



ISSN 0370-3908 · eISSN 2382-4980

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





ISSN 0370-3908 • eISSN 2382-4980

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

Vol. 47 • Número 185 • Págs. 757-1092 • Octubre - Diciembre de 2023 • Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editora

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

Asistente editorial Carolina Acosta

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

Editores asociados

Ciencias Biomédicas

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

Ciencias del Comportamiento

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

Ciencias Físicas

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

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

Ciencias Naturales

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

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

Ciencias Químicas

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

Ciencias de la tierra

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

Matemáticas

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

Comité científico internacional

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

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

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

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

Periodicidad: trimestral
Fecha de inicio: 1936

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

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

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización previa de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.



ISSN 0370-3908 · eISSN 2382-4980

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

Vol. 47 · Número 185 · Págs. 757-1092 · Octubre - Diciembre de 2023 · Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Ciencias Biomédicas

Biomedical Sciences

Artículo original

La respuesta inmune de algunas especies del género *Rhodnius* modifica la circulación de genotipos de *Trypanosoma cruzi* y *T. rangeli* en varias regiones de América Latina

The immune response of some *Rhodnius* species modifies *Trypanosoma cruzi* and *T. rangeli* genotype circulation in several Latin American regions

Gustavo Adolfo Vallejo, Hamilton Julián Barbosa, Yazmín Suarez, Arlid Meneses, Julio César Carranza, Daniel Alfonso Urrea, Felipe Guhl, Diana Carolina Hernández, Juan David Ramírez

765

Artículo original

Análisis teórico de la incidencia del vector de magnetización en el plano de la barrera sobre la TMR a temperatura cero

Theoretical analysis of the incidence of the magnetization vector in the barrier plane on TMR at zero temperature

Julián A. Zúñiga

785

Original article

Geometric uncertainty in non-paraxial interference

Incertidumbre geométrica en interferencia no-paraxial

Román Castañeda

795

Original article

Influence of the temperature on the band-gap energy of reduced graphene-oxide nanoplatelets described with the Varshni model

Influencia de la temperatura en la brecha energética de nanoplaquetas de óxido de grafeno reducido según el modelo de Varshni

John Jairo Prías-Barragán

807

Artículo original

Información astronómica en la primera publicación periódica del Nuevo Reino de Granada

Astronomical information in the first periodical of the New Kingdom of Granada

J. Gregorio Portilla

822

Ciencias Físicas

Physical Sciences

Artículo original

Ajuste de los modelos de velocidad de transferencia de gases en el embalse tropical andino Porce III

Adjustment of gas transfer velocity models in the tropical Andean reservoir Porce III

Eliana Bohórquez-Bedoya, Jhonier Andrés Guevara-Cáceres, Andrés Gómez-Giraldo,

Juan Gabriel León-Hernández 837

Artículo original

Evaluación del impacto de la acidificación en la calidad del agua de la quebrada Quilcayhuanca, Ancash, Perú

Evaluation of the impact of acidification on the water quality of Quebrada Quilcayhuanca,

Ancash, Perú

Nestor Crisanto-Rojas, José Iannacone 849

Original article

Historical perspective and state of knowledge of the non-avian reptiles (Vertebrata: Sauropsida) of the Department of Caldas, Central Andes of Colombia

Perspectiva histórica y estado del conocimiento de los reptiles no aviares (Vertebrata: Sauropsida)

en el departamento de Caldas, Andes centrales de Colombia

Julián A. Rojas-Morales, Héctor F. Arias-Monsalve, L. Santiago Caicedo-Martínez,

José J. Henao-Osorio, Erika Alejandra Cardona-Galvis, Héctor E. Ramírez-Chaves 868

Original article

Beyond hippos: Evidence of an introduced deer in Colombia

Más allá de los hipopótamos: evidencia de un venado introducido en Colombia

Héctor E. Ramírez-Chaves, Néstor Roncancio-Duque, Darwin M. Morales-Martínez 882

Original article

Analysis of the distribution and abundance of two species of cat's claw (*Uncaria* sp.) based on the knowledge of Tikuna indigenous communities in the southern Colombian Amazon

Análisis de la distribución y abundancia de dos especies de uña de gato (*Uncaria* sp.) con base

en el conocimiento de comunidades indígenas Tikuna del sur de la Amazonia colombiana

Lina Paola Garzón 889

Nota editorial/Editorial note 902

Original article

Miocene paleogeography of northwest Colombia: A review of the sedimentary and magmatic evolution of the Amagá Basin a century after Grosse's work

Paleogeografía del Mioceno en el noroccidente de Colombia: una revisión de la evolución

sedimentaria y magmática de la cuenca de Amagá un siglo después del trabajo de Grosse

Sebastián Zapata, Juan Sebastián Jaramillo-Ríos, Gladys Eliana Botello, Astrid Siachoque,

Laura Cristina Calderon-Díaz, Agustín Cardona, Christy Till, Victor Valencia 904

Original article

Eocene to Miocene palynology of the Amagá Basin (Cauca Valley, Colombia) compared to the Caribbean Region

Palinología del Eoceno al Mioceno de la cuenca de Amagá (Valle del Cauca, Colombia)

comparada con la Región Caribe

Andrés Pardo-Trujillo, Angelo Plata-Torres, Edwin Ramírez, Felipe Vallejo-Hincapié,

Raúl Trejos-Tamayo 925

Original article

**Fossil leaves, woods, gastropods, and a crocodile tooth:
Is the Amagá Formation worth exploring?**

Fósiles de hojas, maderas, gasterópodos y un diente de cocodrilo,
¿vale la pena explorar la Formación Amagá?

Andrés Cárdenas, José Daniel Giraldo, Daniel Monterrosa, Marion Weber 943

Essay

Deciphering the footprint of Emil Grosse from Germany to Brazil: a brief review

Siguiendo la huella de Emil Grosse entre Alemania y Brasil: una breve reseña

Felipe Velásquez-Ruiz, Marion Weber-Scharff, Federico Cuadros-Jimenez 952

Artículo original

**Carbono en el Pacífico sudamericano: reservas en comunidades vegetales
de un humedal costero en Perú**

Carbon in the South American Pacific: discovering the reserves in vegetal communities
of a coastal wetland in Perú

Ronal Chavez, Héctor Aponte 962

Artículo original

**Dinámicas espacio-temporales de la deforestación en los municipios de Riosucio
y Río Quito, Chocó, Colombia**

Spatial and temporal dynamics of deforestation in Riosucio and Río Quito municipalities,
Chocó, Colombia

Jhon Restrepo, Natalia Hoyos, Juan Restrepo 977

Artículo original

**Dinámicas de cambio de las coberturas del suelo y su impacto en el sector suroriental
de Pasto, Colombia**

Dynamics of land cover change and its impact in the southeastern sector of Pasto, Colombia

Samia-del-Mar Yela-Lara, Aida-Elena Baca-Gamboa 996

Original article

**Analysis of academic trajectories of higher education students by means of an
absorbing Markov chain**

Análisis de las trayectorias académicas de estudiantes de educación superior utilizando
una cadena de Markov absorbente

José Luis Batún, Rubén Cool, Henry Pantí 1008

Artículo original

Conjuntos Sidon en Contextos Finitos

Sidon Sets in Finite Contexts

Carlos Alberto Trujillo Solarte 1024

Original article

On the Kronecker problem and partially ordered sets with involution

Sobre el problema de Kronecker y conjuntos parcialmente ordenados con involución

Ivon Dorado, Gonzalo Medina 1045

Ensayo/ Essay

El Premio Nobel de Fisiología o Medicina 2023

The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2023

Juana Ángel 1061

Comentario bibliográfico/Bibliographic commentary

Breaking Through: My Life in Science

Rompiendo avances: mi vida en la ciencia

Juan Guillermo McEwen 1063

Opinión/ Opinion

Entre mitos y conceptos erróneos: el caso del microbioma

Between myths and misconceptions: the case of the microbiome

María Mercedes Zambrano 1065

Agradecimientos

Acknowledgements 1068

Índice autores

Authors Index 1069

Índice de artículos

Article Index 1071

Enfoque y alcance

Focus and Scope 1080

Nuestra portada/Our cover



Machos adultos, hembras y juveniles del *Axis axis* introducidos en Colombia. Fotografía: Román Jiménez.

Axis axis adult and juveniles (male and female) introduced in Colombia. Photograph: Román Jiménez.

Ver artículo

Más allá de los hipopótamos: evidencia de un venado introducido en Colombia

Beyond hippos: Evidence of an introduced deer in Colombia

 **Héctor E. Ramírez-Chaves**,  **Néstor Roncancio-Duque**,
 **Darwin M. Morales-Martínez**

doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1953>

Artículo original

La respuesta inmune de algunas especies del género *Rhodnius* modifica la circulación de genotipos de *Trypanosoma cruzi* y *T. rangeli* en varias regiones de América Latina

The immune response of some *Rhodnius* species modifies *Trypanosoma cruzi* and *T. rangeli* genotype circulation in several Latin American regions

✉ Gustavo Adolfo Vallejo^{1,*}, ✉ Hamilton Julián Barbosa¹, ✉ Yazmín Suarez¹,
✉ Arlid Meneses¹, ✉ Julio César Carranza¹, ✉ Daniel Alfonso Urrea¹, ✉ Felipe Guhl²,
✉ Diana Carolina Hernández^{3,4}, ✉ Juan David Ramírez^{3,5}

¹Laboratorio de Investigaciones en Parasitología Tropical (LIPT), Facultad de Ciencias, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

²Centro de Investigaciones en Microbiología y Parasitología Tropical (CIMPAT), Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

³Centro de Investigaciones en Microbiología y Biotecnología-UR (CIMBIUR), Facultad de Ciencias Naturales, Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia

⁴Centro de Tecnología en Salud (CETESA), Innovaseq SAS, Bogotá, Colombia

⁵Molecular Microbiology Laboratory, Department of Pathology, Molecular and Cell-based Medicine, Icahn School of Medicine at Mount Sinai, New York, NY, USA

Artículo de posesión de Gustavo Adolfo Vallejo como miembro de número de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Citación: Vallejo GA, Barbosa HJ, Suarez Y, *et al.* La respuesta inmune de algunas especies del género *Rhodnius* modifica la circulación de genotipos de *Trypanosoma cruzi* y *T. rangeli* en varias regiones de América Latina. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185):765-784, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1959>

Editor: John M. González

***Correspondencia:**

Gustavo Adolfo Vallejo;
gvallejo@ut.edu.co

Recibido: 28 de julio de 2023

Aceptado: 14 de noviembre de 2023

Publicado en línea: 11 de diciembre de 2023



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

Resumen

La respuesta inmune de los triatominos se expresa en la hemolinfa, la saliva y el intestino a través de los eicosanoides, el sistema profenoloxidasa, los péptidos antimicrobianos, las especies reactivas de oxígeno, las reactivas de nitrógeno y los factores de la microbiota intestinal. El género *Rhodnius*, conformado por 21 especies organizadas en tres grupos, *pallescens*, *pictipes* y *prolixus*, actúan como vectores de *Trypanosoma cruzi* y *T. rangeli* en diferentes regiones de Latinoamérica. En varios estudios se ha reportado la actividad lítica en la hemolinfa y en las glándulas salivales de *Rhodnius prolixus* y *R. robustus*, del grupo *prolixus*, contra algunos genotipos de *T. cruzi* y *T. rangeli*. Esta actividad lítica no se ha observado en las especies estudiadas de *Triatoma* y *Panstrongylus* ni en *R. pallescens*, *R. colombiensis* y *R. ecuadoriensis* del grupo *pallescens*, o *R. pictipes* del grupo *pictipes*. En estudios proteómicos de la hemolinfa y las glándulas salivales de *R. prolixus* y *R. colombiensis* se detectaron diferencias en proteínas de respuesta inmune que estarían asociadas con la actividad lítica. Esta respuesta inmune, además de los factores de la microbiota intestinal, la distribución geográfica de los vectores, y los genotipos del parásito, ha llevado a plantear la hipótesis de que el grupo *prolixus* está conformado por vectores con factores inmunes que determinan la transmisión selectiva de algunos genotipos de *T. cruzi* y *T. rangeli*, lo que ha modificado la distribución geográfica de estos parásitos en el continente americano. En esta revisión de la interacción parásito-vector, se presentan resultados publicados entre 1982 y 2023 para respaldar la hipótesis planteada.

Palabras clave: inmunidad innata; factores líticos; *Rhodnius*; *Trypanosoma cruzi*; *Trypanosoma rangeli*.

Abstract

The immune response of triatomines is represented in the hemolymph, saliva, and intestine by eicosanoids, the prophenoloxidase system, antimicrobial peptides, reactive oxygen species, reactive nitrogen species, and intestinal microbiota factors. The *Rhodnius* genus consists of 21 species organized into three groups: *pallescens*, *pictipes*, and *prolixus*, acting as vectors for *Trypanosoma cruzi* and *T. rangeli* in different Latin American regions. Various studies have reported lytic activity

in the hemolymph and salivary glands of *Rhodnius prolixus* and *R. robustus* from the prolixus group, targeting some *T. cruzi* and *T. rangeli* genotypes. Such lytic activity has not been observed in *Triatoma* and *Panstrongylus* species, in *R. pallescens*, *R. colombiensis*, and *R. ecuadoriensis* from the *R. pallescens* group, nor in *R. pictipes* from the pictipes group. Proteomic studies in *R. prolixus* and *R. colombiensis* haemolymph and salivary glands have detected differences regarding immune response proteins, strongly suggesting an association with lytic activity. Such immune response, linked to factors concerning intestinal microbiota, the vectors' geographical distribution, and the parasite's genotypes, has resulted in the hypothesis that the prolixus group consists of various vectors with immune factors that determine the selective transmission of some *T. cruzi* and *T. rangeli* genotypes and have modified the geographical distribution of these parasites in the American continent. The present review on the parasite-vector interaction was based on results reported between 1982 and 2023 that clearly support the proposed hypothesis.

Key words: Innate immunity; lytic factors; *Rhodnius*; *Trypanosoma cruzi*; *Trypanosoma rangeli*.

Introducción

La enfermedad de Chagas, causada por *T. cruzi*, se registra en 21 países americanos; se estima que hay 6 a 7 millones de personas infectadas y cerca de 12.000 muertes cada año (**World Health Organization, WHO, 2022**). La forma más común de la infección se da por transmisión vectorial cuando las heces y la orina de los triatomínicos con parásitos infectivos entran en contacto con la piel o las mucosas. La infección también puede ocurrir por transfusiones sanguíneas y trasplantes de órganos, por transmisión vertical de la madre al hijo, por infección oral al ingerir bebidas o comidas contaminadas con el parásito, y por accidentes de laboratorio (**Rassi et al., 2010; Rueda et al., 2014; Velásquez-Ortiz et al., 2022**).

Trypanosoma cruzi está dividido en seis unidades taxonómicas discretas de tipificación (*Discrete Typing Unit, DTU*), denominadas *T. cruzi* I-VI (**Zingales et al., 2009, 2012**); posteriormente se describió un séptimo grupo denominado *T. cruzi* bat (**Marcili et al., 2009**). Estas DTU tienen una amplia distribución en América, con predominio en algunas regiones; dicha distribución podría estar relacionada con la especie del triatomo, la respuesta inmune del vector y el genotipo del parásito (**Zingales et al., 2012**). Se han descrito 160 especies de insectos vectores, tres extintas y 157 vivientes, de las cuales 153 se encuentran en el continente americano y tienen la capacidad potencial de transmitir *T. cruzi* en condiciones naturales o de laboratorio (**Justi & Galvão, 2017; Galvão, 2021; Gil-Santana et al., 2022; Zhao et al., 2021, 2023**).

Cabe resaltar que *T. rangeli* no es patógeno para los mamíferos y se encuentra en infecciones mixtas con *T. cruzi* en los vertebrados y en los triatomínicos (**Guhl & Vallejo, 2003**). Se han descrito hasta ahora cinco genotipos de *T. rangeli* (A-E) (**Maia da Silva et al., 2007, 2009**) y, aunque este puede encontrarse en el intestino de muchos triatomínicos, sus vectores biológicos son las especies de *Rhodnius*, cuyas glándulas salivales invade, produciendo tripomastigotes metacíclicos que se transmiten en la saliva del insecto (**Marinkelle, 1968; Guhl & Vallejo, 2003**). Las especies del género *Rhodnius* son primariamente arborícolas asociadas con nidos de animales localizados en los huecos de los árboles y palmeras; se han clasificado en tres grupos: pallescens, pictipes y prolixus con base en su distribución geográfica, biogeografía, morfología y análisis filogenético (**Justi & Galvão, 2017; Hernández et al., 2020; Zhao et al., 2021**) (**Tabla 1**).

Tabla 1. Grupos y especies del género *Rhodnius*

Género	Grupos	Especies
<i>Rhodnius</i>	pallescens	<i>colombiensis, ecuadoriensis, pallescens</i>
	pictipes	<i>amazonensis, brethesi, paraensis, pictipes, stali, zeledoni, micki</i>
	prolixus	<i>barretti, dalessandroi, domesticus, milesi, marabaensis, montenegrensis, nasutus, neglectus, neivai, prolixus, robustus</i>

Tomado de **Justi & Galvão (2017); Hernández et al., (2020); Zhao et al., 2021**

Con el objetivo de buscar evidencias sobre el papel de la respuesta inmune de algunas especies de *Rhodnius* en la modificación de la transmisión de los parásitos, la presente revisión se propuso mostrar: i) la actividad lítica observada en especies del grupo prolixus, específicamente en las DTU de *T. cruzi*, y en los genotipos de *T. rangeli*; ii) la distribución de las DTU de *T. cruzi* aisladas de infecciones naturales en las especies de *Rhodnius*, así como en *Triatoma infestans*; iii) la distribución de los genotipos de *T. rangeli* aislados de *Rhodnius* spp, y iv) los estudios comparativos sobre los factores inmunes detectados en la hemolinfa y la saliva de *R. prolixus* (con actividad lítica) y *R. colombiensis* (sin actividad lítica) que podrían actuar contra varias DTU de *T. cruzi* y genotipos de *T. rangeli*. También se revisaron algunos reportes sobre el papel de la microbiota intestinal de los vectores que, conjuntamente con los factores líticos observados en la hemolinfa y las glándulas salivares, determinarían una transmisión selectiva de los parásitos, modificando su distribución geográfica.

