuando pasaban tiempo en la zona 1. Por último, con los valores de los parámetros y las condiciones iniciales consideradas en las simulaciones se observó una relación directa de \mathcal{R}_0 con \mathcal{R}_{01} .

Debe enfatizarse que, con base en el modelamiento y los resultados de este estudio, se pueden diseñar estrategias para la reducción de infectados por el virus del dengue mediante la introducción de controles que tengan en cuenta que la movilidad y el tiempo de permanencia de los humanos en las zonas es una característica fundamental en la propagación de la enfermedad. Debe hacerse, además, un análisis de costo-beneficio de las estrategias para la ejecución efectiva de una política de control que logre disminuir el número de infectados por el virus del dengue y reducir sus costos.

Información suplementaria

Ver información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1604/3231>

Agradecimientos

Esta investigación fue parcialmente financiada por el programa de investigación N° 1106-852-69523 (Investigador principal: Héctor Martínez Romero; contrato: CT FP 80740-439-2020, Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación - MinCiencias), y CI-71241 (Universidad del Valle, Colombia).

Contribución de los autores

J.H.A.C. y A.M.L.A. concibieron la idea. J.H.A.C. dirigió la investigación y aportó su experticia. A.M.L.A. realizó los cálculos y simulaciones numéricas, el análisis de sensibilidad y un primer borrador del artículo. Los dos autores contribuyeron a la discusión e interpretación de los resultados.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses.

Referencias

- Arias, J., Martínez, H., Vasilieva, O.** (2020). Biological and Chemical Control of Mosquito Population by Optimal Control Approach, *Games*, 11(4), 62.
- Barrios, E., Lee, S., Vasilieva, O.** (2018). Assessing the effects of daily commuting in two-patch dengue dynamics: A case study of Cali, Colombia. *Journal of Theoretical Biology*, 453, 14-39.
- Castillo, C. & Brauer, F.** (2001). Mathematical models in population biology and epidemiology, Volumen 40, Springer-Verlag, 2001. p. 411-425.
- Chitnis, N., Hyman, J.M., Cushing, J.M.** (2008). Determining important parameters in the spread of malaria through the sensitivity analysis of a mathematical model. *Bulletin of mathematical biology*, 70(5), 1272-1296.
- Iggidr, A., Sallet, G., Souza, M.** (2016). On the dynamics of a class of multi-group models for vector-borne diseases. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 441(2), 723-743.
- Jacquez, J. & Simon, C.** (1993). Qualitative Theory of Compartmental Systems. *SIAM Review*, 35 (1), 43-79.
- Lasluisa, D., Barrios, E., Vasilieva, O.** (2019). Optimal strategies for dengue prevention and control during daily commuting between two residential areas. *Processes*, 7(4), 197.
- Martcheva, M.** (2015). An introduction to mathematical epidemiology (Vol. 61, pp. 9-31). New York: Springer.
- MinSalud** (2017), Plan nacional integral e interprogramático para la prevención, el control y la eliminación de las enfermedades infecciosas desatendidas 2013-2017. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/ET/2013%2007%20Plan%20Interprogram%C3%A1tico%20EID.pdf>
- Padilla, J., Rojas, D., Saénz, R.** (2012). Dengue en Colombia: Epidemiología de la reemergencia a la hiperendemia. Ministerio de Salud. p. 1-13.
- Sepúlveda, L.** (2015). Manejo óptimo y viable en modelos epidemiológicos de dengue. PhD tesis, Université Paris-Est.
- Smith, H.** (1995). Monotone Dynamical Systems: an introduction to the theory of competitive and cooperative system, 41, American Mathematical Soc.
- Travi, B. & Montoya, J.** (1994). *Manual de entomología médica para investigadores de América Latina*, fundación CIDEIM.
- Van den Driessche, P. & Watmough, J.** (2002). Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission. *Mathematical biosciences*, 180 (1), 29-48.
- Velandia, M. L. & Castellanos, J. E.** (2011). Virus del dengue: estructura y ciclo viral. *Infectio*, 15 (1), 33-43.

Opinión

La necesidad de una comunicación científica liderada por autores e instituciones

The need for scientific communication led by authors and institutions

Gerardo Tibaná Herrera

SENIOR CONSULTANT SCImago
gerardo.tibana@scimago.es

Resumen

La globalización de la ciencia sin duda ha traído muchas ventajas para el desarrollo de la sociedad en áreas como la salud y la tecnología, que no en vano son las áreas de mayor producción científica en el mundo. Sin embargo, el otro lado de la moneda es la invisibilidad de gran cantidad de trabajos científicos que quedan perdidos en el mar de información y conocimiento al que día a día se enfrentan los investigadores y los tomadores de decisiones. ¿Qué se puede hacer? Hacer la ciencia más visible, aprovechando las mismas herramientas utilizadas para identificar “lo que es tendencia”.

Palabras clave: Visibilidad de la ciencia; Métricas alternativas; Indicadores de impacto; Redes sociales; Posicionamiento web; Comunicación científica.

La ciencia desde sus inicios ha requerido de la comunicación para lograr sus objetivos y fortalecer sus características, es así como desde hace varios siglos se empezó a utilizar el formato de cartas para comunicarle a los colegas los hallazgos que se habían obtenido con el objetivo de recibir comentarios, ajustes y recomendaciones, lo que hoy llamamos revisiones (revisión por pares). Posteriormente las comunidades se organizaron y crearon sus propios canales de comunicación, las revistas, los congresos y otros escenarios para fortalecer los mismos objetivos, dar a conocer sus resultados y recibir retroalimentación, esta última convirtiéndose en pieza fundamental del sistema mundial de la ciencia (Nosek & Bar-Anan, 2012), al brindarle el carácter de validez, de rigurosidad y de calidad a los hallazgos.

La globalización de la información y el conocimiento está haciendo un llamado a ajustar dicho sistema, ya que hoy en día no son suficientes los canales de comunicación y divulgación tradicionales (físicos y presenciales), para que los hallazgos científicos sean conocidos y validados por comunidades que ahora son internacionales e interdisciplinarias.

Esta fue sin duda una de las razones que llevaron a que los editores tomaran la decisión de convertir sus revistas en revistas digitales, recorriendo en tiempo récord el camino de la apropiación tecnológica y el conocimiento necesario para estar presente en el mundo digital y de la Internet, con sus respectivos efectos directos en la comunidad de investigadores, como el cambio en el hábito de lectura (Tenopir *et al.*, 2009). Un buen y necesario paso, pero no suficiente. Un deber de la ciencia es rescatar su relación con la comunicación, adaptándose a lo que significa comunicar hoy en día, reconociendo sus estrategias, sus herramientas, la forma en la que se mide el impacto en la sociedad (Thelwall & Kousha, 2015), lo que es tendencia y lo que ésta última provoca en la opinión pública. Otro deber, es reconocer que la responsabilidad de la divulgación científica no recae sólo en los editores, cada actor del proceso esta llamado a contribuir de manera directa a que los resultados científicos sean más leídos y en la medida de lo posible más citados (reconocimiento de calidad científica).

Se trata entonces de aprovechar la Comunicación actual, dominada por la presencia en internet y en las redes sociales, integrando nuevos elementos en el sistema, como son las métricas alternativas (Arcila-Calderón *et al.*, 2019), la medición del impacto social (González-Pereira *et al.*, 2010) el perfil del investigador en redes sociales y académicas (Tibaná, 2021) y el posicionamiento web de las instituciones (Abrizah *et al.*, 2010).

Este nuevo perfil del investigador requiere obviamente de su capacidad de generar nuevo conocimiento, pero además una nueva competencia, la de aprovechar las herramientas de la comunicación para lograr que sus resultados sean vistos por una mayor audiencia que la propia de la revista en la que publicó.

Como consecuencia de aprovechar las redes sociales y los perfiles académicos se obtiene un alto nivel de transparencia sobre el impacto que tienen los hallazgos científicos en la sociedad en general, lo cual complementa el impacto científico, ya que el uno alimenta el otro y viceversa, es lo que se llama Visibilidad de Autor (Tahamtan *et al.*, 2016).

Finalmente, esta carta es una invitación abierta para que desde nuestro rol de investigadores, reconociendo la necesidad de divulgar cada día a una mayor audiencia interdisciplinar nuestros hallazgos y propuestas, seamos participantes activos de las iniciativas en redes sociales y de divulgación que nos proponen los editores, las oficinas de comunicación científica de nuestras instituciones, aumentando significativamente la posibilidad de acceso a nuestros trabajos y al reconocimiento social y científico de su calidad.

Referencias

- Abrizah, A., Noorhidawati, A., & Kiran, K. (2010). Global visibility of Asian universities' Open Access institutional repositories. In *Malaysian Journal of Library & Information Science*, 15(3).
- Arcila-Calderón, C., Calderín-Cruz, M., & Sánchez-Holgado, P. (2019). Adopción de redes sociales por revistas científicas de ciencias sociales. *El Profesional de La Información*, 28(1). <https://doi.org/10.3145/epi.2019.ene.05>
- González-Pereira, B., Guerrero-Bote, V. P., & Moya-Anegón, F. (2010). A new approach to the metric of journals' scientific prestige: The SJR indicator. *Journal of Informetrics*, 4(3), 379-391. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.03.002>
- Nosek, B. A., & Bar-Anan, Y. (2012). Scientific Utopia: I. Opening Scientific Communication. *Psychological Inquiry*, 23(3), 217-243. <https://doi.org/10.1080/1047840X.2012.692215>
- Tahamtan, I., Safipour Afshar, A., & Ahamdzadeh, K. (2016). Factors affecting number of citations: a comprehensive review of the literature. *Scientometrics*, 107(3), 1195-1225. <https://doi.org/10.1007/s11192-016-1889-2>
- Tenopir, C., King, D. W., Edwards, S., & Wu, L. (2009). Electronic journals and changes in scholarly article seeking and reading patterns. *Aslib Proceedings*, 61(1), 5-32. <https://doi.org/10.1108/00012530910932267>
- Thelwall, M., & Kousha, K. (2015). Web indicators for research evaluation. Part 1: Citations and links to academic articles from the Web. *El Profesional de La Información*, 24(5), 587. <https://doi.org/10.3145/epi.2015.sep.08>
- Tibaná, G. (2021). *Cinco recomendaciones para mejorar la Visibilidad Científica*. <https://www.Scimagolab.Com/5-Recomendaciones-Para-Mejorar-La-Visibilidad-Cientifica/>

Las grandes manchas de plásticos en los océanos

The big plastic stains in the oceans

✉ Jaime R. Cantera K^{1,*}, 🌐 Andrés Franco-Herrera²

¹ Profesor Titular Emérito. Universidad del Valle, Departamento de Biología, Grupo de Investigación Ecología de Estuarios y Manglares ECOMANGLARES.
jaime.cantera@correounivalle.edu.co

² Profesor Titular. Vicerrector Académico. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Grupo de Investigación Dinámica y Manejo de Ecosistemas Marino-Costeros

Hace algunos años se empezó a describir la existencia de unas “islas” de plásticos en los océanos formadas por la acumulación de estos materiales de difícil degradación, cuyas características flotantes permiten que la convergencia de las corrientes marinas las acumule en algunos lugares del mundo. Para comprender su formación, es importante destacar los factores que generan las corrientes marinas. El principal factor determinante de la circulación oceánica es el viento mediante la fuerza de fricción sobre la superficie que ocasiona desplazamientos del agua superficial, la cual es inmediatamente reemplazada con otra masa de agua como consecuencia de la ley de continuidad. Las corrientes superficiales no se mueven directamente en la dirección en que el viento sopla y modifican, además, la dirección en la columna de agua hasta generar en la parte más profunda una corriente más débil, pero en la dirección contraria a la de la acción del viento. A estos dos fenómenos se los conoce como transporte y espiral de Ekman, respectivamente. El transporte neto se da a 45 ° con respecto a la dirección del viento y tiene como consecuencia que en los dos hemisferios del planeta se formen corrientes oblicuas a la dirección de los vientos dominantes, denominadas grandes giros anticiclónicos.

Además de estas fuerzas “generadoras” de corrientes, existen otras que pueden modelar la circulación: 1) la gravedad, que actúa sobre los movimientos de ascenso (surgencia) y descenso (hundimientos); 2) los gradientes de presión que se crean por las diferencias de densidad y la consecuente estratificación de las capas de agua; 3) la rotación de la Tierra, que modifica, al menos aparentemente, la dirección de los desplazamientos de las masas de agua a partir de la fuerza relativa de Coriolis, y 4) la presencia y distribución de continentes, que también modelan y reorientan la dirección del desplazamiento de las corrientes por el choque de estas contra las masas sólidas.

Toda esta dinámica de fuerzas, asociadas al acoplamiento océano-atmósfera, hacen que las corrientes marinas arrastren todas las partículas flotantes, incluida la basura plástica, y cause su agrupamiento en “islas de plástico”. En ese proceso, el plástico inicialmente se va fraccionando y desintegrando por la acción del ambiente (las olas, el Sol y, posiblemente, los organismos), formando partículas cada vez más pequeñas que se conocen como microplásticos y que tienen mayores implicaciones para los organismos.