Factores inmunes del vector que pueden afectar la transmisión de las DTU de *T. cruzi* y los genotipos de *T. rangeli*

En la **figura 1** se resumen los principales componentes del sistema inmune de los triatominos, el cual es considerado como un sistema innato, constituido por la interacción de componentes humorales y celulares. El componente humoral está representado por el sistema profenoloxidasa (*prophenoloxidase*, proPO), los péptidos antimicrobianos (PAM), el sistema de coagulación de la hemolinfa, las especies reactivas de oxígeno (ERO), las reactivas de nitrógeno (ERN) y los precursores lipídicos conocidos como eicosanoides. El sistema inmune celular está representado por los hemocitos, cuya función es la fagocitosis, aunque también están involucrados en la formación de la membrana basal, la reparación de heridas y la producción de los PAM, las ERN, las ERO y el proPO (Azambuja *et al.*, 2017; Salcedo-Porras & Lowenberger, 2019; Rojas-Pirela *et al.*, 2023). Estos factores humorales pueden ser secretados directamente al hemocele o lumen intestinal como componentes de la respuesta inmune para eliminar patógenos potenciales adquiridos durante la alimentación (García *et al.*, 2010a).

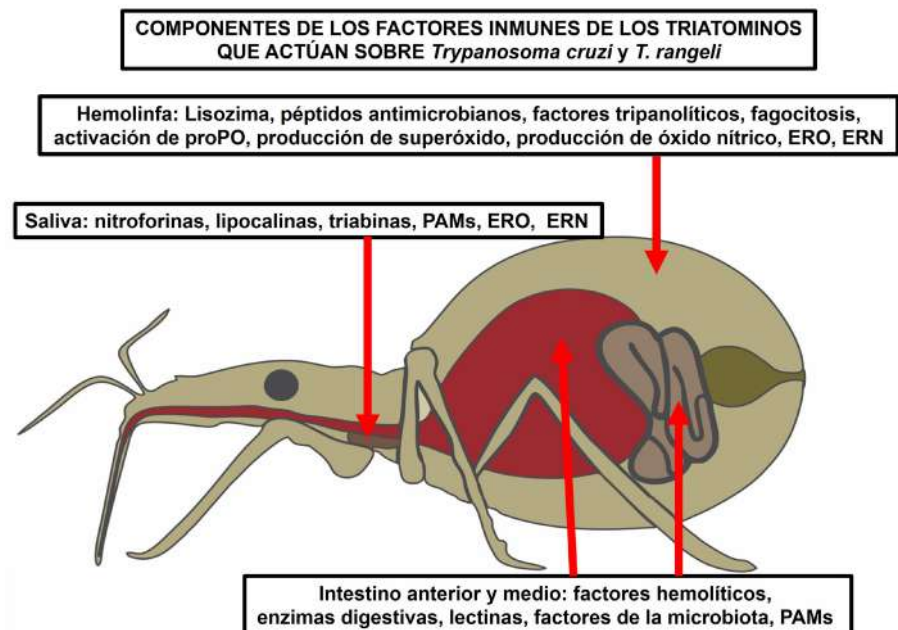


Figura 1. Factores de la respuesta inmune identificados en los triatominos. Adaptado de García *et al.* (2007) y Azambuja *et al.* (2017)

En cuanto al tiempo de respuesta, los mecanismos de inmunidad pueden actuar de dos formas: una, considerada como respuesta inducida, ocurre cuando el insecto se expone a un estímulo (infección), caso en el que los péptidos antimicrobianos actuarían como respuesta inducida, pues se ha observado que cuando el insecto se infecta con *T. cruzi* se produce en su intestino una variación en la expresión de estos PAM (Vieira *et al.*, 2016). Por otro lado, las respuestas constitutivas son mecanismos que siempre están listos a actuar, como la ruta metabólica del sistema profenoloxidasa (Zumaya-Estrada *et al.*, 2018). Las nitroforinas, las especies reactivas de oxígeno (ERO) y las especies reactivas de nitrógeno (ERN) se consideran parte de la respuesta innata constitutiva y se expresan principalmente en la hemolinfa y en la saliva.

Cuando se produce la infección de *T. cruzi* en el intestino del vector, se activan varios factores limitantes contra el parásito, incluidos factores líticos del estómago, lectinas, enzimas del intestino, compuestos antimicrobiales, óxido nítrico y factores derivados de la microbiota, como lo describen García & Azambuja (1991), Kollien & Schaub (2000) y García *et al.* (2007, 2010a, 2010b). En cuanto a la microbiota intestinal de los triatominos, esta tiene un papel importante en la regulación de la respuesta inmune contra posibles patógenos. En este sentido, Castro *et al.* (2012) observaron que cuando algunos genotipos de *T. cruzi* infectan al vector, se producen péptidos antimicrobianos que reducen la microbiota intestinal. Los autores también encontraron que cuando *R. prolixus* es infectado con *T. cruzi* Dm28c (DTU TcI) ocurre una disminución de las bacterias intestinales y el parásito se multiplica rápidamente, mientras que en la infección con la cepa Y (DTU TcII) no hay una disminución significativa de la microbiota y el parásito no se desarrolla en el intestino del vector.

Azambuja *et al.* (2004) demostraron que *Serratia marcescens* tiene actividad lítica en el intestino de *R. prolixus* contra la cepa Y (DTU TcII), pero no sobre Dm28c (DTU TcI). Vallejo *et al.* (2009b) y Kieran *et al.* (2019) confirmaron que los filos más prevalentes en la microbiota de 87 triatominos vectores fueron Actinobacteria, Bacteroidetes, Firmicutes, y Proteobacteria. Aunque el conocimiento de la interacción de la microbiota intestinal con los diferentes grupos de *T. cruzi* y *T. rangeli* aún es incompleto, se espera que la descripción de los factores de la mayoría de las bacterias presentes en la microbiota de los triatominos y de su interacción con los parásitos, pueda contribuir al entendimiento de la compleja epidemiología de las dos especies, con el fin de determinar nuevas estrategias que permitan interrumpir los ciclos de transmisión de la enfermedad de Chagas.

Observaciones sobre la actividad lítica de la hemolinfa y de la saliva del grupo *prolixus* en *T. cruzi*

Las primeras observaciones fueron efectuadas por Alvarenga & Bronfen (1982), quienes inocularon las cepas Y (TcII) y CL (TcVI) en el hemocele de *Triatoma infestans* y *Dipetalogaster maxima* y encontraron que los parásitos persistieron en la hemolinfa de estos insectos hasta 40 días. En contraste, Mello *et al.* (1996) observaron una temprana y fuerte actividad lítica cuando incubaron la hemolinfa de *R. prolixus* con la cepa Y (TcII), pero no así con las cepas Dm28c (TcI) o CL después de tres horas de incubación. Estos primeros reportes en la literatura científica mostraron que la hemolinfa de *R. prolixus* presentaba factores inmunes innatos, responsables de una rápida actividad tripanolítica contra algunos genotipos de *T. cruzi*, y que esta actividad tripanolítica estaba ausente en la hemolinfa de *T. infestans* y *D. maxima*.

Buscando nuevas evidencias de esta respuesta inmune en *R. prolixus*, Suárez-Quevedo *et al.* (2020) utilizaron epimastigotes de *T. cruzi* de las DTUs I-VI, *T. cruzi* bat y *T. cruzi marinkellei* para detectar la sensibilidad o resistencia a los factores tripanolíticos en incubaciones con la hemolinfa. Los autores encontraron que después de ensayos con seis cepas de *T. cruzi* I no se observó lisis durante las primeras 14 horas de incubación, en tanto que *T. cruzi* III mostró una disminución del 13 % en el número de parásitos y no se observó actividad tripanolítica contra *T. cruzi* IV. Sin embargo, se observó una fuerte

actividad lítica contra *T. cruzi* II, V, VI, *T. cruzi* bat y *T. cruzi marinkellei*, con disminuciones del 90 al 96 % en los recuentos de parásitos vivos registrados en las primeras 14 h de incubación. Sin embargo, el resultado más intrigante del estudio de **Suárez-Quevedo et al.** (2020) fue que ninguna hemolinfa de otras especies estudiadas, como *R. pallescens*, *R. colombiensis*, *R. pictipes*, *T. dimidiata*, *T. maculata* y *Panstrongylus geniculatus*, mostró actividad tripanolítica contra cualquiera de las DTUs de *T. cruzi* después de 24 h de incubación. Los autores demostraron que la presencia de la actividad tripanolítica de la hemolinfa de *R. prolixus* es independiente del tiempo transcurrido desde la recolección de los insectos en el campo o del transcurrido durante el mantenimiento de las colonias en el laboratorio, así como de las áreas geográficas de recolección de los vectores, del tiempo de mantenimiento de los parásitos en cultivo, del origen de la hemolinfa (adultos o ninfas) o de la fuente de alimento de los insectos (sangre de gallina o sangre de ratón). También observaron la actividad lítica contra las mismas DTU de *T. cruzi* en la hemolinfa de *R. robustus*, corroborando igual respuesta de acción rápida a la observada en la hemolinfa de *R. prolixus*. Por otro lado, **Gaitán-Veloza** (2022) demostró que la actividad lítica observada en la hemolinfa contra epimastigotes de *T. cruzi* II también actuaba contra los tripomastigotes metacíclicos de *T. cruzi* II. Además, **Barbosa et al.** (2021) reportaron la actividad lítica de la saliva de *R. prolixus* contra epimastigotes de *T. cruzi* II, pero no contra *T. cruzi* I. En resumen, esta actividad tripanolítica se ha observado en *R. prolixus* y *R. robustus*, dos representantes principales del grupo prolixus, pero no se ha observado en ninguna de las especies del grupo pallescens ni en *R. pictipes*, la especie más representativa del grupo pictipes. No se descarta que la actividad lítica de la hemolinfa de *R. prolixus* y *R. robustus* pueda complementar el papel modulador de la microbiota intestinal en la transmisión de las DTU de *T. cruzi*.

Observaciones sobre la actividad lítica de la hemolinfa del grupo *prolixus* contra genotipos *T. rangeli*

Para responder al interrogante sobre si la actividad lítica contra *T. cruzi* también podría afectar a *T. rangeli*, en experimentos *in vitro* **Sánchez et al.** (2005) y **Pulido et al.** (2008) observaron que la hemolinfa de *R. prolixus* lisaba los epimastigotes de cultivo de cepas de *T. rangeli* del genotipo C, aisladas de glándulas salivares de *R. colombiensis*, *R. ecuadoriensis* y *R. pallescens*. En los experimentos *in vivo* de **Sánchez et al.** (2005), se observó que al inocular el hemocele de *R. prolixus* con el genotipo C de *T. rangeli*, los parásitos en la hemolinfa desaparecieron rápidamente. En contraste, los epimastigotes de *T. rangeli* del genotipo A fueron completamente resistentes a la lisis cuando se enfrentaron con la hemolinfa de *R. prolixus*. Previamente, **Vallejo et al.** (1986) habían encontrado que al inocular el genotipo A de *T. rangeli* en el hemocele de *R. prolixus*, durante dos meses de observación los parásitos produjeron tripomastigotes metacíclicos infectivos en las glándulas salivares. Estos resultados son similares a los reportados por **Mello et al.** (1995), quienes inocularon la cepa *T. rangeli* San Agustín (genotipo A de Colombia) en el hemocele de *R. prolixus*, observando durante varios días la multiplicación del parásito con actividad de lisozima, y sin actividad lítica ni producción de péptidos antimicrobianos.

La ausencia de actividad lítica en la hemolinfa del grupo prolixus contra el genotipo A de *T. rangeli* explicaría por qué después de caracterizar 35 cepas de *T. rangeli* aisladas de glándulas salivares de *R. prolixus* en Colombia y Honduras (**Salazar-Anton et al.**, 2009), de *R. neglectus* silvestre en el Distrito Federal de Brasil (**Gurguel-Goncalves et al.**, 2004), de *R. prolixus* silvestre en Casanare, Colombia (**Urrea et al.**, 2011), y de *R. robustus* en Venezuela y Brasil, todas las cepas correspondieron al genotipo A (**Maia da Silva et al.**, 2007; **Vallejo et al.**, 2015), y ninguna glándula salival de los vectores se encontró infectada con los genotipos C o E, los cuales son sensibles a la lisis causada por la hemolinfa de *R. prolixus* y *R. robustus*, como lo reportaron **Suárez-Quevedo et al.** (2020). Estos autores tampoco encontraron actividad lítica en la hemolinfa de *R. pallescens*, *R. colombiensis*, *R. ecuadoriensis*, *R. pictipes*, *T. dimidiata*, *T. maculata*, y *P. geniculatus* contra *T. rangeli*. Por

otro lado, **De Stefani-Marques et al.** (2006) obtuvieron resultados similares al infectar oralmente a *P. megistus*, *T. infestans*, *T. sordida*, *T. braziliensis*, y *T. vitticeps* con una cepa de *T. rangeli* aislada en Uberaba-Minas Gerais, Brasil, donde *R. neglectus* y el genotipo A son predominantes, observando que los parásitos persistieron en la hemolinfa por 10 y 30 días sin invasión de las glándulas salivares, con lo que confirmaron la ausencia de factores líticos de actividad inmediata en la hemolinfa de estos vectores. En conclusión, la actividad lítica de la hemolinfa contra los genotipos C y E de *T. rangeli* sólo se ha observado en *R. prolixus* y *R. robustus* hasta el momento.

DTU de *T. cruzi* aisladas de infecciones naturales en las especies de los grupos *pallescens*, *pictipes* y *prolixus* en diferentes regiones de América Latina

Como se señaló, varios autores han registrado actividad lítica en la hemolinfa de *R. prolixus* y *R. robustus* contra *T. cruzi* II, III, V, VI, *T. cruzi* bat y *T. cruzi marinkellei*, pero no contra *T. cruzi* I y IV. Asimismo, se ha confirmado la actividad lítica en la saliva de *R. prolixus* contra *T. cruzi* II, pero no contra *T. cruzi* I (**Suárez-Quevedo et al.**, 2020; **Barbosa**, 2021; **Gaitán-Velosa**, 2022). También se ha reportado que la microbiota intestinal de *R. prolixus* impide la transmisión de *T. cruzi* II pero no la de *T. cruzi* I (**Castro et al.**, 2012). Según esto, cuando se analizan las DTU de *T. cruzi* aisladas en las especies del grupo *prolixus*, se espera que su distribución refleje el efecto de la respuesta inmune de *R. prolixus* y *R. robustus* sobre los parásitos, de manera que predominen *T. cruzi* I y *T. cruzi* IV, y haya poca presencia de *T. cruzi* II, III, V, VI y *T. cruzi* bat. En la **tabla 2** se muestra la distribución de las DTU de *T. cruzi* detectadas en especies de

Tabla 2. Las DTU de *Trypanosoma cruzi* aisladas de especies de *Rhodnius* en diferentes regiones de América Latina

Especie	Región geográfica	TcI N (%)	TcII N (%)	TcIII N (%)	TcIV N (%)	TcV N (%)	TcVI N (%)	TcBat N (%)
<i>R. brethesi</i>	Brasil	9 (52,94)		1 (5,88)	7 (41,17)			
<i>R. colombiensis</i>	Colombia	5 (100)						
<i>R. ecuadoriensis</i>	Ecuador	62 (100)						
<i>R. neglectus</i>	Brasil	2 (66,66)	1 (3,33)					
<i>R. pallescens</i>	Colombia Costa Rica Panamá	24 (100)						
<i>R. pictipes</i>	Brasil Venezuela	71 (97,26)	2 (2,73)					
<i>R. prolixus</i>	Brasil Colombia Guatemala Venezuela	288 (97,62)			6 (2,03)		1 (0,33)	
<i>R. robustus</i>	Bolivia Colombia Brasil	24 (75)			8 (25)			
<i>R. stali</i>	Bolivia Brasil	14 (100)						
Total		499 (95,04)	3 (0,57)	1 (0,19)	21 (4)		1 (0,19)	

Fuente: **Breniere et al.**, 2016

Rhodnius en diferentes regiones de América Latina según **Breniere et al.** (2016). Se observa que en *R. prolixus* se aislaron 288 cepas de *T. cruzi* I y ninguna de *T. cruzi* II, en tanto que en *R. robustus* se aislaron 24 cepas de *T. cruzi* I, seis de *T. cruzi* IV y ninguna de *T. cruzi* II. Los resultados en *R. prolixus* y *R. robustus* muestran que no se aisló *T. cruzi* III, pero sí *T. cruzi* IV, lo que se ajusta al hecho de que la hemolinfa de estas dos especies tiene actividad lítica contra *T. cruzi* III pero no contra *T. cruzi* IV. Según **Breniere et al.** (2016), se aisló una cepa de *T. cruzi* II en la especie *R. neglectus*, en la que todavía no se ha evidenciado experimentalmente la presencia de factores líticos, y dos cepas de *T. cruzi* II en *R. pictipes*, en la que **Suárez-Quevedo et al.** (2020) no detectaron factores líticos en la hemolinfa.

Otros estudios en especies de *Rhodnius* de Colombia, Venezuela y Perú muestran que la DTU más frecuentemente detectada es *T. cruzi* I, que *T. cruzi* III y IV son poco frecuentes y que *T. cruzi* II, V y VI son de escasa circulación (**Carrasco et al.**, 2012; **Padilla et al.**, 2017; **Velásquez-Ortiz et al.**, 2022). Llama la atención que a pesar de la detección del ADN de *T. cruzi* II en el intestino de los insectos (**Vallejo et al.**, 2009a; **Guhl & Ramírez**, 2013), el aislamiento de parásitos vivos de *T. cruzi* II en Colombia y Venezuela ha sido infructuoso frente a los cientos de cepas de *T. cruzi* I aisladas. Podría ser que la circulación de *T. cruzi* II sea realmente muy escasa o que las reacciones de PCR detecten solamente ADN de parásitos no viables o muertos.

Es importante resaltar que **Breniere et al.** (2016) encontraron marcadas diferencias en la distribución de las DTU de *T. cruzi* aisladas de *T. infestans*, principal vector de *T. cruzi* en Argentina, Bolivia, Brasil y Chile, Paraguay y Perú, y de las DTU detectadas en las especies de *Rhodnius*, como puede observarse en la **tabla 3**.

Dichas diferencias podrían estar relacionadas con el hecho de que *T. infestans* no presenta factores líticos en la hemolinfa contra las cepas Y (Tc II) y CL (Tc VI), como lo observaron **Alvarenga & Bronfen** (1982). Es probable que otras especies del género *Triatoma* no posean factores tripanolíticos contra *T. cruzi*, pues **Suárez-Quevedo et al.** (2020) no detectaron factores líticos en la hemolinfa de *T. dimidiata* y *T. maculata*. Se puede observar, además, la diferencia en la circulación de *T. cruzi* II, V y VI especialmente en los países del cono sur (Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Paraguay y Perú), donde predomina *T. infestans*, siendo estas mismas DTU extremadamente escasas en los países donde circula el grupo *prolixus*.

Tabla 3. Comparación de las DTU de *Trypanosoma cruzi* detectadas en especies de *Rhodnius* y en *Triatoma infestans* en diferentes regiones de América Latina

Especie	Región geográfica	TcI	TcII	TcIII	TcIV	TcV	TcVI	TcBat	Referencia
		N (%)	N (%)	N (%)	N (%)	N (%)	N (%)	N (%)	
<i>Rhodnius</i> spp	Brasil	499	3 (0,57)	1 (019)	21 (4)		1 (0,19)		Breniere et al. (2016)
	Bolivia	(95,04)							
	Colombia								
	Costa Rica								
	Ecuador								
	Guatemala								
	Venezuela								
<i>Triatoma infestans</i>	Argentina	627	37	31	1	170	194		Breniere et al. (2016)
	Bolivia	(59,15)	(3,49)	(2,92)	(0,09)	(16,03)	(18,30)		
	Brasil								
	Chile								
	Paraguay								
	Perú								

Genotipos de *T. rangeli* aislados de infecciones naturales en las especies de los grupos *pallescens*, *pictipes* y *prolixus* en diferentes regiones de América Latina

Los primeros estudios de **D'Alessandro** (1976) mostraron que las especies de *Rhodnius* son sensibles a la infección con cepas de *T. rangeli* de la misma región geográfica, pero no así de otras regiones. Señaló, asimismo, que la mayoría de las cepas aisladas en Colombia y Venezuela se desarrollan en *R. prolixus*, con excepción de las cepas aisladas de *R. pallescens* o de *R. ecuadoriensis*, las cuales no producen infección en *R. prolixus* detectable a nivel de glándulas salivares. También demostró que las cepas de *R. prolixus* aisladas en Colombia y Costa Rica no infectaban a *R. pallescens* o *R. ecuadoriensis*. Por otro lado, **Vallejo et al.** (2002) mostraron que las cepas aisladas de *R. colombiensis* no infectaban a *R. prolixus* de Colombia. Los autores demostraron por primera vez la asociación entre especies del género *Rhodnius* y genotipos de *T. rangeli* al caracterizar los genotipos de las cepas de *R. prolixus* (especie domiciliada) y *R. colombiensis* (especie silvestre) capturados en el municipio de Coyaima, Tolima, en la región central de Colombia. Todas las cepas de *T. rangeli* aisladas de las glándulas salivares de *R. colombiensis* presentaron el genotipo C y las aisladas de *R. prolixus* el genotipo A. Estos resultados sugieren que en la naturaleza las especies de *Rhodnius* son sensibles solamente a ciertos genotipos de *T. rangeli*, por lo que el vector sería un filtro biológico de determinadas poblaciones de *T. rangeli* (**Vallejo et al.**, 2002, 2015). En la **tabla 4** se presenta un resumen de 93 cepas de *T. rangeli* aisladas de varias especies de *Rhodnius* y caracterizadas según los genotipos A, B, C, D y E.

Se considera que los factores inmunes de la hemolinfa, la saliva y la microbiota intestinal son determinantes en la transmisión de *T. rangeli* por las especies de *Rhodnius*. Sin embargo, son pocos los estudios sobre la interacción de *T. rangeli* y *Rhodnius* spp; **Suárez-Quevedo et al.** (2020) detectaron factores tripanolíticos en la hemolinfa de *R. prolixus* y *R. robustus* contra los genotipos C y E de *T. rangeli*, pero las hemolinfas de *R. pallescens*, *R. colombiensis*, *R. ecuadoriensis* y *R. pictipes* no presentaron factores tripanolíticos contra ninguno de los genotipos A a E de *T. rangeli*. En futuros estudios

Tabla 4. Distribución de genotipos de *Trypanosoma rangeli* detectados en especies de *Rhodnius*

Especie	Región geográfica	Genotipo					Referencia
		A N (%)	B N (%)	C N (%)	D N (%)	E N (%)	
<i>R. brethesi</i>	Brasil		3 (100)				Maia da Silva, et al. (2007)
<i>R. colombiensis</i>	Colombia			27 (100)			Vallejo et al. (2002, 2009a)
<i>R. ecuadoriensis</i>	Perú			3 (100)			Vallejo et al. (2002, 2009a)
<i>R. pallescens</i>	Colombia, Panamá			26 (100)			Vallejo et al. (2003, 2009a); Urrea et al. (2011)
<i>R. prolixus</i>	Colombia, Venezuela	28 (100)					Vallejo et al. (2002, 2009a); Maia da Silva et al. (2007); Urrea et al. (2011)
<i>R. robustus</i>	Brasil		6 (100)				Maia da Silva et al. (2007)

sobre los factores inmunes de la hemolinfa, las glándulas salivares y la microbiota intestinal se podría aportar nueva información para entender por qué los genotipos de *T. rangeli* son específicos para las especies de *Rhodnius*.

Estudios proteómicos de la hemolinfa de *R. prolixus* y *R. colombiensis* y su relación con la actividad lítica contra *T. cruzi* y *T. rangeli*

Con la finalidad de detectar factores inmunes contra los parásitos, **Barbosa et al.** (2021,2022) y **Barbosa** (2023) determinaron los factores de la respuesta inmune innata en la hemolinfa que estarían implicados en la actividad lítica contra *T. cruzi* y *T. rangeli*. Los autores efectuaron un análisis proteómico comparativo de la hemolinfa de *R. prolixus* (con actividad lítica) y de *R. colombiensis* (sin actividad lítica) e identificaron 120 proteínas totales en la hemolinfa de *R. prolixus* y 107 en la de *R. colombiensis*, de las cuales 40 se asociaron a la respuesta inmune (**Tabla 5**), y de estas 40, 32 eran compartidas por las dos especies, siete se detectaron sólo en la hemolinfa de *R. prolixus* (factor de von Willebrand,

Tabla 5. Proteínas de respuesta inmune detectadas en hemolinfa de *R. prolixus* y *R. colombiensis*

Proteínas	<i>R. prolixus</i>	ID Uniprot	<i>R. colombiensis</i>	ID Uniprot
Factor von Willebrand	2	A0A0P4VIB4, T11FN4	2	A0A0P4VIB4, T11FN4
Lectinas	2	A0A0P4VGP5, A0A0P4VKZ1	2	A0A0P4VGP5, A0A0P4VKZ1
Serinas con actividad endopeptidasa	2	T1H815, T1H816	2	T1H815, T1H816
Serpinas	3	A0A069DZE0, T11F83, R4FLP4	3	A0A069DZE0, T11F83, R4FLP4
Lipocalinas	3	R4FN82, R4FLZ0, A0A0P4VR25	3	R4FN82, R4FLZ0, A0A0P4VR25
Fenol oxidasa	4	T1HW22, A0A0V0G7Q5, A0A1B2G385, A0A1B2G381	4	T1HW22, A0A0V0G7Q5, A0A1B2G385, A0A1B2G381
Tripsinas	4	T1HMX6, A0A0P4VLU5, T1I2L3, T1I0A9	4	T1HMX6, A0A0P4VLU5, T1I2L3, T1I0A9
Péptidos antimicrobianos	1	B8QEI8 (prolixina)	1	B8QEI8 (prolixina)
Lisozimas	2	A0A0P4VPP9, R4FPH4	2	A0A0P4VPP9, R4FPH4
Interferón gamma inducible	2	A0A0P4VM92, R4G4A3	2	A0A0P4VM92, R4G4A3
Tiol reductasa lisosómica				
ML superfamilia	1	T1HU92	1	T1HU92
Pacifastina 4 Icmii	1	R4G3U6	1	R4G3U6
Fibrilina putativa (VWFC)	1	R4FJG3	1	R4FJG3
Inhibidor serina proteinasa-putativa	1	A0A023EZF2	1	A0A023EZF2
Proteína putativa dominio c1q	1	R4FJF3	1	R4FJF3
I-set dominio de inmunoglobulina	1	T1HT36	1	T1HT36
IG-like dominio de inmunoglobulina	1	T1I8U8	1	T1I8U8
Nitroforinas	2	Q7YT15, Q94734		
Superóxido dismutasa	1	A0A0P4VG4		
Factor von Willebrand	1	T1HG60,		
Tripsinas	1	R4G5A7		
Péptidos antimicrobianos	1	A0A0P4VLV7 (defensina)		
Lisozimas	1	A9LN32		
Inhibidor inter-alfa-tripsina de cadena pesada H4			1	A0A069DVF3

tripsina, nitroforina 4A, nitroforina-4, superóxido dismutasa, defensina y lisozima) y una proteína denominada inhibidor Inter-Alfa-tripsina de cadena pesada H4, se detectó únicamente en la hemolinfa de *R. colombiensis*. Las proteínas detectadas en *R. prolixus* constituyen una respuesta inmune innata que se da en la hemolinfa sin previo contacto con *T. cruzi* o *T. rangeli*. La exacta dinámica de circulación de estas proteínas de respuesta inmune innata todavía se desconoce, sin embargo, su posible desplazamiento desde la hemolinfa hacia el intestino contribuiría a que actuara sinérgicamente con otras proteínas de la microbiota intestinal contra algunas DTU de *T. cruzi* y algunos genotipos de *T. rangeli*, impidiendo su transmisión. Todavía no hay estudios transcriptómicos o de sobreexpresión cuantitativa que permitan identificar las proteínas compartidas en la hemolinfa que podrían estar en alza y responder por la actividad lítica observada en *R. prolixus*.

Estudios proteómicos de la saliva de *R. prolixus* y *R. colombiensis* y su relación con la actividad lítica contra *T. cruzi* y *T. rangeli*

Los estudios sobre las proteínas de la saliva de los triatomíneos se han centrado en las proteínas relacionadas con la actividad anticoagulante, antiplaquetaria y vasodilatadora que aseguran el flujo continuo de la sangre del vertebrado durante la toma del alimento. No se ha estudiado a profundidad el papel de estas proteínas para contrarrestar algunos patógenos, a pesar de que existe evidencia de su actividad antiparasitaria, antibacteriana, antiviral y antifúngica (Arcà & Ribeiro, 2018; Santiago et al., 2020). El primer reporte sobre la actividad lítica en glándulas salivares es el de Ferreira et al. (2016), quienes emplearon el contenido de las glándulas salivares de *R. prolixus* y lograron una lisis del 20 % después de la incubación con las formas tripomastigotes de *T. cruzi* (cepa CL, DTU VI).

Posteriormente, Barbosa (2023) demostró el efecto lítico de la saliva de *R. prolixus* sobre epimastigotes y tripomastigotes de *T. cruzi* II, actividad lítica que no fue detectada en la saliva de *R. colombiensis*. Estos reportes permiten plantear que las proteínas presentes en las glándulas salivares de *R. prolixus*, además de cumplir las funciones anticoagulante, antiplaquetaria y vasodilatadora, podrían afectar la infección y adaptación de algunas DTU de *T. cruzi* y genotipos de *T. rangeli*, pues parte de la saliva se ingiere en el proceso de alimentación del insecto, llega al intestino del vector e interactúa directamente con el parásito, siendo esta una respuesta inmune innata generada en las glándulas salivares que afecta a algunos genotipos de *T. cruzi* y *T. rangeli* (Amino et al., 2002; Vallejo et al., 2015; Ferreira et al., 2016).

Buscando las diferencias entre las proteínas de respuesta inmune, Barbosa (2023) realizó un análisis proteómico comparativo de las glándulas salivares de *R. prolixus* y *R. colombiensis*, e identificó un total de 1.966 proteínas en las dos especies, de las cuales 91, 66 detectadas en *R. prolixus* y 25 en *R. colombiensis*, estaban relacionadas con la respuesta inmune (Tabla 6).

De las 91 proteínas relacionadas con la respuesta inmune, 42 (46 %) sólo se detectaron en la saliva de *R. prolixus*, 48 (53 %) eran compartidas por las dos especies, y una (1 %) fue detectada exclusivamente en *R. colombiensis*. Las proteínas detectadas sólo en *R. prolixus* podrían estar relacionadas con la actividad lítica; por otro lado, las compartidas también podrían estar involucradas en la lisis, sin embargo, todavía no hay estudios transcriptómicos comparativos o de sobreexpresión cuantitativa que permitan identificar cuáles proteínas halladas en la saliva de las dos especies podrían estar en alza y responder por la actividad lítica observada en *R. prolixus*.

El hallazgo de Barbosa (2023) de un mayor número de proteínas de respuesta inmune en la saliva de *R. prolixus* podría reflejar una acusada expansión de la familia de nitroforinas, lipocalinas y triabinas, como lo han demostrado los estudios de Ribeiro et al. (2004). El análisis del genoma de *R. prolixus* de Mesquita et al. (2015) evidenció que las proteínas salivares más abundantes ocurrían en las grandes expansiones organizadas en agrupaciones en tándem, con 51 genes de lipocalinas identificados y 12 miembros no

Tabla 6. Proteínas de respuesta inmune detectadas en saliva de *R. prolixus* y *R. colombiensis*

Proteínas	<i>R. prolixus</i>	ID Uniprot	<i>R. colombiensis</i>	ID Uniprot
Nitroforinas	8	Q7YT15, Q94734 (+1), Q26241, R4FPW7, Q94733, Q26239, R4G8N0, A0A0N7Z976,	8	Q7YT15, Q94734 (+1), Q26241, R4FPW7, Q94733, Q26239, R4G8N0, A0A0N7Z976
Nitroforinas	13	AOAOP4VNYO, A0A0N7Z8Y4, R4G8M9, Q6PQK2, A0A0P4VRM1, R4G4L0, R4G800, R4G8N2, R4G8L8, A0A0P4VPI4, A0A- 0P4VMA9, A0A0P- 4VIM0, Q7YSY5		
Triabinas	6	R4G339, R4FPQ1, R4G560, A0A0P4VJD8, R4FQL0, Q7YT04,	6	R4G339, R4FPQ1, R4G560, A0A0P4VJD8, R4FQL0, Q7YT04
Triabinas	13	A0A0P4W353, R4FN02, R4G3G4, R4G3G0, R4G4H9, A0A0P4VNG9, R4FPJ5, R4FJ72, A0A0P4VSW8, R4G8L0, A0A0P4VRP3, A0A0P4VJ86, Q7YT05,		
Lipocalinas	3	R4FLF8, Q7YT09, R4G376	3	R4FLF8, Q7YT09, R4G376
Lipocalinas	15	R4FN70, R4G530, R4G426, A0A- 0P4VNM2, A0A- 0P4VJV9, R4FR52, R4FLY6, A0A0P4VU56, A0A0N7Z8D0, R4FR66, R4FPS6, A0A0N7Z954, R4G4E6, Q7YT10, A0A0V0G8M5		
Lipocalinas			1	R4G8K0
Otras *	7	R4G8R7, T11IC5, A0A0N7Z8E7, B8LJ43, A0A0P4VT66, Q26240, A0A0P4VTN9	7	R4G8R7, T11IC5, A0A0N7Z8E7, B8LJ43, A0A0P4VT66, Q26240, A0A0P4VTN9
Otras *	1	T1IG50 (Glutación S transferasa)		

* En la categoría de otras, se detectaron la metalopeptidasa, la serina proteasa 10 putativa, la transferrina, la catalasa, el óxido nítrico sintasa, el superóxido dismutasa y la glutación transferasa.

identificados del clado de las nitroforinas. A partir del análisis de las proteínas salivares de *R. prolixus*, Santos *et al.* (2022) reportaron que podrían existir cerca de 100 lipocalinas, algunas de ellas sin función definida, y 12 nitroforinas que sí se identificaron.

Como transportadoras de óxido nítrico (NO), las nitroforinas pueden participar como agentes inmunomoduladores en la transmisión de los tripanosomas (Castro *et al.*, 2012). Por otro lado, la proporción de nitroforinas en los diferentes géneros de triatomíneos es variable, como lo demostraron Montadon *et al.* (2016), quienes al comparar las nitroforinas

detectadas en la saliva de tres especies de diferentes géneros, encontraron que en *R. prolixus* estas constituyeron el 68 % de las proteínas salivares, en tanto que en *T. lecticularia* y *P. herreri* no detectaron nitroforinas. Por otro lado, los autores encontraron un 13 %, un 79 % y un 49 % de lipocalinas en *R. prolixus*, *T. lecticularia* y *P. herrei*, respectivamente, lo que evidencia una gran biodiversidad funcional interespecífica de estas moléculas en las tres especies.

Asimismo, Santos *et al.* (2022) demostraron que la citolocalización de las nitroforinas y otras lipocalinas, además de verificarse en las glándulas salivares, también se detectaban en otros tejidos (intestino anterior, intestino posterior, ovarios, testículos, sistema nervioso central y antenas), lo cual sugiere que la inmunidad de *R. prolixus* relacionada con las nitroforinas puede ser sistémica debido a la liberación de moléculas transportadoras de NO en otros tejidos diferentes a las glándulas salivares. Estos hallazgos coinciden con los resultados de Barbosa *et al.* (2021, 2022) y Barbosa (2023), quienes detectaron nitroforinas en la hemolinfa de *R. prolixus* pero no en la de *R. colombiensis*. Es importante señalar que el análisis proteómico comparativo de la saliva de *R. prolixus* y *R. colombiensis* de Barbosa (2023) es el primer estudio de dos especies que tienen diferente actividad lítica en la saliva contra *T. cruzi* II, sin embargo, aún es necesario profundizar en la expresión de otros posibles genes implicados en dicha actividad.