Actualmente, se habla de siete islas de plásticos que incluyen desde las primeras que la NOAA predijo en 1988, hasta la mancha de residuos plásticos descubierta en el océano Pacífico y documentada por el capitán y oceanógrafo Charles Moore en 1997, quien la avistó en una regata de Hawái a California. Estas siete islas de plásticos documentadas son (**Stop plásticos**, 2021):

1. la isla del océano Pacífico Norte, localizada entre California y el archipiélago hawaiano. Es la más grande y, aunque su tamaño real es difícil de estimar, se calcula que puede tener entre 700.000 y 10'000.000 km², con un total de basura que oscila entre 3.000.000 y 100.000.000 de toneladas (**Greenteach**, 2020);

2. la isla del Atlántico Norte, con cerca de 4.000.000 km² y una alta densidad de residuos (200.000 residuos/km²);
3. la isla del Atlántico Sur, situada entre Sudamérica y el sur de África, con 1.000.000 km², la cual se mueve por acción de la corriente del Atlántico Sur;
4. la isla del mar de los Sargazos, con residuos fácilmente reconocibles (botellas de champú, aparejos de pesca, contenedores rígidos, bolsas);
5. la isla del océano Pacífico Sur, localizada frente a las costas de Chile y Perú, con una superficie de unos 2,6 km² y conocida por estar conformada por microfragmentos de materiales plásticos;
6. la isla del océano Índico, descubierta en el 2010, tiene una extensión discontinua de más de 2 km y una densidad estimada de 10.000 residuos/km², y
7. la isla del Ártico, descubierta en el 2013 en el círculo polar ártico, que se considera la más pequeña.



Fuente: Stop plástico, 2021

Se cree que existen otras en algunos mares interiores como el Mediterráneo.

Es difícil determinar con exactitud las dimensiones de estas islas, ya que no se pueden abarcar completamente desde un barco y tampoco se puede saber la medida exacta con satélites, porque no todos estos plásticos están flotando en la superficie, por lo que es difícil ver una mancha sólida a tanta distancia y, además, se encuentran a la deriva debido a los vientos, corrientes y temporales, aunque se considera que la cantidad de plásticos aumenta con el tiempo. La mayoría de los plásticos son residuos de redes de pesca abandonados, pero también microplásticos (94 %), que, aunque son abundantes, no representan un gran peso (solo el 8 %).

Los plásticos afectan el océano de diferentes maneras (**Chatterjee & Sharma, 2020**): los más grandes (megaplásticos, mayores a 1 m), tienen un mayor impacto sobre mamíferos marinos como ballenas, orcas, delfines, focas y, en algunos casos, tortugas. Los macropásticos y mesoplásticos (entre 1 y 2,5 cm) pueden afectar a tiburones, otros peces comerciales y aves marinas, en tanto que los microplásticos (menores a 5 mm), a peces pequeños, moluscos y crustáceos. Por último, los nanopásticos pueden causar efectos potencialmente dañinos a organismos del zooplancton. Los microplásticos también liberan sustancias tóxicas que afectan el agua y a los seres vivos que la habitan y llegan a hacer parte de las redes tróficas marinas. Esto se ha comprobado por el hallazgo de una gran cantidad de organismos asociados a dichas manchas (**ONU, 2018**).

Ha habido intentos de remover estas islas de plástico del océano; algunas organizaciones, como The Ocean Cleanup, han utilizado un sistema de tubos que constituyen una especie de barrera gigante de cerca de 600 m de largo que flota en forma de “U” y dispone de

una pantalla subacuática de 3 m para retener los residuos plásticos que se hayan hasta esa profundidad. Este sistema presenta algunos riesgos para la fauna marina, aunque se considera que las ventajas pueden superar el riesgo (Wetzel, 2021).

Conflicto de intereses

Ninguno que declarar

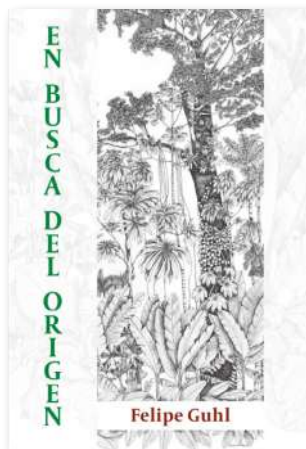
Referencias

- Stop plástico.** (2021) <https://www.stopplastico.org/islas-de-plastico/>
- Chatterjee, S., Sharma, S.** (2020). Microplastics in our oceans and marine health. pp 54-61. Arnaud F (dir.) Field Actions Science Reports, Special Issue 19 | 2019, « Reinventing Plastics » [Online], Online since 01 March 2019, connection on 03 February 2020. URL: <http://journals.openedition.org/factsreports/4993>
- Greenteach.** (2020). <https://www.greenteach.es/isla-de-plastico-del-pacifico-limpieza/>
- ONU.** (2018). <https://www.unenvironment.org/es/news-and-stories/reportajes/obstaculos-para-limpiar-la-gran-isla-de-basura-del-pacifico>
- Wetzel, C.** (2021) <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/the-great-pacific-garbage-patch-hosts-life-in-the-open-ocean-180979168/>



Fuente: Stop plástico, 2021. Comisión Europea

Comentario bibliográfico



Guhl, F. (2021) *En busca del origen*. Bogotá: Universidad de los Andes - Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Villegas Editores, 344 p.

En busca del origen

Un científico es necesariamente un buscador. El *Diccionario de la Real Academia Española* trae tres acepciones para este término: “a- Que busca; b- Anteojo pequeño de mucho campo que forma cuerpo con los telescopios, refractores y reflectores para facilitar la observación —habría que incluir al microscopio en esta definición—; c- Programa que permite acceder a información en internet sobre un tema determinado”. El buscador es diferente al “buscón”, a pesar de que el mismo diccionario tiene, para este segundo término, una primera acepción que es idéntica: “Que busca”. Pero el buscón se entiende mejor como un *vagamundo*, a la manera de don Pablos (así, con ese), el personaje literario que creó **Francisco de Quevedo y Villegas** en 1626.

Felipe Guhl Nannetti, hijo del profesor Ernesto Guhl Nimitz (1915-2000) y profesor emérito de la Universidad de los Andes, miembro numerario de la Academia de Ciencias y *fellow* de la Linnean Society de Londres, es un buscador, no un buscón, a pesar de ser, a su manera, un *vagamundo*. En su libro más reciente, titulado *En busca del origen* y editado por Benjamín Villegas con el apoyo de la Universidad de los Andes y la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Guhl Nannetti busca el origen de una teoría y del mecanismo que logró fundamentarla a mediados del siglo XIX: la evolución por selección natural. Aunque usualmente se cita a **Darwin** como el origen individual de esta teoría en función de su libro *On the origin of species by means of natural selection, or, The preservation of favoured races in the struggle for life* (1859), es claro que, tal y como el autor lo sustenta en esta obra a partir de las páginas 11 y 12 de su Presentación, “las ideas propuestas por Wallace fueron analizadas por Darwin y sirvieron como el detonante para que publicara de manera acelerada su teoría de la evolución” y debe considerársela, en consecuencia, como la teoría “de Darwin y Wallace”.

Después de este postulado, y antes de pasar de la Presentación a la Introducción del libro, el lector encontrará un muy estimulante Prólogo de quince páginas escrito por el sociólogo Guillermo Páramo Rocha, profesor emérito y doctor *honoris causa* de la Universidad Nacional, además de miembro honorario de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. En este, el profesor Páramo interpreta bien la asimetría en el reconocimiento histórico de Darwin y de Wallace en función del “efecto Mateo”, que explica —en palabras de un premio Nobel en física anónimo reportadas por **Robert K. Merton** en su artículo original en *Science* (1968)— cómo “aquel que es mejor conocido obtiene más crédito, una excesiva cantidad de crédito”.

Pero más allá de una revisión sobre el desarrollo simultáneo en las mentes de Darwin y Wallace de una teoría hoy fundamental para entender el vínculo entre todos los seres vivos del planeta, a la vez presentes y ausentes —a la manera de la tabla periódica de Dimitri Mendeléyev (1834-1907), con la que demostró la relación fisicoquímica que habría entre todos los elementos de la naturaleza, señalando las hipotéticas propiedades de los que aún faltaba descubrir—, y después de relatar en el primer capítulo la formación de Alfred Russel Wallace (1823-1913) en Inglaterra, la obra de Guhl Nannetti se centra en sus exploraciones en la Amazonia entre 1848 y 1852. Este es tal vez el principal aporte de esta obra a la literatura científica y a la historia de los viajeros naturalistas del siglo XIX en los territorios suramericanos: en particular, en los que hoy corresponden a Colombia.

Este aporte básico incorpora un valor adicional, ya que la obra también revela cada uno de los detalles de la travesía de Wallace después de haber seguido rigurosamente, paso a paso, a través de 2.175 kilómetros, su trayecto “colombiano” por los ríos Vaupés

y Guainía, más de 170 años después del viaje original. Es así que, como lo propuse al iniciar esta reseña, Felipe Guhl Nannetti resulta ser también un *vagamundo*, definido por el *Diccionario de la Real Academia Española* bajo el término “vagabundo”, específicamente en su segunda acepción, como “ambulante o que va de un lugar a otro sin asentarse en ninguno”, a la manera de un viajero naturalista, que, en razón del vínculo institucional británico de Felipe en su calidad de *fellow* de la Linnean Society de Londres, podría ser, también, de un viajero naturalista victoriano. Basta contemplar su atuendo, su expresión y su compostura en la foto de la página 339 que cierra el libro complementando la nota autobiográfica del autor.

Al avanzar en esta breve reseña de una obra que no dudo será clásica en nuestro medio, y que seguramente se comentará profusamente el año entrante en nuestro país cuando se celebre el bicentenario del nacimiento de Alfred R. Wallace, debe considerarse también el “efecto Amadeus”, referido igualmente por el profesor Páramo en su Prólogo, como “[el que limpia el efecto Mateo] de las calidades que cuenten como imperfecciones”. En torno a este, se pregunta Páramo: “¿Por qué el efecto Amadeus no ha actuado con suficiente eficacia sobre la imagen que se tiene [o no se tiene, diría yo] de Wallace?”.

Un detalle esencial para entender los cimientos menos visibles de la representación conjunta de Darwin y Wallace en la historia de la ciencia, se desprende del capítulo VIII, titulado “Un delicado arreglo a la distancia”, en el que el autor relata la consolidación del momento histórico de la exposición conjunta de los aportes de Darwin y de Wallace en la Sociedad Linneana de Londres el jueves 1º de julio de 1858, día en el que se formalizó la coautoría de la teoría de la evolución y su mecanismo fundamental: la selección natural de las especies.

La carta de Charles Lyell y Joseph D. Hooker al secretario Joseph Bennett de la Linnean Society de Londres, firmada en esa ciudad el miércoles 30 de junio de 1858 y escrita para introducir los textos originales de Darwin y de Wallace —carta que menciona Guhl en la página 272 de su obra, sin transcribirla—, es crítica para entender el “delicado arreglo”. En consecuencia, tal vez convendría incluir en las ediciones sucesivas de *En busca del origen* “los respectivos trabajos en el orden establecido por los defensores de Darwin” que fundamentaron su precedencia, tal y como fueron referidos en su momento por ellos mismos (Lyell & Hooker, 1858):

1. Extractos de un trabajo manuscrito sobre las especies (este trabajo manuscrito nunca estuvo destinado a la publicación y, por lo tanto, no fue escrito con cuidado) del Sr. Darwin, esbozado en 1839 y copiado en 1844, cuando la copia fue leída por el Dr. Hooker y su contenido posteriormente comunicado a Sir Charles Lyell. La primera parte está dedicada a “La variación de los seres orgánicos bajo la domesticación y en su estado natural”; y el segundo capítulo de esa parte, del que proponemos leer a la Sociedad los extractos referidos, se titula “Sobre la variación de los seres orgánicos en estado natural; sobre los medios naturales de selección; sobre la comparación de las razas domésticas y las verdaderas especies”.
2. Un resumen de una carta privada dirigida al profesor Asa Gray, de Boston, Estados Unidos, en octubre 4 de 1857, por el Sr. Darwin, en la que repite sus puntos de vista y muestra que éstos permanecieron inalterados desde 1839 hasta 1857.
3. Un ensayo del Sr. Wallace titulado “Sobre la tendencia de las variedades a apartarse indefinidamente del tipo original”, que fue escrito en Ternate en febrero de 1858 para que lo leyera su amigo y corresponsal, el Sr. Darwin, y según su deseo expreso, lo enviara a Sir Charles Lyell si lo consideraba suficientemente novedoso e interesante. El Sr. Darwin apreciaba tanto el valor de los puntos de vista expuestos, que en una carta a Sir Charles Lyell propuso obtener el consentimiento del Sr. Wallace para la publicación del ensayo lo antes posible.

Esta medida nos pareció muy bien, siempre que el Sr. Darwin no ocultara al público, como estaba muy inclinado a hacerlo (en favor del Sr. Wallace), la memoria que él mismo había escrito sobre el mismo tema y que, como ya se ha dicho, uno de nosotros había leído en 1844, y cuyo contenido habíamos conocido ambos durante muchos años. Al comentarle esto al Sr. Darwin, nos dio permiso para hacer el uso que consideráramos oportuno de sus memorias, etc.

Y al adoptar nuestro curso actual, de presentarlo a la Sociedad Linneana, le hemos explicado que no estamos considerando únicamente las reivindicaciones relativas a la prioridad de él y de su amigo, sino los intereses de la ciencia en general; porque creemos que es deseable que los puntos de vista fundados en una amplia deducción de los hechos, y madurados por años de reflexión, constituyan a la vez una meta de la que otros puedan partir, y que, mientras el mundo científico espera la aparición de la obra completa del Sr. Darwin, algunos de los principales resultados de sus trabajos, así como los de su hábil corresponsal, deberían ser expuestos conjuntamente al público.¹

Este fue el delicado y elegante arreglo británico que dio cuenta de la sorprendente coincidencia de este hallazgo científico en el siglo XIX.