Un aspecto subestimado en la inmunidad de los triatominos contra los tripanosomas es la maquinaria propia de la actividad de los radicales libres, como el ion superóxido y el óxido nítrico. La producción de estos radicales se considera parte de la inmunidad constitutiva conservada en hemípteros, como lo señalaron Zumaya *et al.* (2018) y Whitten *et al.* (2001), pues estos factores son relevantes en la defensa de los triatominos contra bacterias y parásitos. Estas moléculas tienen diferentes roles biológicos, ya que actúan en las vías de señalización de la respuesta inmune, y directamente contra microorganismos patógenos mediante la peroxidación de lípidos, ocasionando la pérdida de fluidez de la membrana. Estos factores causan daños irreversibles en las proteínas debidos a la nitración inducida por las ERN y el daño oxidativo por las ERO en aminoácidos sensibles como la cisteína y la metionina. El ADN también es propenso a la nitración y el daño oxidativo que pueden ocasionar mutaciones (Azambuja *et al.*, 2017).

En *R. prolixus* se ha descrito la participación de los radicales libres en las cascadas oxidativas en las glándulas salivales, la hemolinfa y el intestino (Figura 2). La enzima encargada de la producción de NO es el óxido nítrico sintasa (*nitric oxide synthase*, NOS), la cual cataliza la conversión de arginina en citrulina, produciendo óxido nítrico (Figura 2A). El complejo de NOS está activo en los tejidos de las glándulas salivales, la hemolinfa y el intestino del insecto (Figuras 2B, 2C, 2D). En las glándulas salivales las nitroforinas actúan como transportadoras de NO y pueden también almacenarlo. Se ha descrito el potencial de las nitroforinas como catalizadoras para la producción de NO mediante la reacción de desproporción de nitrito (Figura 2B). En la hemolinfa los hemocitos también tienen la capacidad de producir NO a través del complejo NOS (Figura 2C). En el intestino medio anterior hay una marcada actividad oxidativa mediada por las ERO, cuyo principal precursor es el ion superóxido, y por las ERN, con el NO como su precursor (Figura 2D). La activación y modulación de estas cascadas oxidativas pueden ser dependientes de la especie de tripanosomátido, de la cepa, o de la DTU de *T. cruzi* (Whitten *et al.*, 2007; Castro *et al.*, 2012; Knipp & He, 2011).

La respuesta inmune de los grupos *pallescens*, *prolixus* y *pictipes* y su relación con la genética y la filogenia del género *Rhodnius*

Suárez-Quevedo *et al.* (2020) y Zabala *et al.* (2011) reportaron que la hemolinfa de las especies del grupo *pallescens* (*R. pallescens*, *R. colombiensis* y *R. ecuadoriensis*) (Figura 3A) no producen lisis *in vitro* contra las DTU de *T. cruzi* y los genotipos de *T. rangeli*. Además, los primeros encontraron que la hemolinfa de *R. pictipes* tampoco producía lisis *in vitro* contra los mismos genotipos de *T. cruzi*; queda por estudiar la hemolinfa de las

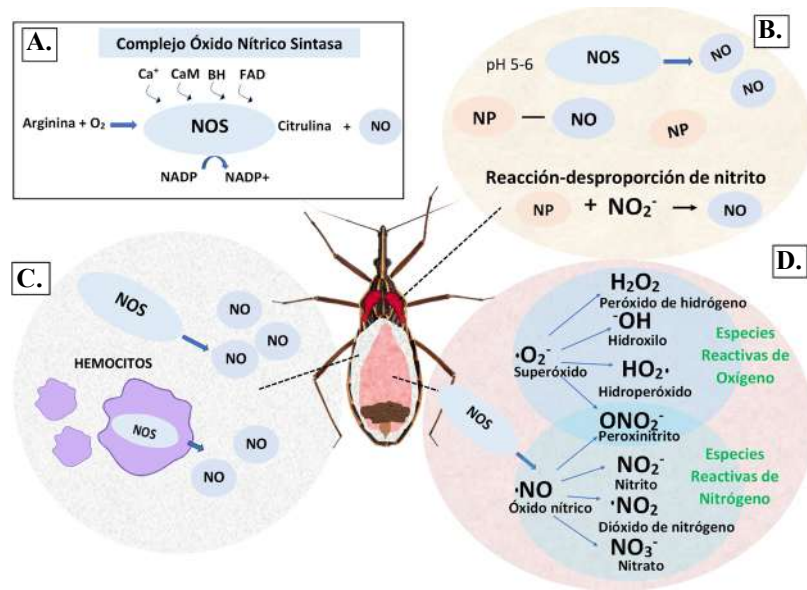


Figura 2. Actividad del sistema óxido nítrico sintasa (NOS), de especies reactivas de oxígeno (ERO) y de nitrógeno (ERN) en *R. prolixus*. **A)** Complejo de ERO para la síntesis de NO, calmodulina (CaM), tetrahidrobiopterina (BH), y dinucleótido de flavina-adenina (FAD). **B)** Rol de las nitroforinas (NP) en las glándulas salivares. **C)** Estimulación del complejo NOS en hemocitos en la hemolinfa. **D)** Especies reactivas de oxígeno y nitrógeno expresadas en el intestino medio anterior. Adaptado de Whitten *et al.*, 2007, Castro *et al.*, 2012 y Knipp, M. & He, C. (2011)

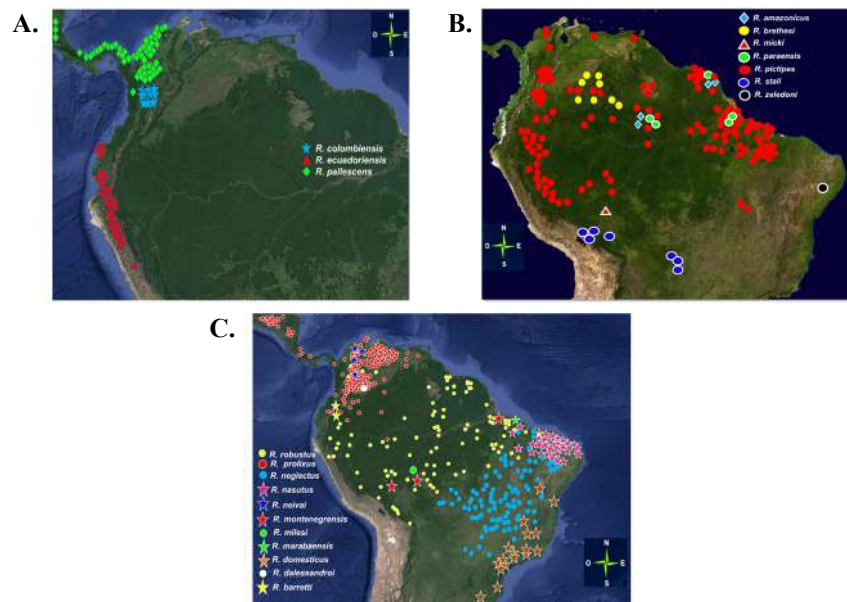


Figura 3. **A.** Distribución geográfica del grupo pallescens en Panamá, Colombia, Ecuador y Perú. Pulido *et al.* (2008) ni Suárez-Quevedo *et al.* (2020) encontraron factores tripanolíticos en la hemolinfa de las tres especies del grupo pallescens. **B.** Distribución geográfica del grupo pictipes en América del Sur. Suárez-Quevedo *et al.* (2020) examinó la hemolinfa de *R. pictipes* sin encontrar actividad tripanolítica. Será necesario estudiar la hemolinfa de las seis especies restantes para verificar la existencia de factores tripanolíticos. **C.** Distribución geográfica del grupo prolixus en Centroamérica y América del Sur. Según Suárez-Quevedo *et al.* (2020) existen factores tripanolíticos en *R. prolixus* y *R. robustus*. Será necesario estudiar las hemolinfas de las nueve especies restantes para verificar la existencia de factores tripanolíticos.

siete especies restantes del grupo pictipes para conocer si ocurre lisis *in vitro* contra los parásitos (**Figura 3B**). Por el contrario, la hemolinfa de *R. prolixus* y *R. robustus* produce lisis *in vitro* contra los genotipos de *T. cruzi*. Estas dos especies son las más abundantes del grupo prolixus, lo que sugiere que probablemente las ocho especies restantes también tengan esta respuesta inmune contra los parásitos (**Figura 3C**).

Según lo señalado, es necesario verificar la presencia de la respuesta tripanolítica contra *T. cruzi* y *T. rangeli* en todas las especies del género *Rhodnius*, lo cual sería de gran importancia porque este factor de respuesta inmune podría ayudar a aclarar las relaciones evolutivas de los tres grupos, pallescens, pictipes y prolixus, ya que en algunas reconstrucciones filogenéticas las especies del grupo prolixus forman un clado monofilético, otro clado hermano de las que integran el grupo pictipes (**Hernández et al., 2020**) y uno hermano de las que integran el grupo pallescens (**Kieran et al., 2021**). Asimismo, sería de gran interés explorar la respuesta inmune de las especies del género *Psammolestes*, ya que en algunas reconstrucciones se ha evidenciado la parafilia del grupo prolixus con respecto a *Psammolestes* (**Hernández et al., 2020**)

Consecuencias de la respuesta inmune del grupo prolixus sobre la epidemiología de *T. cruzi* y *T. rangeli*

La actividad lítica específica del grupo prolixus contra las DTU de *T. cruzi* y los genotipos de *T. rangeli* probablemente se originó por la sobreexpresión en la saliva de los genes de las nitroforinas, las lipocalinas y las triabinas, cuya principal función es transportar el óxido nítrico, pero también pueden participar en la síntesis de esta molécula (**Knipp & He, 2011**). **Barbosa (2023)** encontró nitroforina 4-A, nitroforina-4, defensina y lisozima en la hemolinfa de *R. prolixus*, lo que es importante porque el óxido nítrico procedente de las nitroforinas podría ser liberado en el intestino anterior y actuar sobre los genotipos de los parásitos sensibles al estrés oxidativo. En experimentos *in vivo* se ha evidenciado que el aumento en la producción de óxido nítrico en la hemolinfa y el tracto digestivo de *R. prolixus*, se correlaciona con la disminución de *T. cruzi*, por el contrario, cuando se disminuye la producción de óxido nítrico, el parásito logra mantenerse y multiplicarse como lo demostraron **Batista et al. (2020)**. Es probable que los parásitos que tienen resistencia a la lisis de la hemolinfa de *R. prolixus*, mantengan un repertorio de genes implicados en la tolerancia al estrés oxidativo, como lo plantearon previamente **Beltrame-Botelho et al. (2016)**.

La elevada expresión de actividad oxidativa en el grupo prolixus, mediada por una mayor presencia de proteínas como las nitroforinas, pudo haber generado una presión selectiva durante millones de años, que podría explicar la baja o escasa circulación de *T. cruzi* II, V y VI en las áreas de distribución de las especies del grupo prolixus como Colombia, Venezuela, Ecuador, Perú, y gran parte de la región amazónica. Naturalmente, para comprobar esta hipótesis será necesario continuar recopilando datos sobre la actividad lítica de la hemolinfa y de las glándulas salivares en las demás especies del grupo prolixus (**Figura 3C**) y en las del grupo pictipes (**Figura 3B**), aunque en la hemolinfa del grupo pallescens no se hayan detectado factores tripanolíticos (**Figura 3A**).

Conclusiones y perspectivas

El mecanismo de defensa humoral en insectos se caracteriza por una batería de potentes péptidos antimicrobianos, intermediarios reactivos de nitrógeno y oxígeno y cascadas enzimáticas complejas como el sistema profenoloxidasas, que contribuyen a la coagulación o melanización en la hemolinfa (**García et al., 2009**). Estos factores humorales pueden ser secretados directamente al hemocele o lumen intestinal como componentes de la respuesta inmune para eliminar patógenos potenciales adquiridos durante la alimentación (**García et al., 2010a**).

Según **Mwangi et al. (2023)**, muchas preguntas sobre las interacciones triatomino-tripanosoma siguen sin respuesta, particularmente las relativas a las moléculas presentes en el tracto digestivo implicadas en la modulación de la infección parasitaria. Otras preguntas persistentes giran en torno a cómo los genes del vector y de los parásitos interactúan y

afectan la producción de superóxido, óxido nítrico y otros radicales de oxígeno y nitrógeno y, por último, cuál es el papel de los péptidos antimicrobianos y cómo estos pueden afectar la influencia y el establecimiento del parásito en el vector. Estos autores consideran que la interacción inmunitaria no se ha explorado completamente en sus dimensiones cualitativa y cuantitativa, y que podría aprovecharse incluso más en el control de la enfermedad mediante la supresión de la competencia del vector y la sensibilidad a *T. cruzi*.

Los estudios proteómicos comparativos de *R. prolixus* y *R. colombiensis* realizados por **Barbosa et al.** (2021, 2022) y **Barbosa** (2023), sugieren que los factores implicados en la actividad tripanolítica observada en *R. prolixus*, pero no en *R. colombiensis*, estarían relacionados con la presencia de nitroforinas, tripsinas, defensinas, lisozimas y el superóxido dismutasa en la hemolinfa de *R. prolixus* y la mayor producción de nitroforinas, lipocalinas y triabinas en las glándulas salivares de este vector. En las áreas geográficas donde persisten especies del grupo prolixus, la circulación de las DTU de *T. cruzi* o los genotipos de *T. rangeli* sensibles a los factores líticos está restringida, como se ha observado en Venezuela, Colombia, Ecuador y gran parte de la Amazonía (**Breniere et al.**, 2016; **Vallejo et al.**, 2015).

Los resultados de esta revisión abren la perspectiva de una identificación precisa en el grupo prolixus de estos factores que limitan la competencia vectorial de algunas DTU de *T. cruzi* y genotipos de *T. rangeli* y contribuyen a una mejor comprensión de la compleja epidemiología de *T. cruzi*, lo que permite explorar alternativas para el control de la transmisión de la enfermedad de Chagas en algunas regiones de América Latina a mediano y largo plazo.

Agradecimientos

Este trabajo está dedicado a la memoria de los doctores Cornelis Johannes Marinkelle del CIMPAT de la Universidad de los Andes de Bogotá, Hernando Groot Liévano del Instituto Nacional de Salud de Bogotá, Antonio D'Alessandro, del CIDEIM de Cali, Zigman Brener y Egler Chiari de la Universidad Federal de Minas Gerais-Brasil, con quienes el autor principal del presente artículo tuvo el privilegio de recibir formación e inspiración en el campo de la parasitología tropical, así como a los estudiantes de pregrado, maestría y doctorado que durante décadas participaron en el desarrollo de esta línea de investigación en el Laboratorio de Investigaciones en Parasitología Tropical (LIPT) de la Universidad del Tolima bajo la dirección de los coautores del artículo. Agradecemos, asimismo, a los dos evaluadores anónimos, cuyas observaciones contribuyeron a mejorar la presentación y la calidad del documento.

Contribución de los autores

G.A.V., H.J.B. y Y.S.: conceptualización, escritura y preparación de la versión original. A.M., J.C.C., D.A.U., F.G., C.H. y J.D.R.: revisión y edición del manuscrito. G.A.V. y H.J.B.: gestión de la financiación. Todos los autores leyeron y aprobaron la versión final sometida a publicación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Alvarenga, N.J., Bronfen, E.** (1982). Incapacidade de evolução do *Trypanosoma cruzi* na hemocele de triatomíneos [Incapacity of the evolution of *Trypanosoma cruzi* in the hemocele of triatomids]. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 77(4), 431-6. <https://doi.org/10.1590/s0074-02761982000400010>
- Amino, R., Martins, R.M., Procopio, J., Hirata, I.Y., Juliano, M.A., Schenkman, S.** (2002). Trialysin, a novel pore-forming protein from saliva of hematophagous insects activated by limited proteolysis. *Journal of Biological Chemistry*, 277(8), 6207-13. <https://doi.org/10.1074/jbc.M109874200>