Y hablando de coincidencias científicas, un punto clave para comprender la pertinencia de la nueva publicación de Felipe Guhl, punto que el autor omite muy discretamente en su obra sobre Wallace —particularmente en la página 297 del capítulo IX titulado “La línea Wallace y el ordenamiento biogeográfico del planeta” en la que comenta la obra *Island life* (Wallace, 1880)—, es la mención de sus propios trabajos en la investigación de campo de la biogeografía isleña. En efecto, hace más de 40 años, en compañía de Henry von Prahll y Max Grögl, Felipe publicó una obra titulada *Gorgona* (von Prahll *et al.*, 1979), en la que analizaron una interesante serie de vertebrados e invertebrados marinos y terrestres con la participación de estudiantes y profesores de varias universidades colombianas. Tal y como lo afirmé hace más de una década en un comentario que hice a su ponencia en la Academia Nacional de Medicina con ocasión de la sesión conjunta con la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales para conmemorar el segundo centenario del nacimiento de Charles Darwin (Guhl, 2009)—, es evidente que “si los ingleses, refiriéndome a Darwin y a Wallace, no hubieran ya resuelto el modelo de la evolución con otro tipo de especímenes aislados, von Prahll, Guhl y Grögl hubieran tenido a la mano una de las series biológicas más informativas para proponerlo” (Gómez-Gutiérrez, 2009).

Para finalizar esta reseña, debe exaltarse la calidad gráfica de la obra. Esta contiene, además de una reproducción en alta y a color del mapa plegable original de Wallace del Río Negro y sus afluentes, un número importante de fotografías y dibujos originales de Wallace, y las muy bellas ilustraciones de Camila Pizano para las cuales sería útil incluir un índice con sus títulos respectivos, especialmente el de la magnífica ilustración de la portada que, con su notable calidad artística, recuerda los grabados de los viajeros franceses siglo XIX.

Así, después de haber publicado hace casi dos décadas la obra *El pensamiento biogeográfico de Alfred Russel Wallace* (Bueno-Hernández & Llorente-Bousquets, 2003) basada en una revisión histórica de la biogeografía dispersionista (Bueno-Hernández & Llorente-Bousquets, 2000), la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, en asocio con la Universidad de los Andes y Villegas Editores, ha puesto en manos de los lectores una obra de referencia para la historia de dos viajeros naturalistas en Colombia: Alfred Russel Wallace y Felipe Guhl Nannetti.

Alberto Gómez Gutiérrez, PhD, FLS

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

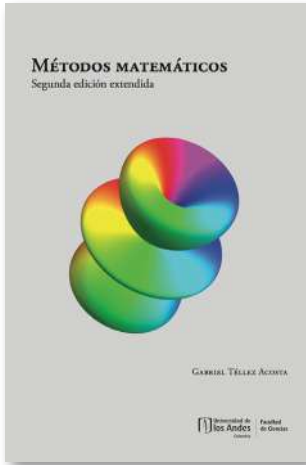
Referencias

- Bueno-Hernández, A. & Llorente-Bousquets, J.** (2000) Una visión histórica de la biogeografía dispersionista con críticas a sus fundamentos. *Caldasia*, 22(2), 161-184.
- Bueno-Hernández, A. & Llorente-Bousquets, J.** (2003). *El pensamiento biogeográfico de Wallace*. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 191 p.
- Darwin, C.** (1858). Extract from an unpublished work on species by C. Darwin, Esq., consisting of a portion of a chapter entitled ‘On the variation of organic beings in a state of nature; on the natural means of selection; on the comparison of domestic races and true species; on the tendency of species to form varieties; and on the perpetuation of varieties. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 3(9), 46-53.

¹ Traducción del inglés al español por el autor de la presente reseña.

- Darwin, C.** (1859). *On the origin of species by means of natural selection, or, The preservation of favoured races in the struggle for life*. London: John Murray, 502 p.
- Gómez-Gutiérrez, A.** (2009). "Darwin en Colombia". *Medicina*, 31(84), 54-59.
- Guhl, F.** (2009). Darwin en Suramérica. *Medicina*, 31(84): 44-53.
- Lyell, C. & Hooker J. D.** (1858). On the tendency of species to form varieties, and on the perpetuation of varieties. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 3(9), 45-46.
- Merton, R. K.** (1968) The Matthew Effect in Science. *Science*, 159(3810), 56-63.
- Quevedo y Villegas, F.** (1626). *Historia de la vida del Buscón, llamado don Pablos; ejemplo de vagamundos y espejo de tacaños*. Zaragoza: Pedro Vergés.
- Van Wyhe, J. & Rookmaaker, K.** (2012). A new theory to explain the receipt of Wallace's Ternate essay by Darwin in 1858. *Biological Journal of the Linnean Society*, 105, 249-252.
- von Prahl, H., Guhl, F., Grögl, M.** (1979). Gorgona. Bogotá: Universidad de los Andes, 279 p.
- Wallace, A. R.** (1858). On the tendency of varieties to depart indefinitely from the original type. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 3(9), 53-62.
- Wallace, A. R.** (1880). *Island life, or the phenomena and causes of insular faunas and floras, including a revision and attempted solution of the problem of geological climates*. London: Macmillan and co, 526 p.

Comentario bibliográfico



Gabriel Tellez-Acosta
Universidad de los Andes,
Bogotá Colombia 2022

Métodos matemáticos. Segunda edición extendida

Más que una construcción abstracta, la matemática constituye un lenguaje universal basado en la lógica y con un componente pragmático innegable. Entre las diferentes esferas que constituyen el conocimiento científico, la matemática tiene un papel importante, como sucede en las ciencias exactas, por su precisión y rigurosidad, características esenciales de la aplicación del método científico. Por ello, en la formación académica en campos como la física, la química o las ingenierías (mecánica, electrónica, informática, entre otras), tener destreza en el uso de herramientas de matemática básicas y avanzadas es de gran utilidad. Aunque hay obras de muy buena calidad que abordan varios de los temas tratados en el libro *Métodos matemáticos*, no siempre es fácil hallar un equilibrio entre la rigurosidad matemática y la aplicabilidad de estos métodos a problemas específicos como lo logra esta obra, la cual ha sido una herramienta esencial para el aprendizaje y la formación de lectores de diferentes disciplinas por su claridad, concisión y, sobre todo, por la forma agradable de presentar temas de matemáticas no necesariamente simples de abordar.

El documento está ordenado en diez capítulos articulados entre sí para facilitar su comprensión. Cada uno de ellos tiene una estructura bien definida en la que alternan la presentación de la teoría (definiciones, teoremas, lemas, etc.), ejemplos y ejercicios cuidadosamente elegidos. Dichos ejercicios se incorporan al final de cada capítulo a manera de retos para el lector, facilitando así la asimilación del contenido y la motivación para el autoaprendizaje. En el marco de esta estrategia, el autor recurre a una continua reflexión y asimilación del contenido a medida que se exponen los temas. El libro está escrito de tal manera que exige del lector interesado unos mínimos requerimientos de cálculo diferencial e integral. Además, es una obra muy versátil y puede ser una excelente fuente de consulta para lectores que ya conocen estos temas, o para docentes universitarios que estén interesados en emplearlo como guía.

La obra empieza con el estudio de funciones de variable compleja, haciendo énfasis en las propiedades de las funciones analíticas y holomorfas, e incluye las condiciones de Cauchy-Riemman pasando por una exposición de teoremas integrales como el de Cauchy y el de los residuos, que permiten resolver no solo integrales en variable compleja con integrandos que contengan polos, sino también aquellos de variable real que entrañan un especial desafío, pero que pueden resolverse de manera elegante en representación compleja mediante los teoremas mencionados. En la obra se hace un particular esfuerzo en las series de Laurent y su uso para calcular o identificar residuos, lo que es muy útil para la solución de problemas de magnetostática, (Salazar *et al.*, 2021).

El libro prosigue con una exposición de la teoría de las distribuciones, presentando formalmente definiciones de los espacios y propiedades de esta generalización de las funciones, así como operaciones entre ellas que definen el álgebra de convoluciones. Aquí el autor presenta propiedades de derivación de funciones y distribuciones muy útiles en ciencias e ingeniería, como la función de Heaviside y el delta de Dirac, así como para el cálculo de valores principales, o parte finita, que involucran ciertas funciones. En esta sección se ilustra la aplicación de estos formalismos en teoría potencial, útil para la solución de problemas en electromagnetismo, gravitación y para la determinación de funciones de Green orientadas a la solución de ecuaciones diferenciales ordinarias no homogéneas con aplicaciones en circuitos, señales y sistemas lineales.

La obra aborda el tema de las series de Fourier haciendo una exposición estándar y compacta, enfocada en la descomposición de funciones y distribuciones periódicas en exponenciales complejas. En este capítulo el lector se sumerge en una variedad de aplicaciones en las que la expansión en series armónicas, en particular, ayuda en la solución de ecuaciones diferenciales parciales lineales, como la ecuación de calor o la ecuación de onda, entre otras. En este contexto, el autor también presenta las transformadas de Fourier, resaltando su componente pragmático en la teoría de señales y en la relación de Plancherel-Parseval, en problemas de difracción de la luz, y en la ecuación de Poisson para una carga puntual en R^n . También se aborda la transformada de Laplace de funciones y distribuciones, demostrando claramente transformadas de derivadas y demás propiedades. La obra hace particular énfasis en el cálculo de la transformada inversa que, en ocasiones, resulta complicado por la naturaleza de las integrales a resolver. En este punto el autor expone técnicas muy útiles para el cálculo de transformadas inversas llevándolas al plano complejo, en el que el teorema de los residuos, con un adecuado contorno de integración, permite el cálculo exacto de estas transformadas inversas que, de otra manera, serían un desafío aún mayor.

Una de las características que tiene esta obra y que la diferencia de otras dedicadas a métodos matemáticos, consiste en un especial esfuerzo para mostrar los vínculos que tienen estos formalismos con otras áreas del conocimiento. En este sentido, el autor consagra un capítulo entero a las ecuaciones de la Física en el que expresamente ilustra cómo estas se aplican en la solución de problemas que los científicos han enfrentado históricamente. Entre las situaciones abordadas se encuentra la aplicación de la transformada de Fourier en la determinación de la función de Green con el operador de D'Alembertiano aplicado a la solución de la ecuación de onda no homogénea asociada al potencial electromagnético (Jackson, 1999), así como la aplicación de los polinomios de Legendre en la solución de la ecuación de Laplace en R^3 ; el uso de la función generatriz de estos polinomios para el potencial de Coulomb, con aplicaciones en expansión multipolar del campo eléctrico de distribuciones electrostáticas; la construcción de funciones esféricas y su relación con el momento angular en mecánica cuántica, el empleo de las funciones de Bessel y la transformación de Hankel en problemas con simetría axial, entre otros. El libro continúa con una presentación de la teoría de Sturm-Liouville en la que se exponen de forma general las propiedades de ortogonalidad, ceros y comportamiento asintóticos de las soluciones, así como la construcción de las funciones de Green del operador autoadjunto definido en el problema de Sturm-Liouville en términos de sus valores y vectores propios. En mi opinión, esta forma de exponer la teoría permite visualizar de forma más general el contenido de los capítulos anteriores, como sucede con las funciones de Bessel, que son soluciones particulares del problema de Sturm-Liouville. Guardando estas conexiones, el libro continúa con una exposición de los polinomios ortogonales. Este tema fácilmente puede ser objeto de un libro entero, sin embargo, el autor presenta de una manera eficaz y compacta la teoría básica de polinomios ortogonales clásicos, incluidas las relaciones de recurrencia, los operadores de escalera, y la normalización de estos polinomios, entre ellos los polinomios de Gegenbauer (que comprenden como casos particulares los polinomios de Hermite, Laguerre y Jacobi), de Chebycheb y de Legendre, estos últimos de importancia en la solución de la ecuación de Schrödinger y del problema del potencial central, incluido el modelo cuántico del átomo de hidrógeno (Cohen-Tannoudji *et al.*, 1986).

El libro también ofrece una introducción al estudio de las soluciones de ecuaciones diferenciales cercanas a puntos singulares, en la que se destaca la presentación de la ecuación diferencial de Riemann y su reducción a la ecuación hipergeométrica que deriva en la presentación de la función hipergeométrica de Gauss, la cual es de gran interés dado que aparece en innumerables sistemas físicos, como los plasmas en dos dimensiones (Shakirov, 2011).

La obra finaliza con una presentación de las funciones elípticas: comienza con la función P de Weierstrass, las funciones theta, y las funciones elípticas de Jacobi, para terminar introduciendo las integrales elípticas de primero y segundo tipo. Aquí el autor

propone al lector de manera pedagógica el empleo de las funciones elípticas para el análisis del péndulo simple no linealizado y el modelo de Ising bidimensional, lo que, desde mi óptica, es acertado porque ayuda a apuntalar el contenido mediante aplicaciones puntuales.

En resumen, el libro compila de una manera eficiente un gran número de temas relacionados con los métodos matemáticos, presentándolos de una manera concisa y clara, y conectándolos directamente con sus aplicaciones, lo cual lo convierte en una obra deleitable para comprender este extraordinario mundo de las matemáticas.

Robert Salazar

Ph.D en Física

Vicerrectoría de Investigación - Dirección de Ciencias Básicas

Universidad ECCI, Bogotá, Colombia

Referencias

- Salazar, R., Téllez, G., Bayona-Roa, C.** (2021). Expansion formula for the magnetic field of a periodically deformed circular current loop. *Physica Scripta*, 96(12), 125502. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac1a4e>
- Jackson, J.D.** (1999). Classical electrodynamics 3rd ed John Wiley & Sons, Inc., New York, NY. p. 240.
- Cohen-Tannoudji, C., Diu, B., Laloe, F.** (1986). Quantum mechanics, volume 1, Wiley-VCH, USA. p. 898.
- Shakirov, S.** (2011). Exact solution for mean energy of 2d dyson gas at $\beta=1$. *Physics Letters A*, 375(6), 984-989. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2011.01.004>

Club de revistas



Portada de Science

El Consorcio *Telómero a Telómero* (T2T) ha completado la secuencia de un desafiante 8% del genoma humano que quedó sin resolver en el Proyecto Genoma Humano. En esta visualización, cada cromosoma comienza en la parte inferior derecha y se envuelve alrededor de un centro tácito, con los cromosomas X y 1 a 22 dispuestos de afuera hacia adentro (el cromosoma Y no se muestra). Las regiones recién completadas se resaltan en rojo.

Gráfico: V. Altounian/Ciencia
Datos: Consorcio T2T

Sergey Nurk, Sergey Koren, Arang Rhie, Mikko Rautiainen, et al. (2022).

The complete sequence of a human genome. *Science* 2022, Vol. 376, No. 6588, pp. 44-53. <https://doi.org/10.1126/science.abj6987>

El genoma humano: llenando los vacíos

Hace más de 20 años, en febrero 15 y 16 del año 2001, las revistas *Nature* y *Science* publicaron la secuencia de nucleótidos que muchos llamaron “completa” del genoma humano (**International Human Genome Sequencing Consortium, 2001; Venter et al., 2001**). Sin embargo, lo que se reportó fue apenas una primera aproximación a la totalidad del genoma que cubría cerca del 92% de las secuencias de individuos seleccionados, correspondiente a la fracción cromosómica que se asocia a la eucromatina que se tiñe más fácilmente con coloraciones para ADN por estar más compactada. Se dejó por fuera la fracción restante del 8% (heterocromatina), compuesta por secuencias típicamente repetitivas consideradas en ese entonces genéticamente inactivas (llamadas satelitales), localizadas tanto en los extremos de los cromosomas, o telómeros, como alrededor de los centrómeros —la parte del cromosoma por donde el huso mitótico o meiótico tracciona los cromosomas para separarlos en las dos nuevas células hijas—.

Hace unos días, el 1 de abril de 2022, cerca de 22 años después de haberse concluido en los laboratorios los análisis que permitieron esta primera aproximación, el consorcio T2T (sigla que remite en inglés a *Telomere-to-Telomere*), publicó en la revista *Science* lo que se tituló propiamente como la “Secuencia completa de un genoma humano” (**Nurk et al., 2022**). Y este título se refiere a “un” solo genoma humano, porque esta secuencia completa se hizo a partir del ADN de una célula particular de una mujer que la desarrolló en su placenta sin el aporte de uno de los genomas parentales. Este tipo de célula puede convertirse en una Mola Hidatiforme Completa (o CMH, por su acrónimo en inglés) y no es viable. Generalmente la CMH es resultado de la pérdida del componente materno en el ADN nuclear con la duplicación del complemento paterno, resultando, en este caso, en un cariotipo homocigoto 46, XX (como si fuera de una mujer), producto de una duplicación simple de la información contenida en 23 cromosomas de un solo individuo: gracias a esta estrategia se logró la clave técnica que permitió analizar la secuencia de este genoma con mayor facilidad. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el genoma reportado como T2T-CMH13 por este equipo de 100 investigadores provenientes de Estados Unidos, Rusia, Alemania, Croacia y Gran Bretaña incluye información sobre 23 cromosomas correspondientes a la serie completa de los autosomas (del 1 al 22) y a un solo cromosoma sexual (el cromosoma-X) en calidad de cromosoma 23: así es que este “genoma completo” no incluye aún información sobre el cromosoma-Y asociado al género masculino.

En todo caso, este reporte trae información sobre más de 3.400 genes previamente desconocidos (79 de los cuales parecen ser codificantes) y, como lo muestra un extracto de la **tabla 1** original de esta publicación, porcentajes variables de diferentes marcadores genéticos repetitivos o satelitales.

Además de esta proeza científica, cuyos aspectos principales se incluyen en el extracto de la **figura 1** original, la misma edición de la revista *Science* de abril 1 de este año trae una sección especial con diferentes consideraciones y reportes complementarios como el de **Gershman et al.** (2022), con el análisis de los patrones “epigenéticos” de esta secuencia genómica: es decir, lo que va más allá de la serie de nucleótidos reportada por el T2T en un estudio supragénico de alta resolución con las modificaciones no nucleotídicas que se presentan en las regiones correspondientes al 8% revelado en los brazos cortos de cromosomas acrocéntricos enteros, telómeros y diversas clases de repeticiones. Este análisis proporciona un marco que permitirá investigar la regulación de las regiones más difíciles del genoma humano, proporcionando información sobre los determinantes epigenéticos que controlan la actividad genética y la función celular.

Tabla 1. (extracto). Comparación de las secuencias GRCh38 (4)¹ y T2T-CMH13

Descriptor	GRCh38	T2T-CMH13	Diferencia (%)
Número de genes	60.090	63.494	+ 5,7
Codificantes	19.890	19.969	+ 0,4
Repeticiones (%)	51,89	53,94	[+ 2,05]
Bases repetidas (Mbp)	1.516,37	1.647,81	+ 8,7
Elementos nucleares largos espaciados (LINE)	626,33	631,64	+ 0,8
Elementos nucleares cortos espaciados (SINE)	386,48	390,27	+ 1,0
Repeticiones largas terminales (LTR)	267,52	269,91	+ 0,9
Satélites	76,51	150,42	+ 96,6
ADN (DNA)	108,53	109,35	+ 0,8
Repeticiones simples	36,57	77,69	+ 112,9
Repeticiones de baja complejidad	6,16	6,44	+ 4,6
Retroposones	4,51	4,65	+ 3,3
ARN ribosomal (rRNA)	0,21	1,71	[+ 715]

¹ Secuencia genómica humana actualizada producida por el Genome Reference Consortium con base en las secuencias publicadas en 2001 y sucesivamente actualizadas (Schneider *et al.*, 2020).

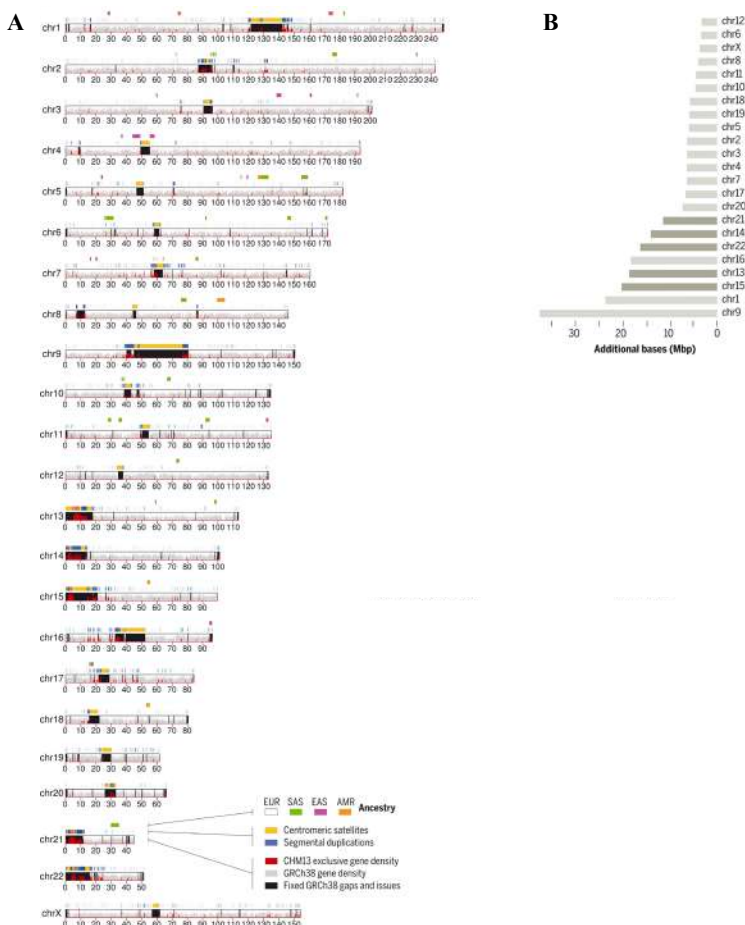


Figura 1. (extracto). Ideogramas de los 23 cromosomas secuenciados en el reporte del T2T. (A) Características del ensamblaje para cada cromosoma (chr). (B) Nucleótidos adicionales en el ensamblaje CHM13 en relación con el ensamblaje GRCh38 en cada cromosoma, incluyendo los cromosomas acrocéntricos resaltados en gris oscuro.

Para terminar, debe considerarse muy especialmente que el genoma reportado corresponde a un solo individuo de origen europeo con trazas de genomas neandertales y muy pocas regiones compartidas con comunidades actuales de los demás continentes del planeta. Así, es de esperar que este genoma de referencia (T2T-CMH13) sirva, como dicen los autores al final de su artículo, para “revelar la diversidad completa del género humano” a través de iniciativas como la del *Human Pangenome Reference Consortium* (Miga & Eang, 2021).

Alberto Gómez Gutiérrez

Instituto de Genética Humana, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Referencias

- Gershman, A., Sauria, M.E.G., Guitart, X., Vollger, M.R., Hook, P.W., Hoyt, S.J., Jain, M., Shumate, A., Razaghi, R., Koren, S., Altemose, N., Caldas, G.V., Logsdon, G.A., Rhie, A., Eichler, E.E., Schatz, M.C., O’Neill, R.J., Phillippy, A.M., Miga, K.M., Timp, W. (2022). Epigenetic patterns in a complete human genome. *Science*, 376(6588), 1-11. <https://doi.org/10.1126/science.eabj5089>
- International Human Genome Sequencing Consortium. (2001). Initial sequencing and analysis of the human genome. *Nature*, 409, 860-921. <https://doi.org/10.1038/35057062>
- Miga, K.H., Eang, T. (2021). The need for a human pangenome reference sequence. *Annual Review of Genomics and Human Genetics*. 22, 81-102. <https://doi.org/10.1146/annurev-genom-120120-081921>
- Nurk, S., Koren, S., Rhie, A., Rautiainen, M., Bizkadze, A.V., Mikheenko, A., Vollger, M.R., Altemose, N., Uralsky, L., Gershman, A., Aganezov, S., Hoyt, S.J., Diekhans, M., Logsdon, G.A., Alonge, M., Antonarakis, S.E., Borchers, M., Bouffard, G.G., Brooks, S.Y., Caldas, G.V., Chen, N.-C., ... Phillippy, A.M. (2022). The complete sequence of a human genome. *Science*, 376(6588), 44-53. <https://doi.org/10.1126/science.abj6987>
- Schneider, V.A., Graves-Lindsay, T., Howe, K., Bouk, N., Chen, H.-C., Kitts, P.A., Murphy, T.D., Pruitt, K.D., Thibaud-Nissen, F., Albracht, D., Fulton, R.S., Kremitzki, M., Magrini, V., Markovic, C., McGrath, S., Steinberg, K.M., Auger K., Chow, W., Collins, J., Harden, G., ... Church, D.M. (2017). Evaluation of GRCh38 and de novo haploid genome assemblies demonstrates the enduring quality of the reference assembly. *Genome Research*, 27, 849-864. <https://genome.cshlp.org/content/27/5/849>
- Venter, J.C., Adams, M.D. Myers, E.W. Li, P.W., Mural, R.J., Sutton, G.G., Smith, H.O., Yandell, M., Evans, C.A., Holt, R.A., Gocayne, J.D., Amanatides, P., Ballew, R.M., Huson, D.H., Wortman, J.R., Zhang, Q., Kodira, C.D., Zheng, X.H., Chen, L., Skupski, M., ... Zhu, X. (2001). The sequence of a human genome. *Science*, 291(5507), 1304-1351. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1058040>

Club de revistas

Comentario sobre el artículo

Acknowledging extraordinary women in the history of medical entomology

de Adriana Troyo, María Paula González Sequeira, Mónica Aguirre Salazar, Ian Cambronero Ortiz, Luis Enrique Chaves González, María José Mejías Alpízar, Kendall Alvarado Molina, Ólger Calderón Arguedas y Diana Rojas Araya

Parasites & Vectors, 2022, 15, 114.

<https://doi.org/10.1186/s13071-022-05234-6>

Reconociendo a las mujeres extraordinarias en la historia de la entomología médica

A lo largo de la historia, el reconocimiento de las mujeres en todos los campos de la ciencia constituye una deuda que aún no se salda. Publicaciones como la que reseña son un esfuerzo por dar a conocer algunos nombres de mujeres que, prácticamente desde el anonimato, han hecho importantes descubrimientos e innovaciones en una disciplina tan importante como la entomología médica, en la que, a pesar de que tantas de ellas trabajan, escasamente se las menciona como líderes en su campo. El artículo reseña la labor de 22 mujeres nacidas en el periodo entre fines del siglo XIX y antes de 1950; su objetivo es presentarlas como modelos a seguir y ejemplos de vidas extraordinarias que motiven a otras a vincularse a la futura evolución del campo. La tabla 1 (<https://parasitesandvectors.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13071-022-05234-6/tables/1>) del artículo recoge los nombres de estas mujeres provenientes de todos los continentes y resume sus contribuciones a la entomología médica en una variedad de tópicos que reflejan claramente la interdisciplinariedad del área.