- Arcà, B., Ribeiro, J.M. (2018). Saliva of hematophagous insects: a multifaceted toolkit. *Current Opinion in Insect Science*, 29, 102-109. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2018.07.012>
- Azambuja, P., Feder, D., Garcia, E.S. (2004). Isolation of *Serratia marcescens* in the midgut of *Rhodnius prolixus*: impact on the establishment of the parasite *Trypanosoma cruzi* in the vector. *Experimental Parasitology*, 107, 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.exppara.2004.04.007>
- Azambuja, P., Garcia, E.S., Waniek, P.J., Vieira, C.S., Figueiredo, M.B., Gonzalez, M.S., Mello, C.B., Castro, D.P., Ratcliffe, N.A. (2017). *Rhodnius prolixus*: from physiology by Wigglesworth to recent studies of immune system modulation by *Trypanosoma cruzi* and *Trypanosoma rangeli*. *Journal of Insect Physiology*, 97, 45-65. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2016.11.006>
- Batista, K.K.D.S., Vieira, C.S., Florentino, E.B., Caruso, K.F.B., Teixeira, P.T.P., Moraes, C.D.S., Genta, F.A., de Azambuja, P., de Castro, D. P. (2020). Nitric oxide effects on *Rhodnius prolixus*'s immune responses, gut microbiota and *Trypanosoma cruzi* development. *Journal of Insect Physiology*, 126, 104100. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2020.104100>
- Barbosa, H.J., Suárez, J., Meneses, A., Carranza, J.C., Vallejo, G.A. (2021). Análisis proteómico de la hemolinfa y las glándulas salivares en triatominos con capacidad lítica contra *Trypanosoma rangeli* y *Trypanosoma cruzi*. IX Congreso Internacional de Parasitología Neotropical COPANEO, 2021. (PDF) IX Congreso Internacional de Parasitología Neotropical, COPANEO 2021 Libro de resúmenes. (researchgate.net), 64
- Barbosa Vinasco, H. J., Meneses, A., Suárez Quevedo, Y., Mario Ospina, C., Carranza, J.C., Vallejo, G.A. (2022). Identification of innate immune or biochemical factors in triatomines with lytic capacity against *Trypanosoma rangeli* and *Trypanosoma cruzi*. *Revista Actualidades Biológicas*, 44, 34.
- Barbosa, H.J. (2023). Factores inmunes innatos en triatominos asociados con actividad lítica contra algunas cepas de *Trypanosoma cruzi*. Tesis para optar el título de Doctor en Ciencias Biomédicas. Universidad del Tolima. 135 pp.
- Beltrame-Botelho, I.T., Talavera-López, C., Andersson, B., Grisard, E.C., Stoco, P.H. (2016). A Comparative *In Silico* Study of the Antioxidant Defense Gene Repertoire of Distinct Lifestyle Trypanosomatid Species. *Evolutionary Bioinformatics Online*, 12, 263-275. <https://doi.org/10.4137/EBO.S40648>
- Brenière, S.F., Walecx, E., Barnabé, C. (2016). Over Six Thousand *Trypanosoma cruzi* Strains Classified into Discrete Typing Units (DTUs): Attempt at an Inventory. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 10(8), e0004792. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0004792>
- Carrasco, H.J., Segovia, M., Llewellyn, M.S., Morocoima, A., Urdaneta-Morales, S., Martínez, C., Martínez, C.E., Garcia, C., Rodríguez, M., Espinosa, R., de Noya, B.A., Díaz-Bello, Z., Herrera, L., Fitzpatrick, S., Yeo, M., Miles, M.A., Feliciangeli, M.D. (2012). Geographical distribution of *Trypanosoma cruzi* genotypes in Venezuela. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 6(6), e1707. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0001707>
- Castro, D.P., Moraes, C.S., Gonzalez, M.S., Ratcliffe, N.A., Azambuja, P., Garcia, E.S. (2012). *Trypanosoma cruzi* immune response modulation decreases microbiota in *Rhodnius prolixus* gut and is crucial for parasite survival and development. *PLoS ONE*, 7(5), e36591. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0036591>
- D'Alessandro, A. (1976). Biology of *Trypanosoma (Herpetosoma) rangeli* Tejera, 1920. In WHR Lumsden & DA Evans (editors), *Biology of Kinetoplastida. Vol 1* (327-349) Academic Press, London, New York and San Francisco.
- De Stefani-Márquez, M.D., Rodrigues-Ottaiano, C., Mônica Oliveira, R., Pedrosa, A.L., Cabrine-Santos, M., Lages-Silva, E., Ramírez, L.E. (2006). Susceptibility of different triatomine species to *Trypanosoma rangeli* experimental infection. *Vector Borne and Zoonotic Diseases*, 6(1), 50-56. <https://doi.org/10.1089/vbz.2006.6.50>
- Ferreira, R. C., Kessler, R. L., Lorenzo, M. G., Paim, R. M. M., Ferreira, L. D. L., Probst, C. M., Alves-Silva, J., Guarneri, A. A. (2016). Colonization of *Rhodnius prolixus* gut by *Trypanosoma cruzi* involves an extensive parasite killing. *Parasitology*, 143(4), 434-443. <https://doi.org/10.1017/S0031182015001857>
- Gaitán-Velosa, G.A. (2022). Efecto de los factores líticos de la hemolinfa de *Rhodnius prolixus* y *Rhodnius colombiensis* contra las formas tripomastigotas metacíclicas de *Trypanosoma cruzi* (DTUs I y II). Tesis para optar el título de Biólogo. 110 pp. Universidad del Tolima.
- Galvão, C. (2021). Taxonomy. In: Guarneri, A., Lorenzo, M. (Eds) Triatominae – The Biology of Chagas Disease Vectors, *Entomology in Focus* 5. Springer, Cham, 15-38. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64548-9_2

- Garcia, E.S., Azambuja, P.** (1991). Development and interactions of *Trypanosoma cruzi* within the insect vector. *Parasitology Today*, 7(9), 240-244. [https://doi.org/10.1016/0169-4758\(91\)90237-i](https://doi.org/10.1016/0169-4758(91)90237-i)
- Garcia, E.S., Ratcliffe, N.A., Whitten, M.M., Gonzalez, M.S., Azambuja, P.** (2007). Exploring the role of insect host factors in the dynamics of *Trypanosoma cruzi*-*Rhodnius prolixus* interactions. *Journal of Insect Physiology*, 53(1), 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2006.10.006>
- Garcia, E.S., Castro, D.P., Figueiredo, M.B., Genta, F.A., Azambuja, P.** (2009). *Trypanosoma rangeli*: a new perspective for studying the modulation of immune reactions of *Rhodnius prolixus*. *Parasites & Vectors* 2, 1-10. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-2-33/FIGURES/5>.
- Garcia, E.S., Castro, D.P., Figueiredo, M.B., Azambuja, P.** (2010a). Immune homeostasis to microorganisms in the guts of triatomines (Reduviidae): a review. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 105(5), 605-610.
- Garcia, E.S., Genta, F.A., Azambuja, P., Schaub, G.A.** (2010b). Interactions between intestinal compounds of triatomines and *Trypanosoma cruzi*. *Trends in Parasitology*, 26(10), 499-505. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2010.07.003>
- Gil-Santana, H.R., Chavez, T., Pita, S., Panzera, F., Galvão, C.** (2022). *Panstrongylus noireaudi*, a remarkable new species of Triatominae (Hemiptera, Reduviidae) from Bolivia. *Zookeys*, 1104, 203-225. <https://doi.org/10.3897/zookeys.1104.81879>
- Guhl, F., Vallejo, G.A.** (2003). *Trypanosoma (Herpetosoma) rangeli* Tejera, 1920: An updated review. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 98(4), 435-442. <https://doi.org/10.1590/s0074-02762003000400001>
- Guhl, F., Ramírez, J.D.** (2013). Retrospective molecular integrated epidemiology of Chagas disease in Colombia. *Infection Genetics and Evolution*, 20, 148-54. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2013.08.028>
- Gurgel-Gonçalves, R., Ramalho, E.D., Duarte, M.A., Palma, A.R., Abad-Franch, F., Carranza, J.C., Cuba Cuba, C.A.** (2004). Enzootic transmission of *Trypanosoma cruzi* and *T. rangeli* in the Federal District of Brazil. *Revista do Instituto de Medicina Tropical de São Paulo*, 46(6), 323-30. <https://doi.org/10.1590/s0036-46652004000600005>
- Hernández, C., da Rosa, J.A., Vallejo, G.A., Guhl, F., Ramírez, J.D.** (2020). Taxonomy, Evolution, and Biogeography of the Rhodniini Tribe (Hemiptera: Reduviidae). *Diversity*, 12, 97. <https://doi.org/10.3390/d12030097>
- Justi, S.A., Galvão, C.** (2017). The Evolutionary Origin of Diversity in Chagas Disease Vectors. *Trends in Parasitology*, 33(1), 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2016.11.002>
- Kieran, T.J., Arnold, K.M.H., Thomas, J.C., Varian, C.P., Saldaña, A., Calzada, J.E., Glenn, T.C., Gottdenker, N.L.** (2019). Regional biogeography of microbiota composition in the Chagas disease vector *Rhodnius pallescens*. *Parasites & Vectors*, 12(1), 504. <https://doi.org/10.1186/s13071-019-3761-8>
- Knipp, M., He, C.** (2011). Nitrophorins: Nitrite disproportionation reaction and other novel functionalities of insect heme-based nitric oxide transport proteins. *IUBMB Life*, 63(5), 304-312. <https://doi.org/10.1002/iub.451>
- Kollien, A.H., Schaub, G.A.** (2000). The development of *Trypanosoma cruzi* in triatominae. *Parasitology Today*, 16(9):381-387. [https://doi.org/10.1016/s0169-4758\(00\)01724-5](https://doi.org/10.1016/s0169-4758(00)01724-5)
- Maia da Silva, F., Junqueira, A.C., Campaner, M., Rodrigues, A.C., Crisante, G., Ramírez, L.E., Caballero, Z.C., Monteiro, F.A., Coura, J.R., Añez, N., Teixeira, M.M.** (2007). Comparative phylogeography of *Trypanosoma rangeli* and *Rhodnius* (Hemiptera: Reduviidae) supports a long coexistence of parasite lineages and their sympatric vectors. *Molecular Ecology* 16(16), 3361-3373. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2007.03371.x>
- Maia da Silva, F., Marcili, A., Lima, L., Cavazzana Jr., M., Ortiz, P.A., Campaner, M., Takeda, G.F., Paiva, F., Nunes, V.L.B., Camargo, E.P., Teixeira, M.M.G.** (2009). *Trypanosoma rangeli* isolates of bats from Central Brazil: Genotyping and phylogenetic analysis enable description of a new lineage using spliced-leader gene sequences. *Acta Tropica* 109(3), 199-207. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2008.11.005>
- Marcili, A., Lima, L., Cavazzana, M., Junqueira, A.C., Veludo, H.H., Maia Da Silva, F., Campaner, M., Paiva, F., Nunes, V.L., Teixeira, M.M.** (2009). A new genotype of *Trypanosoma cruzi* associated with bats evidenced by phylogenetic analyses using SSU rDNA, cytochrome b and Histone H2B genes and genotyping based on ITS1 rDNA. *Parasitology*, 136(6), 641-55. <https://doi.org/10.1017/S0031182009005861>
- Marinkelle, C.J.** (1968). Pathogenicity of *Trypanosoma rangeli* for *Rhodnius prolixus* Stal in nature. *Journal of Medical Entomology*, 5(4), 497- 499. <https://doi.org/10.1093/jmedent/5.4.497>

- Mello, C.B., García, E.S., Ratcliffe, N.A., Azambuja, P. (1995). *Trypanosoma cruzi* and *Trypanosoma rangeli*: Interplay with hemolymph components of *Rhodnius prolixus*. *Journal of Invertebrate Pathology* 65(3), 261-8. <https://doi.org/10.1006/jipa.1995.1040>
- Mello, C.B., Azambuja, P., Garcia, E.S., Ratcliffe, N.A. (1996). Differential *in vitro* and *in vivo* behavior of three strains of *Trypanosoma cruzi* in the gut and hemolymph of *Rhodnius prolixus*. *Experimental Parasitology*, 82(2), 112-121. <https://doi.org/10.1006/expr.1996.0015>
- Montandon, C.E., Barros, E., Vidigal, P.M., Mendes, M.T., Anhê, A.C., de Oliveira Ramos, H.J., de Oliveira, C.J., Mafra, C. (2016). Comparative proteomic analysis of the saliva of the *Rhodnius prolixus*, *Triatoma lecticularia* and *Panstrongylus herreri* triatomines reveals a high interspecific functional biodiversity. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 71, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2016.02.009>
- Mesquita, R.D., Vionette-Amaral, R.J., Lowenberger, C., Rivera-Pomar, R., Monteiro, F.A., Minx, P., Spieth, J., Carvalho, A.B., Panzera, F., Lawson, D., Torres, A.Q., Ribeiro, J.M., Sorgine, M.H., Waterhouse, R.M., Montague, M.J., Abad-Franch, F., Alves-Bezerra, M., Amaral, L.R., Araujo, H.M., ...Oliveira, P.L. (2015). Genome of *Rhodnius prolixus*, an insect vector of Chagas disease, reveals unique adaptations to hematophagy and parasite infection. *Proceedings of National Academy of Sciences U S A.*, 112(48), 14936-14941. <https://doi.org/10.1073/pnas.1506226112>.
- Mwangi, V.I., Martinez, E.G., Leda, R.L., Catunda, M.E.S.L.A., Días, A.S., Padron, Antonio. Y., Guerra, M.D.G.V.B. (2023). Resisting an invasion: A review of the triatomine vector (Kissing bug) defense strategies against a *Trypanosoma* sp infection. *Acta Tropica*. 238, 106745. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2022.106745>
- Padilla, C.P., Alvarado, U., Ventura, G., Luna-Caijo D., Suárez M., Tuñoque, J.R., Ruelas-Llerena, N., Fachin, L.A., Huiza, A., Gonzales, L., Carranza, J.C., Vallejo, G.A., Cáceres, A.G. (2017). Identificación de unidades de tipificación discretas (DTU) de *Trypanosoma cruzi* en triatomines colectados en diferentes regiones naturales del Perú. *Biomédica*, 37 (Suplemento 2), 167-179. <https://doi.org/10.7705/biomedica.v34i2.3559>
- Pulido, X.C., Pérez, G., Vallejo, G.A. (2008). Preliminary characterization of a *Rhodnius prolixus* hemolymph trypanolytic protein, this being a determinant of *Trypanosoma rangeli* KP1(+) and KP1(-) subpopulations' vectorial ability. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 103(2), 172-9. <https://doi.org/10.1590/s0074-02762008000200008>
- Rassi Jr, A., Rassi, A., & Marin-Neto, J. A. (2010). Chagas disease. *The Lancet*, 375(9723), 1388-1402. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(10\)60061-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(10)60061-X)
- Ribeiro, J.M., Andersen, J., Silva-Neto, M.A., Pham, V.M., Garfield, M.K., Valenzuela, J.G. (2004). Exploring the sialome of the blood-sucking bug *Rhodnius prolixus*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 34(1):61-79. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2003.09.004>
- Rojas-Pirela, M., Kemmerling, U., Quiñones, W., Michels, P.A.M., Rojas, V. (2023). Antimicrobial Peptides (AMPs): Potential Therapeutic Strategy against Trypanosomiasis? *Biomolecules*, 13(4), 599. <https://doi.org/10.3390/biom13040599>
- Rueda, K., Trujillo, J.E., Carranza, J.C., Vallejo, G.A. (2014). Transmisión oral de *Trypanosoma cruzi*: una nueva situación epidemiológica de la enfermedad de Chagas en Colombia y otros países suramericanos. *Biomédica*, 34(4), 631-41. <https://doi.org/10.1590/S0120-41572014000400017>
- Salazar-Antón, F., Urrea, D.A., Guhl, F, Arévalo, C., Azofeifa, G., Urbina, A., Blandón-Naranjo, M., Sousa, O.E., Zeledón, R., Vallejo, G.A. (2009). *Trypanosoma rangeli* genotypes association with *Rhodnius prolixus* and *R. pallescens* allopatric distribution in Central America. *Infection Genetics and Evolution*, 9(6),1306-10. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2009.09.002>
- Salcedo-Porrás, N., Lowenberger, C. (2019). The innate immune system of kissing bugs, vectors of chagas disease. *Developmental and Comparative Immunology*, 98,119-128. <https://doi.org/10.1016/j.dci.2019.04.007>
- Sánchez, I.P., Pulido, X.C., Carranza, J.C., Triana, O., Vallejo, G.A. (2005). Inmunidad Natural de *Rhodnius prolixus* (Hemiptera: Reduviidae: Triatominae) frente a la infección con *Trypanosoma* (*Herpetosoma*) *rangeli* KP1(-) aislados de *Rhodnius pallescens*, *R. colombiensis* y *R. ecuadoriensis*. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 17, 108-118.
- Santiago, P. B., de Araújo, C. N., Charneau, S., Praça, Y. R., Bastos, I. M., Ribeiro, J. M., & Santana, J. M. (2020). The pharmacopeia within triatomine salivary glands. *Trends in Parasitology*, 36(3), 250-265. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2019.12.014>

- Santos, D.V., Gontijo, N.F., Pessoa, G.C.D., Sant'Anna, M.R.V., Araujo, R.N., Pereira, M.H., Koerich, L.B.** (2022). An updated catalog of lipocalins of the chagas disease vector *Rhodnius prolixus* (Hemiptera, Reduviidae). *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 146, 103797. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2022.103797>
- Suárez-Quevedo, Y., Barbosa-Vinasco, H.J., Gutiérrez-Garnizo, S.A., Olaya-Morales, J.L., Zabala-González, D., Carranza-Martínez, J.C., Guhl-Nannetti, F., Cantillo-Barraza, O., Vallejo, G.A.** (2020). Innate trypanolytic factors in triatomine hemolymph against *Trypanosoma rangeli* and *T. cruzi*: A comparative study in eight Chagas disease vectors. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(170), 88-104. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1097>
- Urrea, D.A., Herrera, C.P., Falla, A., Carranza, J.C., Cuba-Cuba, C., Triana-Chávez, O., Grisard, E.C., Guhl, F., Vallejo, G.A.** (2011). Sequence analysis of the spliced leader intergenic region (SL-IR) and random amplified polymorphic DNA (RAPD) of *Trypanosoma rangeli* strains isolated from *Rhodnius ecuadoriensis*, *R. colombiensis*, *R. pallescens* and *R. prolixus* suggests a degree of co-evolution between parasites and vectors. *Acta Tropica*, 120(1-2), 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2011.05.016>
- Vallejo, G.A., Marinkelle C.J., Guhl F., de Sánchez, N.** (1986). Mantenimiento en el laboratorio de *Trypanosoma (Herpetosoma) rangeli* Tejera, 1920. *Revista de Biología Tropical*, 34(1), 75-81
- Vallejo, G.A., Guhl, F., Carranza, J.C., Lozano, L.E., Sanchez, J.L., Jaramillo, J.C., Gualtero, D., Castañeda, N., Silva, J.C., Steindel, M.** (2002). kDNA markers define two major *Trypanosoma rangeli* lineages in Latin-America. *Acta Tropica*, 81, 77-82. [https://doi.org/10.1016/s0001-706x\(01\)00186-3](https://doi.org/10.1016/s0001-706x(01)00186-3)
- Vallejo, G.A., Guhl, F., Carranza, J.C., Herrera, C., Urrea, D.A., Falla, A., Zabala, D., Villa, L.M.** (2009a). *Trypanosoma cruzi* population variability in Colombia: possible co-evolution in different vector species. *Revista de la Sociedad Brasileira de Medicina Tropical*, 42 (Suplemento II), 27-34.
- Vallejo, G.A., Guhl, F., Schaub, G.A.** (2009b). Triatominae-*Trypanosoma cruzi*/*T. rangeli*: vector-parasite interactions. *Acta Tropica*, 110(2-3), 137-147. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2008.10.001>
- Vallejo, G.A., Suárez, Y., Olaya, J.L., Gutiérrez, S.A., Carranza, J.C.** (2015). *Trypanosoma rangeli*: un protozoo infectivo y no patógeno para el humano que contribuye al entendimiento de la transmisión vectorial and la infección por *Trypanosoma cruzi*, agente causal de la enfermedad de Chagas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(150), 111-122.
- Velásquez-Ortiz, N., Hernández, C., Cantillo-Barraza, O., Ballesteros, N., Cruz-Saavedra, L., Herrera, G., Buitrago, L.S., Soto, H., Medina, M., Palacio, J., González, M.S., Cuervo, A., Vallejo, G.A., Zuleta Dueñas, L., Urbano, P., Muñoz, M., Ramírez, J.D.** (2022). *Trypanosoma cruzi* Parasite Burdens of Several Triatomine Species in Colombia. *Tropical Medicine and Infectious Disease* 7(12), 445. <https://doi.org/10.3390/tropicalmed7120445>
- Vieira, C. S., Waniek, P. J., Castro, D. P., Mattos, D. P., Moreira, O. C., & Azambuja, P.** (2016). Impact of *Trypanosoma cruzi* on antimicrobial peptide gene expression and activity in the fat body and midgut of *Rhodnius prolixus*. *Parasites & vectors*, 9, 119. <https://doi.org/10.1186/s13071-016-1398-4>
- Whitten, M.M.A., Mello, C.B., Gomes, S.A.O., Nigam, Y., Azambuja, P., Garcia, E.S., Ratcliffe, N.A.** (2001). Role of superoxide and reactive nitrogen intermediates in *Rhodnius prolixus* (Reduviidae)/*Trypanosoma rangeli* interactions. *Experimental Parasitology*. 98, 44-57. <https://doi.org/10.1006/expr.2001.4615>.
- Whitten, M., Sun, F., Tew, I., Schaub, G., Soukou, C., Nappi, A., Ratcliffe, N.** (2007). Differential modulation of *Rhodnius prolixus* nitric oxide activities following challenge with *Trypanosoma rangeli*, *T. cruzi* and bacterial cell wall components. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 37, 440-452. <https://doi.org/10.1016/J. IBMB.2007.02.001>.
- WHO** (2022). *Chagas disease (also known as American trypanosomiasis)*. Disponible en [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/chagas-disease-\(american-trypanosomiasis\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/chagas-disease-(american-trypanosomiasis)). Recuperado el 8 de febrero de 2023.
- Zabala, D, Carranza, J.C., Urrea, D.A., Guhl, F., Jaramillo, N., Teixeira, M.M., Vallejo, G.A.** (2011). Respuesta inmune diferencial de triatomíneos contra *Trypanosoma cruzi* y *T. rangeli*. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas* (Col.). 23, 134-143.

- Zingales, B., Andrade, S.G., Briones, M.R., Campbell, D.A., Chiari, E., Fernandes, O., Guhl, F., Lages-Silva, E., Macedo, A.M., Machado, C.R., Miles, M.A., Romanha, A.J., Sturm, N.R., Tibayrenc, M., Schijman, A.G.** (2009). A new consensus for *Trypanosoma cruzi* intraspecific nomenclature: Second revision meeting recommends TcI to TcVI. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 104(7), 1051-1054. <https://doi.org/10.1590/s0074-02762009000700021>
- Zingales, B., Miles, M.A., Campbell, D.A., Tibayrenc, M., Macedo, A.M., Teixeira, M.M., Schijman, A.G., Llewellyn, M.S., Lages-Silva, E., Machado, C.R., Andrade, S.G., Sturm, N.R.** (2012). The revised *Trypanosoma cruzi* subspecific nomenclature: Rationale, epidemiological relevance and research applications. *Infection, Genetics and Evolution*, 12 (2), 240-53. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2011.12.009>
- Zhao, Y., Galvão, C., Cai, W.** (2021). *Rhodnius micki*, a new species of Triatominae (Hemiptera, Reduviidae) from Bolivia. *ZooKeys*, 1012, 71-93. <https://doi.org/10.3897/zookeys.1012.54779>
- Zhao, Y., Fan, M., Li, H., Cai, W.** (2023). Review of Kissing Bugs (Hemiptera: Reduviidae: Triatominae) from China with Descriptions of Two New Species. *Insects*, 14(5), 450. <https://doi.org/10.3390/insects14050450>
- Zumaya-Estrada, F. A., Martínez-Barnette, J., Lavore, A., Rivera-Pomar, R., Rodríguez, M. H.** (2018). Comparative genomics analysis of triatomines reveals common first line and inducible immunity-related genes and the absence of Imd canonical components among hemimetabolous arthropods. *Parasites & vectors*, 11(1), 48. <https://doi.org/10.1186/s13071-017-2561-2>

Artículo original

Análisis teórico de la incidencia del vector de magnetización en el plano de la barrera sobre la TMR a temperatura cero

Theoretical analysis of the incidence of the magnetization vector in the barrier plane on TMR at zero temperature

© Julián A. Zúñiga^{1,2*}

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

²Instituto de Física La Plata (CONICET), Universidad Nacional de La Plata, Argentina

Resumen

En el presente trabajo se realiza un análisis teórico del transporte de espín en un heteroestructura tipo pseudoválvula de espín (PSV) conformada por dos ferromagnéticos (FM) separados por un semiconductor (SC). Para el SC se considera la banda de conducción en el punto Γ del espacio recíproco y el acoplamiento espín órbita (SOC); para los electrodos FM se tiene en cuenta la energía de intercambio interna (Δ_j) y una magnetización espontánea. Se obtuvo una expresión analítica para la probabilidad de transmisión en función del vector director magnetización (\mathbf{n}_j). Además, se calculó la magnetorresistencia por efecto túnel (TMR) a $T = 0$ K dependiente del espesor del SC mediante la fórmula de *Landauer-Büttiker* para un canal y se observa que esta obtiene su valor máximo cuando dirección \mathbf{n}_j (fijo) es paralelo al eje $[010]$. Además al aplicar el modelo fisicomatemático propuesto a la PSV Fe/SC/Fe, con SC como: GaAs, GaSb y InAs, se observó que el SOC *Dresselhaus* no contribuye a la TMR.

Palabras clave: TMR, Vector de magnetización, PSV

Abstract

In the present work a theoretical analysis of the spin transport in a pseudo spin valve (PSV) heterostructure formed by two ferromagnetic (FM) separated by a semiconductor (SC) is performed. For the SC, the conduction band at the Γ point of the reciprocal space and the spin-orbit coupling (SOC) are considered; for the FM electrodes, the internal exchange energy (Δ_j) and a spontaneous magnetization are taken into account. An analytical expression for the transmission probability as a function of the magnetization director vector (\mathbf{n}_j) was obtained. In addition, the tunneling magnetoresistance (TMR) at $T = 0$ K dependent on the SC thickness was calculated using the formula of *Landauer-Büttiker* for a channel and it is observed that it obtains its maximum value when the direction \mathbf{n}_j (fixed) is parallel to the $[010]$ axis. Moreover, when applying the proposed physicomathematical model to the Fe/SC/Fe PSV, with SC such as: GaAs, GaSb and InAs; it was observed that the SOC *Dresselhaus* does not contribute to the TMR.

Keywords: TMR, magnetization vector, PSV

Citación: Zúñiga JA. Análisis teórico de la incidencia del vector de magnetización en el plano de la barrera sobre la TMR a temperatura cero. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185):785-794, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1898>

Editor: Jairo Roa Rojas

Correspondencia:

Julián A. Zúñiga;
jazuniga@unicauca.edu.co

Recibido: 28 de marzo de 2023

Aceptado: 9 de octubre de 2023

Publicado en línea: 9 de noviembre de 2023



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

Introducción

Las estructuras tipo PSV, formadas por una tricapa tipo electrodo/aislante/electrodo, donde los electrodos utilizados son metales ferromagnéticos o semiconductores magnéticamente diluidos (DMS) o semiconductores ferromagnéticos (FMS), han suscitado un gran interés para prototipos para el diseño de dispositivos espintrónicos debido a sus magnetorresistencias (MR) la cual se ha estudiado ampliamente (**Gani et al.**, 2020; **Kubota et al.**, 2019; **Kumar & Kumar**, 2022; **Takase et al.**, 2020). En particular si el aislante magnético es un SC se tiene una heteroestructura con unión de túnel magnético (MTJ). De ahí, que se estima la TMR (**Bunder**, 2007; **Saffarzadeh & Shokri**, 2006; **Shokri**, 2006; **Tao et al.**, 2004) mediante la fórmula de *Landauer-Büttiker*, en este caso para un canal a $T = 0$ K, la cual permite realizar una descripción del transporte electrónico para sistemas mesoscópicos (**Economou & Soukoulis**, 1981).

Para el cálculo teórico de la probabilidad de transmisión algunos autores como: **Slonczewski** (1989) y **Qi et al.** (1998), ha implementado el modelo a dos bandas que se relaciona con la energía de Δ_j de las capas FM la cual la definen como el producto escalar del campo molecular y el operador de espín de *Pauli*. Esta energía se fijan en la primera capa FM ($j = l$) paralela al eje cristalográfico [010], mientras que en la segunda capa FM ($j = r$) cambia de signo según si los espines son paralelos o antiparalelos; con barreras de potencial tipo rectangular y Delta Dirac, respectivamente. Eventualmente el modelo ha tenido variantes como en la descripción de la Δ_j al sustituir el campo molecular por una relación entre su magnitud y la energía del espín splitting de Zeeman (**Saffarzadeh & Shokri**, 2006; **Shokri**, 2006; **Tao et al.**, 2004). Además, de presentar el operador de espín de Pauli (**Ju et al.**, 2008; **Saffarzadeh & Shokri**, 2006; **Tao et al.**, 2004; **Yang et al.**, 1997) como el producto interno entre el vector director de magnetización y el vector de las matrices de Pauli (**Bunder**, 2007; **Kondo**, 2012; **Matos-Abiague & Fabian**, 2009), generando un sistema de ecuaciones de *Schrödinger-Pauli*. Por otra parte, se puede observar que frecuentemente se emplea el espinor de rotación para diagonalizar los Hamiltonianos involucrados por el modelo a dos bandas (**Bunder**, 2007; **Qi et al.**, 1998; **Slonczewski**, 1989; **Tao et al.**, 2004), pero el trabajo de **Matos et al.** (2009) propone un espinor que se relaciona con la dirección \mathbf{n}_l y el que se forma entre \mathbf{n}_l y \mathbf{n}_r . Esto posibilita que el eje a lo largo del cual se definen las configuraciones paralela y antiparalela las rota hasta que el eje cristalográfico favorezca la magnetización.

En consecuencia, en este trabajo se presenta una expresión analítica a la probabilidad de transmisión en función de la dirección de los vectores directores de magnetización ubicados en el plano de la barrera y el *SOC Dresselhaus* y *Rashba*, a través del formalismo de **Matos et al.** (2009). Los análisis para la TMR se realizan con la PSV tipo Fe/SC/Fe donde observa que para un caso particular los resultados obtenidos no coinciden con los del trabajo **Kondo** (2012) para los semiconductores (SCs) de GaAs y GaSb.

Modelo Teórico

El estudio de la transmisión electrónica de espín se hace bajo los supuestos que el perfil de energía de potencial es una barrera rectangular delgada (1-4 nm) con una altura V_0 , talque $E_g/2 \leq V_0 < E_g$ donde E_g es la brecha de banda del SC (**Zenger et al.**, 2004), la dirección de tunelamiento es paralela al eje z y que el vector de onda en el plano de la barrera k_{\parallel} se conserva en toda la heteroestructura, permitiendo desacoplar el movimiento en el eje z de los otros grados de libertad espaciales.

Descripción de los Hamiltonianos

El Hamiltoniano para las regiones $z < 0$ o $z > a$, que correspondiente a las capas L_l y L_r , respectivamente, se define:

$$\hat{\mathcal{H}}_j = \left[\frac{\hbar^2}{2m_j^*} (k_{zj}^2 + k_{\parallel j}^2) \right] \hat{\mathbb{I}} - \frac{\Delta_j}{2} \mathbf{n}_j \cdot \boldsymbol{\tau}, \quad (1)$$

donde \hbar es la constante de Planck reducida, m_j^* es la masa efectiva en la capa L_j , $k_{\varepsilon j}$ con $\varepsilon = x, y, z$ es un operador definido como $k_{\varepsilon j} = -i\partial/\partial\varepsilon_j$, $k_{\parallel j} = (k_{xj}, k_{yj})$ es la magnitud del vector de onda en el plano de la barrera, $\hat{\mathbb{I}}$ representa la matriz identidad (2×2) y $\boldsymbol{\tau} = (\hat{\tau}_x, \hat{\tau}_y, \hat{\tau}_z)$ es el vector de las matrices de Pauli. El vector director de magnetización en el plano de la barrera es dado por $\mathbf{n}_j = (\sin\theta_j, \cos\theta_j, 0)$.

Por otro lado, el Hamiltoniano con SOC para la región $0 < z < a$ se describe como:

$$\begin{aligned} \hat{\mathcal{H}}_{\sigma}^s = & \left(\frac{\hbar^2}{2m_b^*} k_{\sigma}^2 + V_{eff} \right) \hat{\mathbb{I}} + \gamma (\hat{\tau}_y k_{y\sigma} - \hat{\tau}_x k_{x\sigma}) k_{z\sigma}^2 \\ & + \alpha (\hat{\tau}_x k_{y\sigma} - \hat{\tau}_y k_{x\sigma}), \end{aligned} \quad (2)$$

donde σ denota cuando el espín $\mathbf{S}_{\sigma}^{\pm}$ es paralelo ($\sigma = \uparrow$ o 1) o antiparalelo ($\sigma = \downarrow$ o -1) a \mathbf{n}_l (ver Fig. 1), m_b^* es la masa efectiva en el SC, k_{σ} es el vector de onda del electrón en la barrera y $V_{eff} = V_0 + E_F$, con E_F como la energía de Fermi. Por último, γ y α son las constantes de SOC Dresselhaus y Rashba, respectivamente.

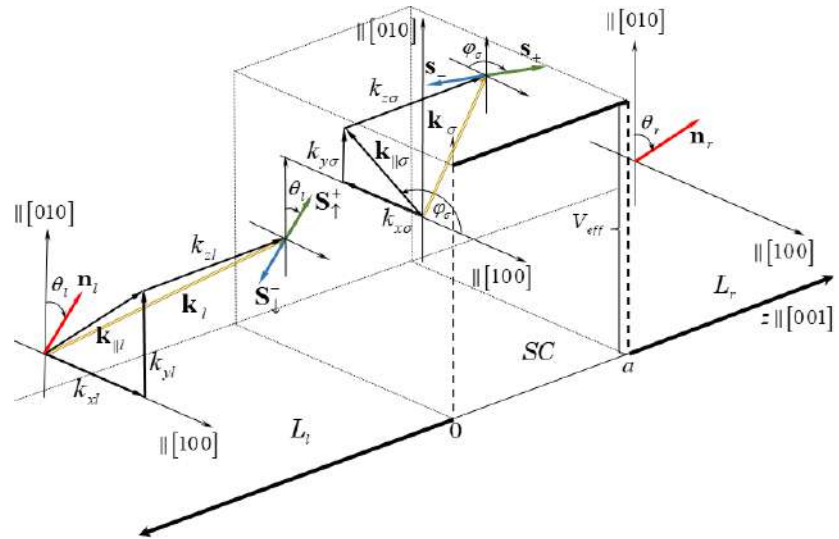


Figura 1. Representación esquemática de una barrera de potencial cuántica rectangular, donde a indica el espesor del SC en la dirección de crecimiento de la heteroestructura $[001]$, \mathbf{n}_j el vector director de magnetización y $\mathbf{S}_{\sigma}^{\pm}$ el estado del espín. Además, $\mathbf{k}_j = (k_{\parallel j}, k_{zj})$ son los vectores de onda del electrón cuando incide en la barrera para $j = l$ y cuando se transmite $j = r$.

El Hamiltoniano $\hat{\mathcal{H}}_j$ se diagonalizan mediante el espinor

$$|\chi_{\sigma}^j\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i\sigma e^{-i\theta_j} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

En consecuencia, los autovalores de energía para las capas L_j es descrita por la expresión

$$E_{\sigma}^j = \frac{\hbar^2}{2m_j^*} k_j^2 - \sigma \frac{\Delta_j}{2} \cos\beta_j, \quad (4)$$

con $\beta_l = \theta_l$ y $\beta_r = \theta_l + \theta$, donde θ representa el ángulo que forman \mathbf{n}_l y \mathbf{n}_r . Mientras que el Hamiltoniano \mathcal{H}_σ^s tiene como autovalores de energía,

$$E_\sigma^s = \frac{\hbar^2}{2m_b^*} k_\sigma^2 + V_{eff} + s\gamma k_\parallel k_{z\sigma}^2 + s\alpha k_\parallel \sigma \sin(2\theta_l), \quad (5)$$

con $s = \pm$, lo cual representa los estado del espín. Para el espín up “+” y el espín down “-” dado el SOC. Donde el espinor que diagonaliza el Hamiltoniano es (Perel’ *et al.*, 2003)

$$|\chi_\sigma^s\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -s e^{-i\varphi_\sigma^s} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

considerando que φ_σ^s se relaciona con la dirección del \mathbf{n}_l mediante la expresión $\varphi_\sigma^s = \theta_l + s\sigma\frac{\pi}{2}$.