En este comentario quiero destacar especialmente a las cinco científicas del continente americano: cuatro de Estados Unidos y una colombiana. Todas ellas trabajaron ejemplarmente por la ciencia en una época de especial desdén por el aporte científico de las mujeres y contribuyeron desde sus laboratorios a salvar vidas humanas. Las norteamericanas son Clara Ludlow, quien desarrolló su investigación principalmente en Filipinas; Ernestine H. B. Thurman, quien trabajó en Tailandia; Clara L. Maass, quien merece en el artículo una mención de honor por su contribución al campo como voluntaria en experimentos sobre la transmisión de la fiebre amarilla en Cuba, donde murió a causa de la enfermedad, y Mónica Asman, quien se hizo miembro de la congregación de Hermanas de San Francisco en 1940 y en 1968; después de obtener su Doctorado se unió a la Universidad de California en Berkeley, donde trabajó durante casi 20 años como entomóloga investigadora asociada. La colombiana María Cristina Ferro, por su parte, desarrolló su investigación en el Instituto Nacional de Salud (INS) de Colombia y allí, como coordinadora del Laboratorio de Entomología, lideró exitosamente la investigación en este campo desde 1994 hasta su jubilación en el 2005, fecha a partir de la cual continuó vinculada al INS como consultora y asesora hasta el 2015.



Clara Southmayd Ludlow nació en 1852 en Pensilvania, Estados Unidos; obtuvo una licenciatura en ciencias (B.S.) en agricultura y luego una Maestría en Ciencias (M.Sc.) en botánica. Después de graduarse en 1901, viajó a visitar a su hermano, un oficial de las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos en Filipinas. Allí conoció al Dr. William Calvert, quien quedó asombrado por su interés en los mosquitos y por su trabajo en el laboratorio de fiebre amarilla y logró que se permitiera a los funcionarios médicos recolectar muestras de mosquitos y enviarlas a Manila para que la Dra. Ludlow las examinara más a fondo. En 1908 recibió su Doctorado en Filosofía (Ph.D.) de la Universidad

George Washington donde, además de cursar sus estudios, fue instructora de histología y embriología hasta 1911. En 1920 la Dra. Ludlow se convirtió en la entomóloga jefe del Ejército. Como experta en la taxonomía de los mosquitos publicó alrededor de 53 artículos

científicos, 20 de ellos publicados durante su tiempo de vinculación a la Universidad George Washington. Algunos de sus trabajos más relevantes se centran en la descripción de especies de mosquitos. La Dra. Ludlow fue honrada por sus colegas al convertirse en la primera mujer no médica miembro de la Sociedad Estadounidense de Medicina Tropical e Higiene (ASTMH) en 1908. En el 2016, el consejo de la ASTMH votó a favor de crear una medalla con el nombre de un icónico líder en medicina tropical e instituyó la “Medalla Clara Southmayd Ludlow” en reconocimiento a su labor.



En 1901, a la edad de 25 años, la Sra. Maass se ofreció cinco veces como voluntaria para inoculaciones experimentales. Creyendo que carecía de inmunidad, fue inoculada una vez más el 14 de agosto con mosquitos infectados después de su exposición a un paciente que había experimentado una forma virulenta de la enfermedad. Cuatro días después, la Sra. Maass desarrolló fiebre, escalofríos y dolor de cabeza. Infortunadamente, su enfermedad evolucionó rápidamente a la forma grave, con intensa hemorragia, lo que la llevó a la muerte el 24 de agosto de 1901. Los gobiernos de Cuba y Estados Unidos reconocieron a la Sra. Maass su contribución voluntaria a la ciencia y en 1951 y 1976 los servicios postales de los dos países emitieron sellos conmemorativos en su memoria. En 1976, además, fue incorporada al Salón de la Fama de la Asociación Estadounidense de Enfermeras.



Ernestine H. B. Thurman nació como Ernestine Hogan Basham en Atkins, Arkansas, Estados Unidos, en 1920. Su carrera como entomóloga comenzó cuando obtuvo un puesto en el programa de Control de Malaria en Áreas de Guerra; posteriormente lideró la unidad de identificación de mosquitos de la Oficina de Control de Vectores en Turlock, California. Fue allí donde conoció y se casó con Deed C. Thurman, a quien acompañó en un viaje al norte de Tailandia, ambos como oficiales comisionados del Servicio de Salud Pública de Estados Unidos (USPHS). A la muerte de su esposo, la Dra. Thurman regresó a los Estados Unidos donde comenzó a trabajar en el Instituto de Microbiología de la Salud en Bethesda, Maryland. Posteriormente obtuvo su Ph.D. en Entomología en la Universidad de Maryland con su trabajo sobre los mosquitos del norte de Tailandia. Después de mudarse a Nueva Orleans y casarse con Clyde Swartzwelder, trabajó como secretaria ejecutiva de la Sección de Estudios de Medicina Tropical, División de Becas de Investigación, del USPHS, del que se retiró ostentando el grado de capitana para unirse

a la facultad del Centro Médico de la Universidad Estatal de Luisiana como profesora de patología. Sin duda, una de las contribuciones más importantes de la Dra. Thurman fue su participación en la fundación del programa de control de la malaria tailandés-estadounidense, el cual se encargaba de la recolección y el estudio de mosquitos, la fumigación domiciliaria con DDT, las encuestas, la vigilancia antipalúdica, la capacitación de médicos oficiales y auxiliares técnicos, el tratamiento de la malaria y la información al público. Entre los reconocimientos a su trabajo se cuentan la Medalla del Servicio de Defensa Nacional (1954, otorgada en 1963). La Dra. Thurman murió en enero de 1987, en Virginia, después de una vida dedicada a la entomología y al activismo en favor de la incorporación de la mujer a la educación y a la ciencia.



Monica Asman nació en Alemania en 1920, pero su familia se mudó a Los Ángeles, Estados Unidos, cuando ella era una niña. Se convirtió en miembro de las Hermanas de San Francisco en 1940, y entre 1944 y 1962 fue maestra en diferentes escuelas atendidas por la Orden Franciscana. En 1966 recibió un Ph.D. en genética de mosquitos de la Universidad de Notre Dame en Indiana por su investigación sobre las translocaciones cromosómicas de *Aedes aegypti*. Cabe destacar que fue una de las ocho mujeres que, entre 52 hombres, recibieron el título. Entre 1968 y 1987 trabajó en la muy izquierdista y revolucionaria universidad de California en Berkeley, donde se dice que fue objeto de bromas, no por ser mujer científica, sino por su condición de religiosa. En este

sentido, cabe mencionar el trabajo de Peggy M. Delmas, profesora asistente de liderazgo educativo en la Universidad del Sur de Alabama, dedicado a rescatar las contribuciones de las hermanas católicas con carreras académicas y científicas, como queda plasmado en el artículo que publicó en septiembre del 2020 en el *International Journal of Gender, Science and Technology* con el título “Madres antepasadas en STEM: celebrando el trabajo de las hermanas científicas católicas” (Delmas, 2021). La Dra. Asman produjo más de 50 publicaciones en varias revistas de la Universidad de California y contribuyó en los experimentos para determinar los efectos de la radiación ionizante en el desarrollo gonadal de *Aedes aegypti* en sus diferentes etapas de vida, así como a los estudios sobre la genética de *Aedes sierrensis*, especie utilizada en el método de control de machos estériles. La Dra. Asman y sus colaboradores irradiaron ejemplares machos de *Culex tarsalis* con cobalto-60 para inducir alteraciones genéticas y determinaron la dosis ideal de radiación inductora de un 95 % de esterilidad en mosquitos. La Dra. Asman falleció en California en el 2016.



María Cristina Ferro Vela nació en Ipiales, Colombia. Obtuvo su B.S. en Microbiología de la Universidad de los Andes de Bogotá en 1969. Posteriormente, se incorporó al Grupo de Entomología del Instituto Nacional de Salud de Colombia (INS), donde comenzó a trabajar e investigar sobre vectores de leishmaniasis. Durante 1975 y 1976 hizo su maestría en Parasitología Médica en la Escuela de Higiene y Medicina Tropical del Reino Unido trabajando en el xenodiagnóstico de *Trypanosoma cruzi*. A su regreso a Colombia retomó sus labores en el INS y coordinó el Laboratorio de Entomología desde 1994 hasta su jubilación en el 2005.

Bajo su supervisión, este laboratorio fue designado como laboratorio de categoría “A” y ganó la distinción de “Grupo de Excelencia” designado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (Colciencias) en 1995. En el 2006 se integró al comité editorial de la revista científica colombiana *Biomédica* como revisora y evaluadora de los artículos de entomología. La carrera científica de la Dra. Ferro abarcó múltiples vertientes: no solo fue extremadamente productiva en lo académico, destacándose como autora de más de 100 artículos publicados y varios capítulos de libros, sino que también se desempeñó como asesora de estudiantes de pregrado y posgrado y participó activamente en diferentes eventos científicos nacionales e internacionales sobre medicina tropical, parasitología y entomología. Su satisfacción profesional más grande vino en 1987, cuando se concretó su máximo aporte al encontrar en Norte de Santander, Colombia, una nueva especie de *Lutzomyia*, bautizada en su honor como *Lutzomyia ferroae*. En el 2007 el INS le otorgó la distinción de Investigadora Emérita en reconocimiento a sus investigaciones en el campo de la entomología médica. Por sus méritos científicos y académicos recibió otras distinciones, como el Premio “Ernesto Osorno Mesa” por los trabajos presentados en el Congreso de la Sociedad Colombiana de Entomología, el reconocimiento como Investigadora Principal de Colciencias y la Mención de Honor otorgada por Colciencias y la revista Semana en la categoría de “Ciencias Médicas y de la Salud” del Gran Premio a la Vida y Obra de Investigadores Eméritos de Colombia en el 2014. En el homenaje que se le rindió tras su muerte en el 2015, muchos investigadores elogiaron no solo su excelencia académica, sino también su actitud colaborativa y su pasión por aprender y enseñar. Es reconocida por sus aportes en el desarrollo de la ciencia y la innovación en Colombia, así como por su colaboración en la estructuración, desarrollo y consolidación de la Red Nacional de Entomología Médica de su país.

Estos cinco ejemplos de mujeres científicas dedicadas a la Entomología Médica constituyen modelos de vida dedicada al servicio de la humanidad a través del cuidado de la salud. Además, cada una de ellas se destacó en la sociedad de su tiempo por otros logros, como el de la Dra. Ludlow, primera mujer no médica que fue miembro de la Sociedad Estadounidense de Medicina Tropical e Higiene; la Sra. Maass, quien ofrendó su vida por la ciencia; la Dra. Thurman, que se distinguió por ser una activista en favor de la educación de las mujeres y su posibilidad de dedicarse a la ciencia; la religiosa científica Dra. Asman, quien tuvo que soportar la discriminación por ser religiosa católica, no tanto por ser mujer, y la Dra. Ferro, cuya contribución al desarrollo y la innovación a través de la consolidación de la Red Nacional de Entomología Médica en Colombia es reconocida por todos (**Cienciagora**, 2005).

Las historias de las 22 mujeres cuyas vidas se reseñan en el artículo comentado deben servir de modelo y guía a las jóvenes que se interesan por la ciencia como forma de aportar al bienestar de la sociedad en todos los aspectos de su desarrollo. La publicación y la divulgación de las vidas de mujeres extraordinarias en todos los campos de las ciencias naturales, sociales y humanas es una labor pendiente para despertar el interés por el aporte de las mujeres a la ciencia y otorgar el merecido reconocimiento a su trabajo. Es cierto que solo en unos pocos casos puede hallarse la información que da testimonio de las mujeres que lucharon por seguir sus aspiraciones en disciplinas dominadas por hombres, pero no debe cejarse en este empeño porque es muy importante dar a conocer los logros que abrieron caminos y nuevas posibilidades para las jóvenes del siglo XXI.

Angela Stella Camacho Beltrán
Red Colombiana de Mujeres Científicas

Referencias

- Cienciágora.** (2005). Científicos colombianos en el área de Matemáticas y Ciencias Naturales. https://cienciagora.universia.net.co/infodetail/galeria_de_cientificos/matematicas-afines/maria-cristina-ferro-57.html
- Delmas, P.M.** (2021). Q&A. Celebrating the work of Catholic sister scientists, Jan 5, 2021. <https://www.globalsistersreport.org/news/ministry/news/q-peggy-m-delmas-celebrating-work-catholic-sister-scientists>

Club de revistas

Comentario sobre el artículo Guayasamin JM, Brunner RM, Valencia-Aguilar A, Franco-Mena D, Ringler E, Medina Armijos A, Morochz C, Bustamante L, Maynard RJ, Culebras J. 2022. Two new glassfrogs (Centrolenidae: *Hyalinobatrachium*) from Ecuador, with comments on the endangered biodiversity of the Andes. *PeerJ* 10:e13109

<https://doi.org/10.7717/peerj.13109>

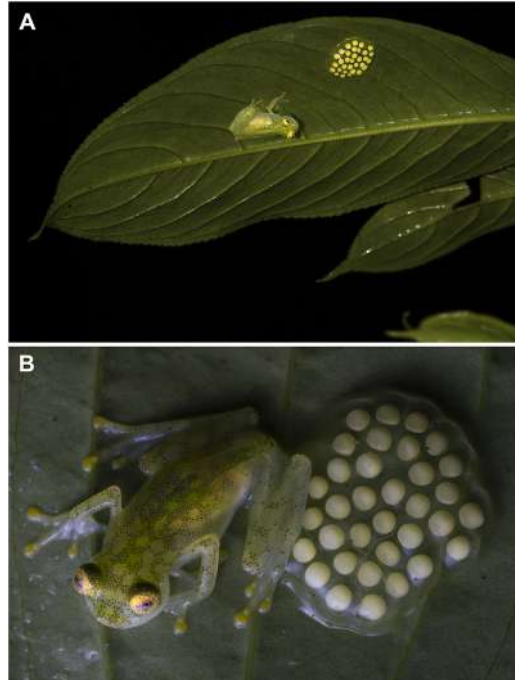


Figure 8. Parental care in *Hyalinobatrachium mashpi* sp. nov. (A) Male calling at San Vicente River, Mashpi Reserve, Pichincha Province, Ecuador. (B) Male at tributary of the Mashpi River, Tayra Reserve, Pichincha Province, Ecuador. Photos by Carlos Morochz (A) and Jaime Culebras (B). DOI: 10.7717/peerj.13109/fig-8

Ranas de cristal

Los fascinantes anfibios (ranas, salamandras y cecilias), estos vertebrados que transfieren como pocos grupos de organismos la energía de los ecosistemas acuáticos a los terrestres mediante el proceso de la metamorfosis, han sido objeto de fascinación y estudios científicos durante siglos. Pero también son pocos los grupos taxonómicos en el mundo que, como este, enfrentan un paradigma tan opuesto: por un lado, altas tasas de disminución de sus poblaciones a nivel local, con alto impacto global, que van en constante aumento por la incidencia de múltiples factores que operan en sinergia (cambio climático, deforestación y destrucción de hábitats, enfermedades emergentes, tráfico ilegal, entre otros); por otro lado, muchos descubrimientos y descripciones formales de nuevas especies para la ciencia. Sus características biológicas y ecológicas han hecho de los anfibios un grupo de animales de cuerpo pequeño comparado con la mayoría de los otros vertebrados terrestres (aves, reptiles y mamíferos); ese tamaño corporal relativamente pequeño le ha proporcionado a la mayoría de las especies peculiaridades fisiológicas y restricciones de movimiento a largas distancias, limitando su distribución. Por ello, en el grupo hay un endemismo notable, es decir, distribuciones geográficas muy estrechas. Así, para muchos anfibios, cada montaña, valle o río puede constituir una barrera del paisaje que, con la acumulación de los cambios evolutivos a través del tiempo, lleva a la formación de nuevas especies. Este hecho ofrece una enorme oportunidad para comprender la naturaleza biológica de las especies, generar muchas preguntas de investigación y, sobre todo, posibilitar el hallazgo de novedades, así como la descripción y asignación de nombres a nuevas especies.

En las últimas décadas los descubrimientos de nuevas especies de anfibios han estado respaldados, cada vez más frecuentemente, por múltiples perspectivas de investigación, es decir, diferentes fuentes de evidencia que constituyen herramientas analíticas poderosas para comprender la biodiversidad y sus intrincados secretos. Actualmente la taxonomía y la sistemática, ciencias que describen nuevas especies y sus relaciones evolutivas, recurren a la morfología comparada, la diversidad molecular, los atributos de la historia natural de las especies, así como a la evaluación de los sonidos que emiten los individuos, entre otras fuentes de evidencia. Estos análisis nos aproximan a la gran riqueza del patrimonio natural de nuestras regiones, en particular de los Andes del norte en Suramérica. En este contexto, recientemente se han sumado a la lista de especies de esta zona del planeta dos carismáticas ranas de cristal de los Andes ecuatorianos [Guayasamin y colaboradores]. Se trata de dos especies que pertenecen a una increíble familia taxonómica (Centrolenidae) que ha sido objeto de investigación a muchos niveles, principalmente en las últimas tres décadas. Estas especies son muy particulares, no solo porque muchas de ellas tienen el cuerpo translúcido, rasgo que le da origen a su nombre común, sino, además, por sus hábitos estrechamente asociados con riachuelos y ríos, convirtiéndolas en sensores ambientales del buen estado de conservación de los ecosistemas. Las ranas de cristal han evolucionado paralelamente con la historia de la orogenia de las montañas, por ello la mayor riqueza de las especies se encuentra en los Andes tropicales.

Una de las características más relevantes de las dos especies descritas por el equipo liderado por el profesor Guayasamin es la diversidad genética y las relaciones evolutivas recuperadas (**Figura 2**, DOI: 10.7717/peerj.13109/fig-2) a pesar de la similitud morfológica y de su proximidad geográfica (**Figura 10**, DOI: 10.7717/peerj.13109/fig-10), lo que sugiere que la morfología críptica (especies que tienen apariencia muy similar a nivel morfológico, pero con diferencias en otras fuentes de datos, por ejemplo, genes o sonidos) es muy frecuente. Otros estudios están arrojando resultados similares en varios géneros de anfibios, algunos de ellos distribuidos en Colombia. Además, el estudio que comentamos resalta la importancia de continuar con una agenda de investigación que incluya expediciones de campo intensivas, tanto en las regiones exploradas como en otras poco muestreadas, ya que los hallazgos taxonómicos pueden ser más recurrentes de lo que se sospechaba.

Por último, un factor adicional que no es estrictamente científico, pero sí de igual importancia, es que cada vez se amplían más las estrategias de divulgación y apropiación social del conocimiento sobre este grupo de ranas “cristalinas”, sus comportamientos reproductivos, sus vocalizaciones y su historia de vida, recurriendo a formas alegóricas que las han convertido en un grupo que no deja de desafiar nuestra capacidad de asombro. Descubrir las, describir las, nombrar las, pero sobre todo conocerlas y conservarlas, constituye una responsabilidad constante de la academia y la sociedad.

Mauricio Rivera-Correa

Laboratorio de Anfibios, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. E-mail: mriveraco@unal.edu.co

Enlaces

Figure 2. Phylogenetic position of *Hyalinobatrachium mashpi* sp. nov. and *H. nouns* sp. nov. Phylogenetic relationships of *Hyalinobatrachium* inferred from the 16S mitochondrial gene under ML criterion. DOI: 10.7717/peerj.13109/fig-2

Figure 10. Distribution of *Hyalinobatrachium mashpi* sp. nov. and *H. nouns* sp. nov. in Ecuador. Note that localities of the two new taxa are separated by the Intag-Guayllabamba valley. DOI: 10.7717/peerj.13109/fig-10

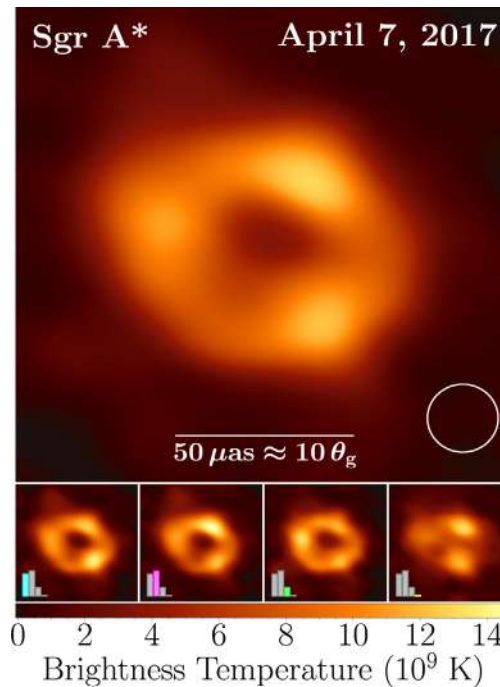
Posada-Swofford A. (2022) Two new species of see-through frog named in Ecuador. <https://www.nationalgeographic.com/animals/article/two-new-species-of-glassfrog-discovered?rid=EE8DCC81515152545E1494E3529A21B7&cmpid>

Club de revistas

Comentario sobre el artículo Primera imagen del agujero negro supermasivo en el centro de nuestra galaxia Vía Láctea.

Colaboración Telescopio Horizonte de Sucesos (Event Horizon Telescope, EHT), publicado en la revista *Astrophysical Journal Letters*, Volumen 930, Número 2, Mayo 10 de 2022.

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ac6674/pdf>



Primera imagen del agujero negro en el centro de nuestra galaxia

El 10 de mayo de 2022 los registros noticiosos del mundo impactaban con una nueva imagen extraordinaria, la primera del agujero negro en el centro de nuestra galaxia Vía Láctea (**Bower, 2022**). ¿Pero acaso no habíamos visto ya esta misma imagen hace tres años, la primera de un agujero negro? Aquella imagen está todavía en nuestra memoria. ¿Qué es lo novedoso ahora? Aclaremos entonces.

Son tres capítulos en esta historia: primero en abril de 2019 vimos la primera imagen de un agujero negro, el agujero negro de la galaxia M87; luego en octubre de 2020 los agujeros negros fueron el tema del Premio Nobel de Física, y ahora en mayo de 2022 vemos la primera imagen del agujero negro en el centro de nuestra galaxia.

En la constelación de Virgo, a 55 millones de años luz de la Tierra, se encuentra una galaxia elíptica gigante, es Messier 87, o más corto M87, una galaxia de núcleo activo, que alberga en su centro el gran atractor galáctico, un agujero negro supermasivo, cuya imagen es histórica como la del primer agujero negro “fotografiado” (**The Event Horizon Telescope Collaboration, 2019**). Es supermasivo con masa de 6.5 billones de masas solares, compactada en un ínfimo volumen, en una singularidad, tal que por su enorme gravedad nada puede escapar, ni siquiera la luz. Su enorme gravedad deforma el espacio tiempo, así que luz en su entorno se curva a su alrededor. Materia de la galaxia atrapada allí en el entorno, acelerada por la gravedad del agujero, al acercarse circula a velocidades cada vez mayores, aproximando a la velocidad de la luz, así hasta alcanzar el límite espacial, “el horizonte de sucesos”, lo más cerca que puede llegar al centro de atracción en órbita estable. Se acerca más y “cae” al interior, de donde nunca puede salir, alimenta al agujero, que se hace más masivo.

El agujero negro supermasivo está en rotación, tiene momento angular y su rotación lleva a la materia atrapada en su alrededor a seguir el movimiento angular en un disco en plano perpendicular al eje de rotación. Este es “el disco de acreción” de materia en transición de la galaxia al agujero. La materia circulando con enorme energía, polvo y gas del entorno, lleva carga eléctrica, que en movimiento es fuente de intenso magnetismo. En rotación, carga eléctrica acelerada, es fuente de radiación, que podemos detectar, haciendo visible el agujero negro por la materia radiante en su entorno. La imagen del agujero negro muestra entonces el anillo brillante con la zona circular central en negro, “la sombra” oscura, con el interior del agujero negro limitado por el horizonte de sucesos.

Y se enriquece lo extraordinario de este motor del centro de la galaxia activa, por el intenso magnetismo en el entorno, debido a la carga eléctrica circulando, con líneas de campo magnético que atraviesan perpendicularmente el plano del disco de acreción, se entorchan alrededor del eje de rotación y guían materia de ese entorno formando “jets de plasma” a lo largo del eje de rotación. Se expulsan chorros de partículas cargadas eléctricamente, chorros de plasma disparados, que alcanzan hasta distancias de millones de años luz, acompañados de radiación, desde ondas de radio hasta rayos-X. Los jets emitidos parecen venir del agujero negro, pero se trata de materia del entorno en movimiento con muy altas energías, guiada por el campo magnético del agujero. Esta es la más poderosa máquina gravitacional, el agujero negro supermasivo. Y es así el M87, y así la imagen generada por la Colaboración Internacional Telescopio de Horizonte de Sucesos (**Event Horizon Telescope, EHT**, s.f.a).

Pensemos ahora en trasladarnos del M87 a 55 millones de años luz de distancia, hasta solo 26 mil años luz de distancia a nuestro planeta. Nos ubicamos en el centro de nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, también galaxia de núcleo activo con un agujero negro supermasivo como motor de la galaxia: La Vía Láctea, galaxia en espiral de 100 millones de años luz de diámetro, con sus más de 200 mil millones de estrellas, con una masa de 1000 millones de veces la masa del Sol, gira en torno a su centro y completa cada vuelta en 225 millones de años. Para ubicar el centro de la Vía Láctea observamos en dirección de la constelación de Sagitario, en la región de mayor densidad de estrellas. Allí encontramos a Sagitario A*, más corto Sgr A*, el agujero negro supermasivo. ¿Cómo se descubrió?

Este es el segundo capítulo de la historia: el Premio Nobel de Física 2020, fue otorgado por mitad a Roger Penrose por los fundamentos teóricos, por el descubrimiento que la formación de agujeros negros es una predicción robusta de la teoría general de la relatividad de Albert Einstein, y la otra mitad a Andrea Ghez y Reinhard Genzel por el descubrimiento de un objeto compacto supermasivo en el centro de nuestra galaxia, por el descubrimiento de nuestro agujero negro supermasivo Sgr A*. Dos grupos de observación independientes, Andrea Ghez de la Universidad de California, Los Angeles, observando desde el Observatorio Keck en Hawái, y Reinhard Genzel del Instituto Max Planck de Física Extraterrestre de Munich, observando desde los telescopios en La Silla, Chile, estudiaron el movimiento de estrellas cercanas al centro de la galaxia. Registraron movimiento acorde con las leyes de Kepler en torno a un punto, donde se concluye, está ubicado el centro de atracción gravitacional, el agujero negro supermasivo Sgr A* y pudieron determinar su masa de 4 millones de masas solares. (**The Nobel Committee for Physics, 2020a, 2020b**).

Completamos con el tercer capítulo, con la Colaboración Internacional Telescopio de Horizonte de Sucesos, con observaciones directas del centro galáctico, Sagitario A*, donde se supone ubicada la gran masa de 4 millones de masas solares. Allí se había identificado una fuente compacta de radiación, adecuada para estudio radioastronómico en el rango de longitudes de onda de 1,3 mm. Con 8 radiotelescopios, repartidos en el mundo, a distancias de 1000 km entre ellos, conformando una red de observación, que equivale a un telescopio virtual del tamaño del planeta, pueden generar imágenes que reunidas, luego del debido procesamiento, llevan a la impactante imagen del agujero negro en el centro de la Vía Láctea.