Solución a la ecuación de Schrödinger-Pauli

La ecuación de *Schrödinger-Pauli*, $\hat{\mathcal{H}}|\psi\rangle = E|\psi\rangle$ donde $\hat{\mathcal{H}}$ se define en términos de la función de paso $\Theta(z)$ como:

$$\hat{\mathcal{H}} = \hat{\mathcal{H}}_l \Theta(-z) + \hat{\mathcal{H}}_\sigma^s \Theta(z) \Theta(a-z) + \hat{\mathcal{H}}_r \Theta(z-a), \quad (7)$$

tiene como solución la función de onda $|\psi\rangle$, que se puede desacoplar en una onda plana en la dirección $k_\parallel \sigma$ que se sustituye por k_\parallel modulada por una función de onda $|\phi_\sigma(z)\rangle$; esta última se define como el producto de una función periódica por su respectivo espinor. Es decir, $|\psi\rangle = e^{i\mathbf{k}_\parallel \cdot \mathbf{r}(x,y)} u_\sigma(z) |\chi\rangle$, donde $\mathbf{r}(x,y)$ es un vector en el plano de la barrera. Luego,

$$|\phi_\sigma(z)\rangle = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{k_\sigma^l}} e^{ik_\sigma^l z} |\chi_\sigma^l\rangle + \mathcal{R}_\sigma e^{-ik_\sigma^l z} |\chi_\sigma^l\rangle & si \quad z < 0 \\ \sum_{s=\pm} \{ (\mathcal{C}_\sigma^s e^{i\rho_s z} + \mathcal{D}_\sigma^s e^{-i\rho_s z}) |\chi_\sigma^s\rangle \} & si \quad 0 < z < a, \\ \mathcal{T}_\sigma e^{ik_\sigma^r z} |\chi_\sigma^r\rangle & si \quad z > a \end{cases} \quad (8)$$

donde k_σ^j y ρ_s , representan la magnitud de los vectores de onda para los espines en las capas L_j y dentro de la barrera, respectivamente. En consecuencia,

$$k_\sigma^j(E_z, \beta_j, k_\parallel j) = \sqrt{\frac{2m_j^*}{\hbar^2} \left(E_z + \sigma \frac{\Delta_j}{2} \cos \beta_j \right) - k_\parallel j^2}, \quad (9)$$

$$\rho_s(E_z, \theta_l) = \sqrt{\frac{\frac{2m_b^*}{\hbar^2} (V_{eff} - E_z) + k_\parallel^2 + s \frac{2m_b^* \alpha}{\hbar^2} k_\parallel \sin(2\theta_l)}{1 + s \frac{2m_b^* \gamma}{\hbar^2} k_\parallel}}, \quad (10)$$

donde E_z es la energía cinética del electrón en la dirección z .

Probabilidad de transmisión y TMR

Los coeficientes \mathcal{R}_σ , \mathcal{C}_σ^s , \mathcal{D}_σ^s y \mathcal{T}_σ se determinan aplicando las condiciones de contorno en $z_l = 0$ y $z_r = a$. Es decir, $|\phi_\sigma^j(z_j)\rangle = |\phi_\sigma^s(z_j)\rangle$ y $\frac{1}{m_j^*} \frac{d|\phi_\sigma^j\rangle}{dz} \Big|_{z=z_j} = \frac{1}{m_b^*} \frac{d|\phi_\sigma^s\rangle}{dz} \Big|_{z=z_j}$. Luego, se obtiene:

$$\mathcal{C}_\sigma^s = \frac{\kappa_l}{2\sqrt{k_\sigma^l}} \frac{\rho_s + \kappa_r}{\eta_\sigma^s} \left[1 - i s \sigma e^{i(\varphi_\sigma^s - \theta_l)} \right] e^{-i\rho_s a}, \quad (11)$$

$$\mathcal{D}_\sigma^s = \frac{\kappa_l}{2\sqrt{k_\sigma^s}} \frac{\rho_s - \kappa_r}{\eta_\sigma^s} \left[1 - i s \sigma e^{i(\theta_\sigma^s - \theta_l)} \right] e^{i\rho_s a}, \quad (12)$$

con $\eta_\sigma^s = 2i(\kappa_l + \kappa_r)\rho_s \left[\cosh(\rho_s a) - i \frac{\kappa_l \kappa_r - \rho_s^2}{(\kappa_l + \kappa_r)\rho_s} \sinh(\rho_s a) \right]$ y $\kappa_j = \frac{m_b^*}{m_j^*} k_\sigma^j(E_z, \beta_j, k_{\parallel j})$. Además, el coeficiente de transmisión se define por la expresión:

$$\mathcal{T}_\sigma(E_z, \theta) = \frac{2i\kappa_l}{\sqrt{k_\sigma^s}} e^{-i(k_\sigma^s a + \frac{\theta_l}{2})} \cos\left(\frac{\theta_l}{2}\right) \sum_{s=\pm} \left\{ \frac{\eta_\sigma^s}{\rho_s} \right\}^{-1}. \quad (13)$$

En consecuencia, la probabilidad de transmisión es dada por la expresión:

$$T_{\theta_l}^\sigma(E_z, k_{\parallel j}, \theta) = 4\kappa_l \kappa_r \cos^2\left(\frac{\theta_l}{2}\right) \left| \sum_{s=\pm} \left\{ \frac{\eta_\sigma^s}{\rho_s} \right\}^{-1} \right|^2. \quad (14)$$

La TMR = $(G_P - G_{AP})/G_{AP}$, donde la conductancia G_P se presenta cuando $\mathbf{n}_l \parallel \mathbf{n}_r$ y la conductancia G_{AP} se da cuando $\mathbf{n}_l \nparallel \mathbf{n}_r$. De acuerdo a la fórmula de *Landauer-Büttiker* (LB) para $T = 0$ K (**Wimmer et al.**, 2009)

$$G_\iota = \frac{e^2 A_c}{(2\pi)^3 \hbar} \int_{k_1}^{k_2} dk_{\parallel j} T(k_{\parallel j}, \theta), \quad (15)$$

donde $\iota = P$, si $\theta = 0$ y para $\iota = AP$, $\theta = \pi$; A_c es el área de la sección transversal de la unión y $T(k_{\parallel j}, \theta) = T_{\theta_l}^\uparrow(E_F, k_{\parallel j}, \theta) + T_{\theta_l}^\downarrow(E_F, k_{\parallel j}, \theta)$ es el coeficiente de transmitividad.

Resultados y Discusión

La TMR para este trabajo se analiza considerando la PSV: Fe/SC/Fe a $T = 0$ K, con $k_{\parallel j} = k_{\parallel}$ y $k_1 = 0.1 \text{ nm}^{-1}$ hasta $k_2 = 0.4 \text{ nm}^{-1}$; para el Fe, $m_j^* = m_e$ (masa del electrón libre), $\Delta_j = 3.46 \text{ eV}$ y $E_F = 2.48 \text{ eV}$, estos dos últimos valores son calculados con los vectores onda en el nivel de *Fermi* para el espín up y down reportados experimentalmente por **Stearns** (1977). Las constantes SOC para los SC (III-V) tipo zincblenda: GaAs, GaSb y InAs son descritas en la tabla 1, la altura de barrera de los SCs es 0.75 eV (**Kondo**, 2012) para los dos primeros SCs y 0.32 eV (**Dakhlaoui et al.**, 2020; **Lu & Li**, 2010), para el último.

Tabla 1. Parámetros de masa efectiva normalizada por m_e , brecha de banda (**Fabian et al.**, 2007), constantes SOC *Dresselhaus* (**Perel' et al.**, 2003), excepto para GaAs se usa la reportada por **Kondo** (2012) y constantes SOC *Rashba* (**Dakhlaoui et al.**, 2020) para los SC de GaAs, GaSb y InAs.

	GaAs	GaSb	InAs
m_j^*/m_e	0.067	0.041	0.023
E_g (eV)	1.519	0.810	0.418
γ (eV·Å ³)	27.6	187	130
α (eV·Å)	0.0873	0.3	1.01

El término $R_\alpha = (2m_b^* \alpha / \hbar^2) k_{\parallel} \sin(2\theta_l)$ que se relaciona con el SOC *Rashba* no genera ningún cambio al vector de onda del electrón dentro de la barrera de potencial (ver expresión (10)), debido a que el término $R_\alpha = 0$, si $\theta_l = 0$ o $R_\alpha \ll 1$, si $\theta_l = \pi/4$ (ángulo del eje [110] que favorece la magnetización para el Fe (**Matos-Abiague & Fabian**, 2009), para los valores de α de la tabla 1.

De igual forma, se observa en la tabla 2, que el SOC *Dresselhaus* no genera cambios significativos, no obstante numéricamente se aprecia una disminución en la TMR cuando la

constante de SOC aumenta. El anterior efecto también se aprecia en la Fig.2 en donde se utiliza las fórmulas LB y VLB para el cálculo del TMR en función de la dirección del \mathbf{n}_l para la PSV Fe/GaSb/Fe, la cual según la tabla en mención muestra cambios más notorios respecto a los SCs GaAs e InAs; más no son relevantes, ya que es una disminución aproximadamente del 0.06% en el momento de tener en cuenta el SOC en discusión.

Tabla 2. Cálculo de la TMR a $\theta_l = 0$, empleando la fórmula LB, variando la constante de SOC Dresselhaus desde 0 hasta el valor definido para cada SC, a diferentes espesores. Para GaAs y GaSb la altura de barrera se considera de 0.75 eV, y para InAs de 0.32 eV.

a (nm)	GaAs		GaSb		InAs	
	0	27.6	0	187	0	130
2.0	0.19370	0.19366	0.24553	0.24493	0.16413	0.16410
2.5	0.19812	0.19807	0.25632	0.25572	0.19276	0.19270
3.0	0.19945	0.19940	0.26059	0.25997	0.21277	0.21270
3.5	0.19980	0.19975	0.26222	0.26157	0.22586	0.22579
4.0	0.19986	0.19980	0.26279	0.26211	0.23410	0.23402

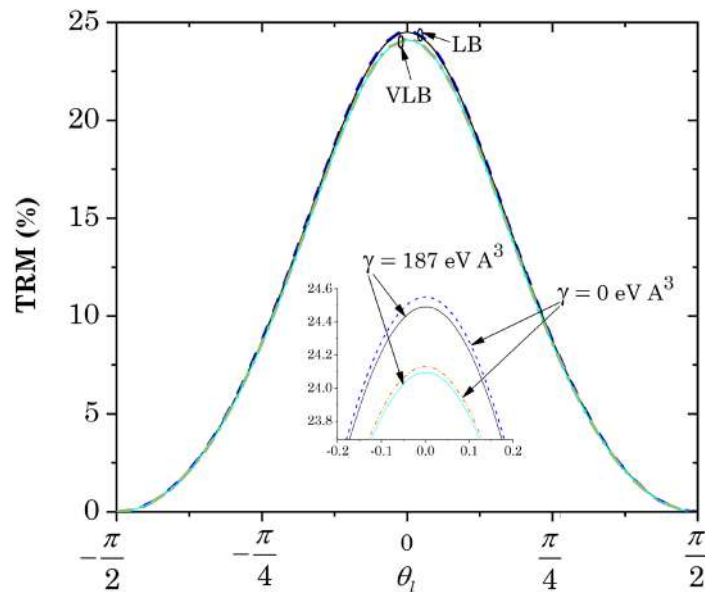


Figura 2. TMR (LB y VLB) en función de la dirección del \mathbf{n}_l para una PSV tipo Fe/GaSb/Fe donde la altura de la barrera es de 0.75 eV con $a = 2$ nm. Se aprecia una ampliación de la zona donde está el máximo TMR.

Por otro lado, en la Fig.3 se observa que la TMR alcanza su valor máximo cuando \mathbf{n}_l es paralelo al eje $[010]$, donde la PSV Fe/GaSb/Fe muestra mejor desempeño y es claro que la TMR baja cuando $\theta_l = \pi/4$ tal como se observa en la figura 4(b). Por otro lado, para $\theta_l = 0$, como caso particular, el modelo fisicomatemático presentado en este trabajo concuerdan con el trabajo **Kondo** (2012), excepto con la expresión (14) correspondiente a la probabilidad de transmisión que no se describe y que la conductancia es definida por una variante de la fórmula de *Landauer-Büttiker* (VLB) para $T = 0$ K (**Ferry & Goodnick**, 1997; **Kondo**, 2012). Es decir, $G_t = (e^2/\pi\hbar)T(k_{||j}, \theta)$ con $k_{||j}$ fijo.

En consecuencia, al observar la figura 4(a) la PSV Fe/GaAs/Fe (VLB) no muestra una TMR negativa aun considerando el SOC *Dresselhaus*, generando un discrepancia con el

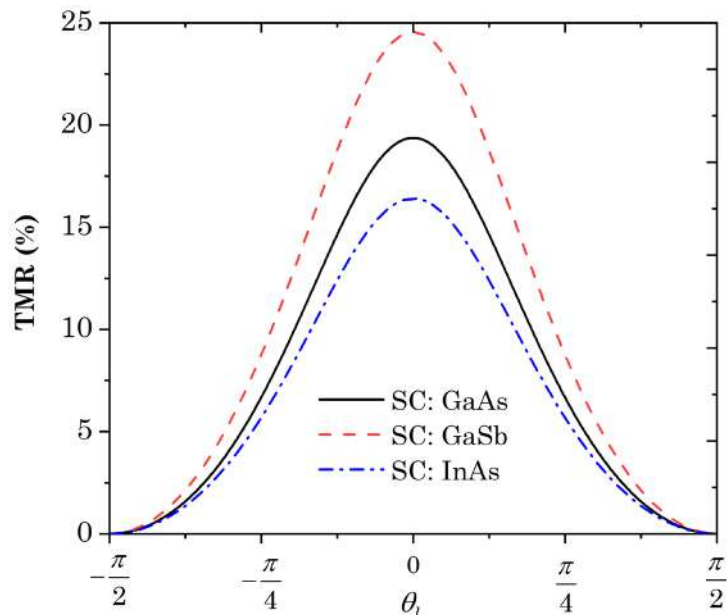


Figura 3. TMR (LB) en función de la dirección del \mathbf{n}_l para una PSV tipo Fe/SC/Fe donde la altura de la barrera los SCs GaAs y GaSb es de 0.75 eV y de 0.32 eV para InAs, con $a = 2$ nm

trabajo de **Kondo** (2012). En efecto, en el trabajo en mención la TMR converge a -60% a partir $a = 0.75$ nm al considerar SOC *Dresselhaus*, resultado respaldado respecto al signo negativo, más no el valor numérico, con el trabajo de **Zenger et al.** (2004) el cual usa campo magnético medido en *Teslas* y explica que la TMR negativa implican la supresión de la dispersión spin-flip o Zeeman-splitting en la barrera de túnel, pero ninguna de estas explicaciones es totalmente consistente con los datos. En tanto, en la figura 4(a) se tiene que la TMR se satura en un 19.6%, con $\gamma = 0$ o $\gamma = 27.6 \text{ eV} \cdot \text{Å}^3$. Valor que coincide con el resultado de **Kondo** (2012) para $\gamma = 0$, pero no para $\gamma = 27.6 \text{ eV} \cdot \text{Å}^3$. Por otro lado, el trabajo de **Autès et al.** (2010) indica que cuando se incluyen los orbitales *d* y, en particular, la interacción espín-órbita, la relación TMR se satura rápidamente con el espesor de GaAs a un valor bastante modesto de alrededor del 30% cuando el nivel de Fermi E_F se encuentra en el medio de la brecha de GaAs.

Adicionalmente, en el estudio de **Kondo** (2012) para la PSV Fe/GaSb/Fe se tiene que la TMR converge a 140% a partir de $a = 2.5$ nm, resultado que no coincide con el modelo propuesto ya que para ese espesor la TMR es del 25.23% (ver figura 4(a) VLB) debido a que la contribución del SOC no es apreciable según la tabla 2. Por otro lado, la figura 4(b) muestra que si la dirección de \mathbf{n}_l aumenta a $\theta_l = \pi/4$, la TMR baja sin cambiar la jerarquía vista en la figura 4(a) respecto al tipo de SC utilizado.

Conclusiones

Para el modelo físicomatemático propuesto en este trabajo no se aprecia que el SOC *Dresselhaus* y *Rashba* contribuya a la TMR, bien sea utilizando la fórmula LB o VLB. Lo cual no está conforme con el resultado de **Kondo** (2012) para el SOC *Dresselhaus* para la PSV Fe/SC/Fe con los SCs GaAs y GaSb. Pero la dirección de \mathbf{n}_l influye inversamente proporcional a la magnitud de la TMR de las pseudoválvulas de espín en estudio.

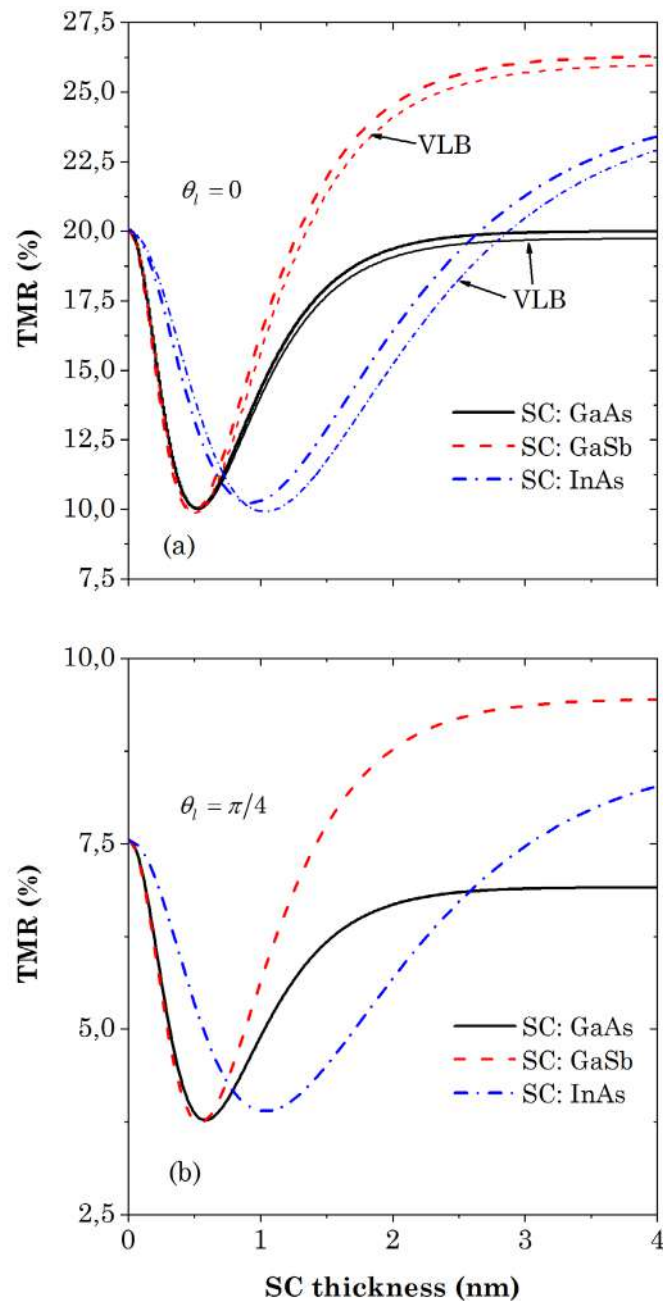


Figura 4. TMR calculado por la fórmula LB para un solo canal variando el espesor del SC, considerando una PSV tipo Fe/SC/Fe donde SC corresponde a GaAs, GaSb y InAs. En (a) se comparan la TMR calculada con la fórmula VLB ($k_{\parallel} = 0.2 \text{ nm}^{-1}$) a $\theta_l = 0$ y en (b) se presenta el cambio de la TMR cuando $\theta_l = \pi/4$

Agradecimientos

El autor agradece a la Maestría en Ingeniería Física de la Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación de la Universidad del Cauca por brindar el espacio y tiempo para el desarrollo de este trabajo. De igual manera, se agradece al Dr. Diego F. Coral Coral del departamento de física de la Universidad del Cauca por los aportes dados para el análisis de los resultados.