Para el agujero negro supermasivo Sgr A* el resultado es muy similar a lo obtenido para el M87: El anillo brillante de materia atrapada circulando en torno al agujero negro, hasta el límite del horizonte de sucesos, con la sombra oscura del agujero en el interior del anillo. Y su tamaño coincide con lo que predice la relatividad general para una masa de 4 millones de masas solares. Se obtiene la misma estructura de agujero negro supermasivo ya conocida con M87. Esto demuestra de manera interesante, cómo a pesar del cambio de escala, reduciendo en factor de 1500, el fundamento físico es el mismo: la relatividad general aplica exitosamente tanto para el gigante M87, como para el más pequeño Sgr A*. Se tiene aquí un excelente laboratorio para estudio de física fundamental, para explorar la validez de la relatividad general en tan amplio rango de tamaños (**Bower, 2022**).

Para lograr la novedosa imagen del Sagitario A*, hubo que superar entre otros, un obstáculo serio por la rápida rotación del Sgr A*, consecuencia de su pequeña masa. Y esto se trasmite a la rotación de materia circulando en la órbita estable más interna en el límite del horizonte de sucesos, rotando con período de apenas 30 minutos, tiempo muy corto para tomar imágenes estables, que requieren tiempos de hasta 12 horas continuas. Materia en el entorno, polvo y gas de la galaxia, envuelve como un velo al agujero negro y varía irregularmente distorsionando la señal. Atravesar este velo lo logran las ondas electromagnéticas de radio, de longitudes de onda de milímetros, adecuadas para radioastronomía.

Las observaciones radioastronómicas que llevaron a las imágenes, de los dos agujeros negros supermasivos, M87 y Sgr A*, fueron realizadas por la Colaboración EHT en abril de 2017. Los radiotelescopios de la red están ubicados en España, Estados Unidos (Arizona y Hawái), México, Chile y en la Antártida, configurando el telescopio virtual de miles de kilómetros. (**The Event Horizon Telescope Collaboration, EHT Science, s.f.b**).

El detalle de este logro científico, que nos muestra cómo se abre una nueva ventana para la exploración del universo en lo profundo de las galaxias, para comprensión de la dinámica en su formación y evolución, con implicaciones cosmológicas, lo encontramos en la serie de 6 publicaciones de la Colaboración EHT en el *Astrophysical Journal Letters*, volumen 930, del 10 mayo de 2022, un hito en la ciencia (**Bower, 2022**).

Bernardo Gómez Moreno

Profesor emérito, Departamento de Física, Universidad de los Andes, Colombia

Referencias

- Bower, GC.** (2022). The Event Horizon Telescope Collaboration, “Focus on First Sgr A* Results from the Event Horizon Telescope”, *The Astrophysical Journal Letters*, 930(2), IOPscience, https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus_on_First_Sgr_A_Results
- The Event Horizon Telescope Collaboration.** (2019). *Press Release: Astronomers Capture First Image of a Black Hole*. <https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole>
- The Event Horizon Telescope, EHT.** (s.f.a). <https://eventhorizontelescope.org/science>
- The Event Horizon Telescope Collaboration, EHT Science.** (s.f.b). <https://eventhorizontelescope.org/array>
- The Nobel Committee for Physics.** (2020 a). *Theoretical foundation for black holes and the supermassive compact object at the Galactic centre*. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/advanced-information/>
- The Nobel Committee for Physics.** (2020 b). “Black holes and the Milky Way’s darkest secret”, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/popular-information/>

In Memoriam



Gabriel Poveda Ramos, un ciudadano ejemplar

La dedicación de una vida a la actividad científica y a la búsqueda de un conocimiento que pudiera ser útil para el progreso de Colombia constituye el rasgo central de quien, desde la cátedra y su actividad profesional, sin pausa ni descanso, se constituyó en un ejemplo para sus conciudadanos. Una tradición establecida por nuestro primer científico, Francisco José de Caldas, quien nunca vaciló en su intento de aplicar a la realidad lo aprendido en medio de las más grandes dificultades.

Desde la temprana edad de 19 años, en 1950, Gabriel Poveda Ramos tuvo muy claro que uno de los principales proyectos de su vida sería el ejercicio de la labor docente. Ocurrió cuando cursaba el tercer año de ingeniería química en la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín y fue convocado para dictar un curso de geometría en el primer año de dicha carrera. Transcurridos 57 años de docencia, puede afirmarse que diferentes universidades de Colombia dan fe del cabal cumplimiento de ese propósito, algo que también atestigüamos sus más de 3.000 alumnos. Fue esa vocación de compartir con los semejantes la pasión por el conocimiento y de promover la creación de comunidades de profesores y estudiantes con voluntad de saber, lo que hoy permite afirmar que honramos a quien fuera maestro de juventudes y profesor de profesores.

Ha sido proverbial el atraso con el que suelen llegar a nuestro país los nuevos descubrimientos, así como los desarrollos científicos y técnicos, atraso hoy atenuado por el veloz avance de las comunicaciones. Debe entonces agradecerse al profesor Poveda Ramos la introducción de asignaturas y temas desconocidos o no enseñados en su momento en la universidad colombiana. Por ejemplo, hacia fines de la década de 1950 se ocupó de cursos tan novedosos para el medio académico de entonces como los de ecuaciones diferenciales parciales, transformaciones integrales de Laplace y Fourier, ecuaciones en diferencias finitas, teoría de matrices y análisis dimensional. En sus 16 años de fecunda labor en la Facultad de Minas de la Sede Medellín de la Universidad Nacional de Colombia, introdujo asignaturas en campos que adquirirían especial importancia en el mundo, como los de programación lineal, investigación de operaciones, procesos estocásticos, análisis numérico, ecuaciones en derivadas parciales y matemáticas especiales para ingenieros.

Este vasto magisterio fue complementado con la escritura de libros de texto y de lectura general relacionados con la matemática y la investigación de operaciones, con la economía colombiana, la historia de la ciencia y la tecnología en el mundo y en nuestro país, la historia de la ingeniería y la historia económica de Colombia. A lo anterior tendría que agregarse su decisiva participación en la creación y desarrollo de nuevas carreras, especialmente de ingeniería, y de nuevas áreas académicas, como el Departamento de Física y Matemáticas de la Universidad del Valle, así como en el comité que proyectó la organización académica de la futura Universidad Tecnológica de Pereira y sus dos primeras carreras de ingeniería, la industrial y la eléctrica. Por otra parte, fue uno de los cofundadores de Colciencias y de entidades gremiales relacionadas con la ingeniería química y la ingeniería eléctrica.

Un aspecto central, que sin duda constituye un aporte de enorme contenido social, tuvo que ver con la necesidad de que la matemática y la ingeniería nacional abordasen los problemas colombianos y tuviesen muy presente la situación de las poblaciones marginadas y excluidas.

Su labor se centró con preferencia en la matemática teórica y aplicada, campos en los cuales pudo presentar más de 20 inventos y descubrimientos, originales y nuevos. Esa vocación también se expresó en una serie de investigaciones teóricas y aplicadas en estadística, particularmente relacionadas con demografía, censos de población, tres modelos aleatorios, actuaría y algunos modelos para la economía colombiana.

Su patriótica preocupación por la suerte del país lo condujo a estudiar e investigar con tesón la historia política y económica de Colombia, con frecuencia centrándose en aspectos del desarrollo industrial, al punto de que es calificado como “el principal analista de la historia industrial del país” en el No. 352 de la serie Archivos de Economía, una publicación auspiciada por el Departamento Nacional de Planeación. Su familiaridad y conocimiento del sector industrial proviene de sus largos años de trabajo en la ANDI y en la consultoría. En esta entidad conoció a fondo todas las ramas industriales de Colombia, se ocupó de la adaptación al país de las nuevas tecnologías industriales que surgían en el mundo y contribuyó al planeamiento y evaluación de nuevas industrias y fábricas.

Su actividad como consultor lo llevó a asesorar a cuatro sucesivos gobiernos nacionales en lo tocante a planes de desarrollo económico e industrial y a realizar un estudio a fondo sobre la tecnología de la industria textil que tuvo repercusiones internacionales en la CEPAL y la ONUDI, y que lo condujo a realizar viajes para participar en reuniones internacionales del subsector. En su labor de 20 años en dos firmas de consultoría y en sus columnas de prensa continuó este trabajo afin con la industria, frecuentemente proponiendo y sustentando la necesidad de nuevos emprendimientos industriales, en particular relacionados con el aprovechamiento del carbón, con énfasis en su utilización energética y en la industria carboquímica. Su profundo conocimiento del desarrollo tecnológico e industrial lo condujo a ser asesor de la OEA, la ONUDI y el Grupo Andino (hoy CAN), así como de numerosas entidades estatales y privadas de Colombia.

Fueron muchas sus publicaciones, entre ellas se cuentan 35 libros, un buen número de ellos relacionados con la matemática y la física. Vale la pena mencionar a continuación algunos, divididos en dos grupos: *Soluciones desconocidas a los problemas de Fermat-Torricelli*, un antiguo tema tratado en numerosas publicaciones internacionales, en especial mediante procedimientos del análisis, pero que el autor trata con el brillante empleo del instrumental geométrico; *Bosquejo histórico de la moderna Álgebra de Magnitudes*, escrito conjuntamente con el inolvidable profesor de origen italiano Carlo Federici Casa y que se refiere a un importante tema muy olvidado en la actualidad; *Modelo matemático y dimensional para el planeamiento óptimo de industrias de procesos*, cuya originalidad estriba en proponer un diseño óptimo para una planta industrial, solución que va más allá de los diseños convencionales basados en la limitación financiera, en un tamaño que permita dominar el mercado o en conjeturas intuitivas; *La Química en Colombia – Ciencia, Ingeniería, Industria e Historia*, que sitúa dicha trayectoria en el contexto mundial, lo que permite comprender y valorar las acciones de quienes actualizaron los programas universitarios y transformaron la industria en el país; *Vapores Fluviales en Colombia*, ganador del Premio Nacional de Ingeniería Diodoro Sánchez otorgado por la Sociedad Colombiana de Ingenieros; *Ruedas y turbinas hidráulicas en la historia*, que hace parte de un trabajo sobre la historia de la tecnología mundial y sobre la forma como ésta llegó a Colombia y se incorporó a la vida del país; *Dos siglos de electroquímica*, una aproximación a la electroquímica como ciencia y como tecnología, la cual está lejos de haber recibido la atención de su pariente, la química; e *Ingenieros y Científicos Inmigrantes a Colombia (1760-1960)*, con el cual rinde homenaje a científicos,

ingenieros y técnicos que vinieron a trabajar en Colombia y contribuyeron con “una cuota significativa de lo que los colombianos sabemos y de lo que somos hoy”; *Políticas Económicas, Desarrollo Industrial y Tecnología en Colombia 1925 – 1975*, una contribución a la elaboración de políticas estatales que estimulen el cambio y desarrollo tecnológico; *Ingeniería e Historia de las Técnicas*, libro incluido en la parte primera del tomo IV de la *Historia Social de la Ciencia en Colombia* patrocinada por Colciencias, en el cual presenta el desenvolvimiento de la ingeniería en Colombia, y con ella, el de las ciencias en que se fundamenta y aquellas que utilizan dicha actividad; *La electrificación en Colombia*, donde se hace patente la importancia que la industria eléctrica ha tenido en el crecimiento y modernización del país; *Antioquia y el ferrocarril de Antioquia*, el cual describe la situación del transporte en la región antes de tan magna obra, para luego narrar la historia de dicho ferrocarril; *Minería en Colombia 1500-2011: una Aproximación Histórica*, publicación que se ocupa de presentar lo ocurrido tanto en Colombia como en Antioquia mediante series de tiempo y referencias, y en la cual señala el poco beneficio que ha recibido el país de tan importante renglón de la economía; *Carrileras y locomotoras*, destacado por la minuciosidad y el rigor en el tratamiento del tema, por el acopio y análisis de una voluminosa información relacionada con todas y cada una de las líneas férreas y por la forma convincente como demuestra la trascendencia que para el país tuvo este medio de transporte; *Población y censos en Colombia, desde la Conquista hasta el siglo XX*, una relación de los recuentos o estimaciones, oficiales u ocasionales, de la población de Colombia y de sus autores, un libro que incluye, además, un importante documento que presenta un modelo paretiano de la distribución de poblaciones en las ciudades de Colombia, y, por último, *Pensamiento crítico: una recopilación periodística*, dos tomos que recogen todas las columnas de opinión que el autor escribiera a lo largo de cuatro décadas en los periódicos El Mundo y El Colombiano de Medellín.

Mención especial merece su *Historia económica de Colombia en el siglo XX*, calificada por el escritor y editor José Alvear Sanín como “monumental e imprescindible para comprender la magnitud de nuestro crecimiento y para poder lamentar el reciente retroceso social. (...) donde todas las afirmaciones tienen la más escrupulosa sustentación, lo que permite a su autor llegar a conclusiones siempre plausibles”. Por su parte, el presidente Belisario Betancur dice en algunas frases del prólogo de la obra: “El denso libro que el lector tiene en sus manos le ofrece esta visión de interrelaciones de los fenómenos políticos, económicos y sociales, partiendo de la historia de la economía colombiana a lo largo del siglo XX. (...) El autor se extiende en el recuento y revisión de las transformaciones tecnológicas creadas por la electrificación, la industrialización, el avance vial, el desarrollo petrolero. En el seno de la propia sociedad, dice el profesor Poveda Ramos, ocurrieron cambios profundísimos. (...) He aquí un trabajo que debe ser tenido en cuenta por los analistas de uno cualquiera de los capítulos de la vida nacional durante el siglo anterior. No importa si se disiente de algunas de las apreciaciones de valoración del autor, el cual nunca adopta posiciones apodícticas”.

Es del caso destacar también el libro *Historia de las matemáticas en Colombia*, en cuyas más de 300 páginas se hace un recorrido, con frecuencia detallado, de la historia de la matemática en el país desde la época de la colonización hasta fines del pasado siglo. Describe los aportes de personajes ilustres, colombianos y provenientes del exterior, tanto a la enseñanza como a las aplicaciones y el desarrollo técnico. Sobresale la atención que se presta a los docentes que se destacaron en los diferentes momentos de la historia. Los esbozos biográficos constituyen en varios casos un auténtico rescate de nombres olvidados o poco conocidos. Se ocupa de las circunstancias históricas que dieron origen a instituciones de influencia decisiva

en el progreso de la matemática como la Expedición Botánica, el Colegio Militar de Ingeniería, la Facultad de Ingeniería y el Departamento de Matemáticas de la Universidad Nacional de Colombia, y la Escuela de Minas de Medellín.

El ingeniero y profesor Poveda Ramos fue miembro honorario de la Academia Antioqueña de Historia y de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, así como presidente honorario de la Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos. Hizo parte de la Mathematical Association of America de los Estados Unidos. La Universidad Pontificia Bolivariana lo distinguió como doctor honoris causa en ingeniería y la Universidad Autónoma Latinoamericana con el doctorado honoris causa en ingeniería industrial. Obtuvo Mención Especial de la OEA y en el 2007 recibió el galardón El Colombiano Ejemplar, otorgado por el periódico El Colombiano de Medellín.

El ciudadano Gabriel Poveda Ramos había nacido en el municipio de Sonsón, Antioquia, el 6 de marzo de 1931, en el hogar formado por el ingeniero Pío B. Poveda Narváz y doña Josefina Ramos Jaramillo. Se graduó de ingeniero químico en la Universidad Pontificia Bolivariana, de ingeniero electricista de la Universidad del Valle, de tecnólogo textil del Instituto Textil de Lodz, Polonia, y de Magíster en Ingeniería con Especialidad en Matemáticas Aplicadas en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia. Estuvo casado por 65 años con doña Fabiola Jaramillo Gaviria y de esa unión nacieron sus hijos Germán, Edgar, David y Norma. Falleció el 22 de enero de 2022 en la ciudad de Medellín.

Deseo aprovechar esta singular ocasión para dar testimonio de admiración y agradecimiento por los ejemplos que siempre recibí de tan distinguida personalidad, tanto en la academia como fuera de ella. La seriedad, el rigor y la profundidad de sus clases, así como la rectitud de su vida personal y profesional, han sido un modelo a seguir en mi labor docente y de dirección académica, en las tareas de consultoría y en el trabajo de columnista de prensa y colaborador de revistas culturales y técnicas.

Darío Valencia Restrepo

Académico honorario

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

In Memoriam



Alberto Morales Alarcón, 1929 - 2022

El académico de número de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, don Alberto Morales Alarcón, murió a los 92 años después de una vida fructífera dedicada a la ciencia y a la prevención y control de enfermedades tropicales, especialmente las transmitidas por insectos vectores.

Nació en El Líbano, Tolima, en 1929, lugar donde creció y tuvo su primera educación. Su formación profesional la adelantó en la Universidad Nacional de Colombia, donde en 1957 se graduó en bacteriología, carrera que entonces estaba adscrita a la Facultad de Medicina. En 1973 obtuvo su título de Magister en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, IVIC, que por ese tiempo era una de las instituciones líderes en la investigación de enfermedades tropicales en Latinoamérica. Tuvo, además, pasantías de trabajo y estudio en el Instituto Gorgas en Panamá, en la Escuela de Medicina Tropical de Liverpool y en el Museo de Historia Natural de Londres.

Al graduarse siguió trabajando en la Universidad Nacional por dos años como instructor de bacteriología, pero muy pronto orientó su trabajo profesional hacia el campo que iba a ser su pasión durante toda la vida, la entomología médica. Fue profesor de esa disciplina en la Escuela de Salud Pública y apoyó al Ministerio de Salud en la formación de funcionarios vinculados a la Oficina de Saneamiento Ambiental y al Servicio de Erradicación de la Malaria, el cual también hacía control de otras enfermedades transmitidas por insectos como el dengue, la fiebre amarilla y varias arbovirosis que aparecían en brotes esporádicos en el país.

Desde 1958 fue entomólogo de planta del Instituto de Estudios Especiales Carlos Finlay, institución dedicada, principalmente, al estudio, la rigurosa vigilancia epidemiológica y la producción nacional de la vacuna de la fiebre amarilla, enfermedad que causó estragos en el pasado en todo el continente. Al conformarse el Instituto Nacional de Salud (entonces Instituto Nacional de Programas Especiales de Salud- INPES), las funciones del Finlay le fueron transferidas y Alberto Alarcón se incorporó, primero como investigador, y muy pronto como jefe del Grupo de Entomología, cargo que ejerció durante más de 20 años.

Estudió diversas familias y especies de insectos vectores. Una de aquellas en las que se concentró fue la de los flebotómicos, potenciales transmisores de especies de *Leishmania* (sobre todo en el “viejo mundo”) y muy activos transmisores de diversos arbovirus entre nosotros. Fue también un estudioso de las especies del género *Lutzomya*, responsables de la transmisión de diversas especies de *Leishmania* en el “nuevo mundo”. Participó en trabajos precursores que describieron la invasión y la reinvasión del país por el mosquito *Aedes aegypti*, eficiente vector del dengue y algo menos de la fiebre amarilla. Describió e hizo el seguimiento de los brotes de varios arbovirus transmitidos por el insecto *Psorophora confinnis*, entre ellos los causantes de la encefalitis equina venezolana y otras encefalitis exóticas.

Estos son apenas algunos ejemplos de los campos de la entomología en los que incursionó Alberto Alarcón. Una lista completa sería mucho más larga, y prácticamente coincidiría con el índice de un buen texto de entomología médica. En su larga vida entre insectos vectores pudo estudiar casi todos los que ocurren en nuestro país y en América Latina.

Las metodologías que dominó, y en muchos casos desarrolló, son igualmente amplias y diversas. Para poder entender lo que sucedía debió hacer estudios de carácter epidemiológico, pero también experimentales, que involucraban el establecimiento de colonias en el laboratorio (un reto muchas veces extraordinario) y de infecciones artificialmente inducidas, así como los análisis microscópicos e inmunológicos. Describió nuevas especies de *Lutzomya* (*Lutzomya moralesi*), una de *Leishmania* y tres nuevos virus: el virus Armero, el virus Durania y el virus Mariquita (*Bunyaviridae: Phlebovirus*).

Sus colegas y colaboradores reconocieron sus aportes y recibió, a pesar de su modestia, muchos reconocimientos. En 1970 fue promovido a Miembro de Número de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y correspondiente de la Real Academia de Ciencias de Madrid. Fue miembro de la Société de Pathologie Exotique francesa, de la Sociedad Colombiana de Microbiología, y de la Sociedad Colombiana de Parasitología y Medicina Tropical. El Instituto Nacional de Salud le otorgó su máxima distinción, la medalla Samper Martínez, y lo nombró entre sus investigadores eméritos.

Su trabajo está a disposición de la comunidad científica en decenas de artículos publicados en revistas de difusión internacional. Todos los que lo conocimos guardaremos su memoria en un lugar especial. Fue siempre una persona discreta, sencilla y amable, dispuesta a colaborar sin pensar en ventajas personales, de una gran generosidad. Hoy se lo describiría como de “perfil bajo”, es decir, reservado, sin pretensiones ni ostentaciones, renuente a publicitar sus evidentes méritos.

Fue un excelente compañero y amigo. Tuve el placer de ser su vecino de laboratorio durante más de veinte años, y no recuerdo en todo este tiempo ni un solo desacuerdo, ni siquiera un esporádico mal humor. Alberto Morales Alarcón debe ser modelo para futuras generaciones por su dedicación y rigor científico y por su generosidad y su amabilidad personal.

Moisés Wasserman

Académico Honorario, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
Profesor Emérito UNAL

In Memoriam



Carlos Corredor, en memoria de un gran maestro

Hablar del Dr. Carlos Corredor es un honor, no solo por el inmenso cariño y admiración que tenía por él, sino también porque durante su vida influyó a un gran número de investigadores y personas que reconocen en la generación de conocimiento un proyecto de vida, como él mismo lo decía en muchas de sus intervenciones. El Dr. Corredor -nunca lo pude llamar Carlos- fue uno de los hombres más inteligentes que he conocido. Su visión de la ciencia y de la educación trascendía los estándares comunes de la academia y suscitaba muchas reflexiones de gran trascendencia. Siempre tenía en mente la integración del conocimiento básico con su aplicación, tanto de los elementos tangibles como de los intangibles. Los primeros son fáciles de entender, pero los segundos son más etéreos, aunque no por ello menos importantes, y es en estos en los que quiero centrar mi homenaje a la memoria del Dr. Corredor.

Para Carlos Corredor el tener un proyecto de vida centrado en el conocimiento y la ciencia era un eslogan vital, una marca hecha con sangre, como dirían algunos. Consideraba importante que los maestros lo tuvieran y que su actividad académica no fuera solo el cumplimiento de un plan de trabajo, sino el motor que nos saca cada mañana de la cama y nos lleva a compartir esa profunda pasión con nuestros colegas, pero, más aun, con nuestros estudiantes. Convertirse en maestro para transmitir la pasión por lo que se hace es algo que quizás nosotros, sus colegas académicos y docentes, también llevamos en la sangre, pero verlo a él, siempre incansable, recalcarlo no solo con las palabras sino con sus actos diarios, era un motivo de inspiración enorme.

Recuerdo que cuando viajé a Francia a realizar mi posdoctorado, le pedí que se quedara liderando el pensamiento académico de mi grupo de investigación mientras regresaba. Aunque mi área de trabajo es la inmunología, el Dr. Corredor pudo asumir el profundo análisis de las preguntas de investigación desde su visión de la célula, de la bioquímica, de la ciencia. Mis colegas recuerdan que se reunían con él en la oficina de la decanatura una vez por semana y tenían largas conversaciones en torno a la ciencia, jornadas estas agotadoras, pero que permitieron que el grupo se fortaleciera y que sus miembros encontraran, cada uno, su lugar en este universo del conocimiento.

Algunas veces cerraba los ojos, y cuando todos pensaban que se había dormido, los abría y hacía la pregunta pertinente, con lo que demostraba la enorme capacidad de escucha que tenía y que complementaba con su habilidad innata para proyectar cada uno de los temas a una dimensión mucho mayor. Hombre sensible, brillante e inteligente como pocos. Aún ahora, escribiendo estas líneas, siento el corazón arrugado, y de forma egoísta pienso cuán valioso sería su consejo en este momento de nuestras vidas.

Estando yo en Francia, el Dr. Corredor viajó con varios decanos de facultades de ciencias a revisar temas varios, que no hacen parte de esta reflexión. En ese viaje tuvimos la ocasión de recibirlos a todos en compañía de mi marido y acompañarlos a hacer turismo relajado y tranquilo en una camioneta de reparto no muy adecuada para las visitas. A todos los decanos les resultó muy divertida la experiencia. Rememoro este pasaje ahora por el impacto que en todos marcó su carácter tranquilo y su curiosidad, casi felina, dignos signos de un líder innato que, sin pretenderlo, nos arropaba con sus pensamientos y nos hacía partícipes de sus sueños.

Él era un habitante del mundo. Ningún tema le era ajeno, tenía, realmente, un proyecto de vida. Pensaba que si veíamos el mundo desde la física o la matemática, podíamos entender mejor el funcionamiento de la célula, de los organismos multicelulares y, en general, de los seres vivos. Amaba profundamente su país y tenía confianza en que se podían cambiar las cosas, aun aquellas que estaban ancladas en el tiempo. Ello le permitió aportar en la transformación de esquemas arcaicos de enseñanza, lo que, estoy segura, tendrá impacto en el futuro si nosotros, sus discípulos, y lo digo con orgullo, podemos continuar su legado, que bien podría resumirse como “enseñar a aprender”.

Uno de los grandes cambios que quiso implantar fue la enseñanza integrada en la facultad de ciencias, la cual requería que los mismos maestros aprendieran a discutir y a enseñar de forma interdisciplinaria, sin perder la fortaleza de sus disciplinas. Estos cambios requieren no solo de un profundo conocimiento de las disciplinas, sino de un enorme acto de generosidad y desapego, y, sobre todo, de que los maestros reconozcamos que nuestros pares, nuestros alumnos, y la sociedad misma, son también nuestros maestros. Eso lo aprendí de Carlos Corredor. Hombre culto y generoso con quien hubiera deseado tener muchos más encuentros para forzarme a leer y a ampliar mi conocimiento en temas que él manejaba con tanta fluidez. Cumplía a cabalidad la máxima que dice que el buen maestro no es aquel que enseña más, sino aquel que hace que sus estudiantes estudien más. Ya te extrañamos Carlos Corredor, pero tu huella seguirá viva en aquellos que te conocimos, que te recordamos con inmenso cariño y agradecemos el privilegio de habernos cruzado en la vida con un ser como tú.

Susana Fiorentino

Profesora Titular. Departamento de Microbiología. Facultad de Ciencias.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

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.