Contribución del autor

La concepción, redacción y enfoque de esta reseña corresponden al autor de esta contribución.

Conflicto de intereses

El autor declara que no hay ningún conflicto de intereses.

References

- Bunder, J. E.** (2007). Spin-polarized transport in dilute magnetic semiconductor tunnel junctions. *Applied Physics Letters*, 91(1), 092111/1–3.
- Dakhlaoui, H., Nefzi, M., Al-Shameri, N. S., Suwaidan, A. A., Elmobkey, H., Almansour, S., Alnaim, I.** (2020). Magnetic field effect on spin-polarized transport in asymmetric multibarrier based on InAs/GaAs/GaSb systems. *Physica B: Condensed Matter*, 597, 412403/1-7.
- Economou, E. N., Soukoulis, C. M.** (1981). Static conductance and scaling theory of localization in one dimension. *Physical Review Letters*, 46(9), 618-621.
- Fabian, J., Matos-Abiague, A., Ertler, C., Stano, P., Žutić, I.** (2007). Semiconductor Spintronics. *Acta Physica Slovaca*, 57(4), 1-343.
- Ferry, D. K., Goodnick, S. M.** (1997). *Transport in nanoestructuras* (First). Cambridge University Press.
- Gani, M., Shah, K. A., Parah, S. A., Misra, P.** (2020). Room temperature high giant magnetoresistance graphene based spin valve and its application for realization of logic gates. *Physical Letters A*, 384, 126171/1-8.
- Ju, S., Cai, T.-Y. Y., Guo, G.-Y., Li, Z.-Y.** (2008). Theory of tunneling magnetoresistance and tunneling electroresistance in Co/BiFeO₃/La₂/3Sr₁/3MnO₃ junctions. *Journal of Applied Physics*, 104, 053904/1-6.
- Kondo, K.** (2012). Spin transport in ferromagnet/semiconductor/ferromagnet structures with cubic Dresselhaus spin-orbit-interaction. *Journal of Applied Physics*, 111, 07C713/1-3.
- Kubota, T., Wen, Z., Takanashi, K.** (2019). Current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance effects using heusler alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 492, 165667/1–6.
- Kumar, M. Y., Kumar, S. G.** (2022). FeAl/MgO/FeAl MTJ with enhanced TMR and low resistance area product for MRAM: A first principle study. *Micro and Nanostructures*, 165, 207192/1-7.
- Lu, J.-D., Li, J.-W.** (2010). The effects of Dresselhaus and Rashba spin-orbit interactions on the electron tunneling in a non-magnetic heterostructure. *Applied Surface Science*, 256, 4027-4030.
- Matos-Abiague, A., Fabian, J.** (2009). Anisotropic tunneling magnetoresistance and tunneling anisotropic magnetoresistance: spin-orbit coupling in magnetic tunnel junctions. *Physical Review B*, 79(1), 155303/1-19.
- Perel', V. I., Tarasenko, S. A., Yassievich, I. N., Ganichev, S. D., Belkov, V. V., Prettl, W.** (2003). Spin-dependent tunneling through a symmetric semiconductor barrier. *Physical Review B*, 67, 201304/1-3.
- Qi, Y., Xing, D. Y., Dong, J.** (1998). Relation between Julliere and Slonczewski models of tunneling magnetoresistance. *Physical Review B*, 55(5), 2783-2787.
- Saffarzadeh, A., Shokri, A. A.** (2006). Quantum theory of tunneling magnetoresistance in GaMnAs/GaAs/GaMnAs heterostructures. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 305(1), 141-146.
- Shokri, A. A.** (2006). Angular dependence of tunneling magnetoresistance in magnetic semiconductor heterostructures. *The European Physical Journal B*, 50, 475-481.
- Slonczewski, J. C.** (1989). Conductance and exchange coupling of two ferromagnets separated by a tunneling barrier. *Physical Review B*, 39(10), 6995-7002.
- Takase, K., Duc, L. A., Takiguichi, K., Tanaka, M.** (2020). Current-in-plane spin-valve magnetoresistance in ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb heterostructures with high Curie temperature. *Applied Physics Letters*, 117, 092402/1-5.

-
- Tao, Y. C., Hu, J. G., Liu, H.** (2004). Spin-polarized transport in diluted GaMnAs/AlAs/Ga MnAs ferromagnetic semiconductor tunnel junctions. *Journal of Applied Physics*, 96(1), 498-502.
- Wimmer, M., Lobenhofer, M., Moser, J., Matos-Abiague, A., Schuh, D., Wegscheider, W., Fabian, J., Richter, K., Weiss, D.** (2009). Orbital effects on tunneling anisotropic magnetoresistance Fe/GaAs/Au junctions. *Physical Review B*, 80, 121301(R)1-4.
- Yang, X., Gu, R. Y., Xing, D. Y., Wand, Z. D., Jinming-Dong.** (1997). Tunneling magnetoresistance in ferromagnet/insulator/ferromagnet junctions. *International Journal of Modern Physics B*, 11(28), 3375-3384.
- Zenger, M., Moser, J., Wegscheider, W., Weiss, D.** (2004). High-field magnetoresistance of Fe/GaAs/Fe tunnel junctions. *Journal of Applied Physics*, 96(4), 2400-2402.

Original article

Geometric uncertainty in non-paraxial interference

Incertidumbre geométrica en interferencia no-paraxial

Román Castañeda

Escuela de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia

Abstract

In this article, a novel meaning for the notion of uncertainty is discussed, within the framework of the non-paraxial interference theory based on confinement in geometric states of space. This novel meaning refers to the fact that, for any set of space states whose vertices are distributed in an arbitrary array of size less than $\lambda/10$, both the excitation provided by the geometric potential and the positions of the vertices of the states are completely uncertain, such that the complete set is represented by the Lorentzian well of an individual ground state of space, with vertex at any of the points of the array, even if the set is under the maximum prepared non-locality (i.e., under a strong geometric potential). It is shown that the geometric uncertainty is different but compatible with the Heisenberg uncertainty principle. In fact, geometrical uncertainty establishes both the upper limit of momentum uncertainty and the lower limit of position uncertainty in the Heisenberg principle.

Keywords: Uncertainty; States of space; Geometric potential; Confinement; Spatially structured wells.

Resumen

En este artículo se discute un significado novedoso para la noción de incertidumbre, en el marco de la teoría de interferencia no-paraxial basada en el confinamiento en estados geométricos del espacio. Este significado se refiere al hecho de que, para cualquier conjunto de estados del espacio cuyos vértices se distribuyen en un arreglo arbitrario de tamaño menor que $\lambda/10$, tanto la excitación proporcionada por el potencial geométrico como las posiciones de los vértices de los estados son completamente inciertas, de tal forma que el conjunto completo es representado por el pozo lorentziano de un estado base individual del espacio, con vértice en cualquiera de los puntos del arreglo, incluso si el conjunto está bajo la máxima no-localidad preparada (es decir, bajo potencial geométrico fuerte). Se muestra que la incertidumbre geométrica es diferente pero compatible con el principio de incertidumbre de Heisenberg. De hecho, la incertidumbre geométrica establece tanto el límite superior de la incertidumbre de cantidad de movimiento como el límite inferior de la incertidumbre de posición en el principio de Heisenberg.

Palabras clave: Indeterminación; Estados del espacio; Potencial geométrico; Confinamiento; Pozos espacialmente estructurados.

Citation: Román C. Geometric uncertainty in non-paraxial interference. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185):795-806, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1952>

Editor: Angela Guzmán

***Corresponding autor:**
Román Castañeda;
rcastane@unal.edu.co

Received: July 17, 2023

Accepted: November 26, 2023

Published on line: December 7, 2023



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

Introduction

Uncertainty is a principle of quantum mechanics that precludes the simultaneous measurement of conjugated variables, such as position and momentum or time and energy, with arbitrary accuracy (Feynman *et al*, 1965). Because such simultaneous measurement is required for describing particle dynamics deterministically, uncertainty limits the deterministic knowledge of physical systems.

Preclusion of simultaneous accurate measurement of conjugated variables (u, v) is usually formalized by the canonical inequality $\Delta u \Delta v \geq \alpha \hbar$, with $\Delta u, \Delta v$ denoting the uncertainties of the measured variables, α is a real positive number (usually 1/2) and $\hbar = h/2\pi$ with h the Planck's constant (Feynman *et al*, 1965). Thus, if measurement accuracy of any of them, say u , arbitrarily increases so that $\Delta u \rightarrow 0$, then the uncertainty of the other variable increases arbitrarily, i.e. $\Delta v \rightarrow \infty$, thus impeding its accurate measurement.

Single particle diffraction by slit masks has been used for demonstrating uncertainty between position and momentum, i.e. Heisenberg's uncertainty principle (Feynman *et al*, 1965; Matteucci *et al*, 2010). Slit width is associated to the uncertainty of the transverse position component Δx of the particle that crosses the slit, while main maximum width of far-field diffraction pattern is associated to the uncertainty of the transverse component of particle momentum Δp . So, paraxially approached diffraction (Born & Wolf, 1993) allows verifying the achievement of Heisenberg's uncertainty principle $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$ straightforwardly.

Although this description of uncertainty is widely accepted, some authors have indicated important precisions that not only improve but also modify its physical meaning, thus making uncertainty independent of instrumental or experimental contexts (Ozawa, 2003; Ballentine, 2014). Some experiments have been performed to verify the accuracy of such new interpretations, thus indicating that the notion above seems to be naive and non-entirely correct (Erhart *et al*, 2012; Rozema *et al*, 2012). This has inspired an interesting debate about the meaning of the notion of uncertainty (Bush *et al*, 2013; Rozema *et al*, 2013).

From a different perspective, a new ontology has been recently proposed for single particle interference in ordinary space (Castañeda & Hurtado, 2023; Castañeda *et al*, 2023; Castañeda *et al*, 2021). In this theory, the fundamental role is played by ordinary space, which is conceived as a system with geometric states that confine light and single particles. Such states of space are realized as spatially structured Lorentzian wells, resulting from vacuum fluctuations. The wells become filled of light or particles after a significant number of individual experimental realizations, that is the segments of an interference experiment that begin with the local emission of a single photon or matter particle and end with its local detection, so that only one particle moves in the interferometer without connection with preceding or posterior particles (Castañeda *et al*, 2023). So, recording of light or particles by a squared modulus detector, placed at a given well cross-section, reveals the structure of the geometric state of space, called interference pattern. In this context, diffraction is shown as a particular case of interference. The main goal of this paper is to discuss new meanings of uncertainty in the framework of this novel ontology.

Fundamentals

Mathematical formalism used in the following is deduced in detail in (Castañeda *et al*, 2023) and therefore, its deduction is not included here but its main expressions are directly applied. Let us consider interference in the volume delimited by the mask plane M and the detector plane D, separated a distance z to each other, **figure 1**.

It has been shown that non-locality at M is the necessary and sufficient condition for producing interference in MD volume (Castañeda *et al*, 2021). It is represented by functions denoted as $\kappa(\xi_+, \xi_-) = w(\xi_+, \xi_-) \tau(\xi_+, \xi_-)$, that link pairs of points of M, specified as $\xi_{\pm} = \xi_A \pm \xi_D/2$ in reduced coordinates, i.e. ξ_D denotes the separation vector of the pair of points and ξ_A is the midpoint between them. $w(\xi_+, \xi_-) = \psi(\xi_+) \psi^*(\xi_-)$ is the prepared non-locality at M, with $\langle \xi | \psi \rangle$ the eigenfunction of Laplacian in Helmholtz equation $\nabla^2 \langle \xi | \psi \rangle = -k^2 \langle \xi | \psi \rangle$, with eigenvalue $-k^2$ and $k = \omega/c$ for light waves of frequency ω (c is the light speed in vacuum) and $k = p/\hbar$ for single matter particles of momentum p (Helmholtz equation is the spatial component of both the wave equation and Schrödinger equation (Born & Wolf, 1993; Feynman *et al*, 1965)). The area of pairs of points with the same midpoint ξ_A , for which $w(\xi_+, \xi_-)$ takes on non-negligible values, is called non-locality support. Outside it, $w(\xi_+, \xi_-)$ nullifies or takes on negligible values. $\tau(\xi_+, \xi_-) = t(\xi_+) t^*(\xi_-)$ is the non-local transmission function of the mask placed at M. It should be noted that $\kappa(\xi_+, \xi_-) = \kappa^*(\xi_-, \xi_+)$. Local component of non-locality function, obtained by evaluating it for $\xi_D = 0$, gives $\kappa(\xi_A, \xi_A) = w(\xi_A, \xi_A) \tau(\xi_A, \xi_A)$ with $w(\xi_A, \xi_A) = |\psi(\xi_A)|^2$, $\tau(\xi_A, \xi_A) = |t(\xi_A)|^2$, and $0 \leq |t(\xi_A)|^2 \leq 1$ the mask transmittance (Born & Wolf, 1993) at ξ_A .

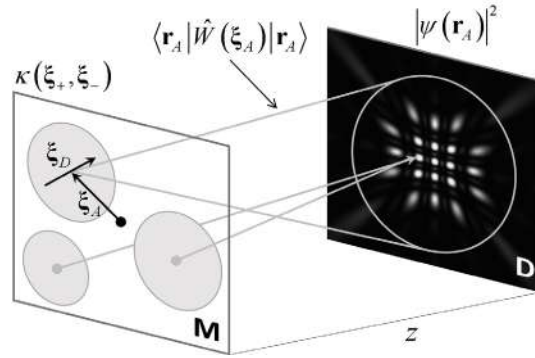


Figure 1. Conceptual sketch for interference in the volume delimited by M and D. Shaded circles on M represent the non-locality supports. The cone with vertex at ξ_A represents the spatially structured Lorentzian well of the individual geometric state of space that confine light energy or single particles that enter at ξ_A . Mathematical expressions are explained in text.

Interference patterns are locally measured by squared modulus detectors at each point \mathbf{r}_A of D. They are represented by the observable (Castañeda *et al*, 2023)

$$|\psi(\mathbf{r}_A)|^2 = \langle \mathbf{r}_A | \psi \rangle \langle \psi | \mathbf{r}_A \rangle = \int_M d^2 \xi_A \langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle = \int_M d^2 \xi_A \left(\langle \mathbf{r}_A | \hat{R}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle + \frac{1}{2} \langle \mathbf{r}_A | \hat{G}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle \right). \quad (1)$$

Density operator

$$\hat{W}(\xi_A) = \hat{W}^\dagger(\xi_A) = \hat{R}(\xi_A) + \frac{1}{2} \hat{G}(\xi_A), \quad (2)$$

with \dagger denoting adjoint, represents the individual excited states of space, resulting by exciting each base state of space by specific modes of the geometric potential. Indeed,

$$\hat{R}(\xi_A) = \hat{R}^\dagger(\xi_A) = |\psi(\xi_A)|^2 |t(\xi_A)|^2 |\Theta(\xi_A)\rangle \langle \Theta(\xi_A)| \quad (3)$$

and

$$\hat{G}(\xi_A) = \hat{G}^\dagger(\xi_A) = \int_{\substack{M \\ \xi_D \neq 0}} d^2 \xi_D \kappa(\xi_+, \xi_-) |\Theta(\xi_+)\rangle \langle \Theta(\xi_-)|. \quad (4)$$

are the density operators for base states of space and geometric potential, respectively. The projection of self-adjoint kernel $|\Theta(\xi_+)\rangle \langle \Theta(\xi_-)|$ on detection points of D gives the scalar, geometric and deterministic function

$$\langle \mathbf{r}_A | \Theta(\xi_+)\rangle \langle \Theta(\xi_-) | \mathbf{r}_A \rangle = \left(\frac{k}{4\pi} \right)^2 \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_+|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_+|^2} \right) \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_-|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_-|^2} \right) \exp(ik|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_+| - ik|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_-|), \quad (5)$$

whose local component, obtained by evaluating it for $\xi_D = 0$, gives

$$\langle \mathbf{r}_A | \Theta(\xi_A)\rangle \langle \Theta(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle = \left(\frac{k}{4\pi} \right)^2 \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A|^2} \right)^2. \quad (6)$$

Equation (6) describes the Lorentzian well with vertex at ξ_A , that realizes the individual base state of space $\langle \mathbf{r}_A | \hat{R}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle$ in MD volume, which confines light energy or single particles that enter it at its vertex, represented by coefficient $|\psi(\xi_A)|^2 |t(\xi_A)|^2$ in Eq. (3). Equation (5) describes the mode of geometric potential $\langle \mathbf{r}_A | \hat{G}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle$ in MD volume, related to the pair of points ξ_\pm , in such a way that, if $\kappa(\xi_+, \xi_-) \neq 0$ then the geometric potential mode equally excites (spatially modulates) the base states with vertices at both points ξ_\pm . Therefore, $\hat{R}(\xi_A)$ and $\hat{G}(\xi_A)$ are independent to each other, so that $[\hat{R}(\xi_A), \hat{G}(\xi_A)] = 0$, and $\hat{W}(\xi_A) = \hat{R}(\xi_A)$ if $\kappa(\xi_+, \xi_-) = 0$ for any $\xi_D \neq 0$.

By expressing $\kappa(\xi_+, \xi_-) = |\kappa(\xi_+, \xi_-)| \exp(i\alpha(\xi_+, \xi_-))$ and considering the Hermitic symmetry of Eq. (4) for the permutation $\xi_\pm \rightarrow \xi_\mp$ of any pair of points, i.e. for the two degrees of freedom in orientation of separation vectors, Eq. (4) can be expressed as

$$\langle \mathbf{r}_A | \hat{G}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle = 2 \int_{\xi_D \neq 0}^M d^2 \xi_D |\kappa(\xi_+, \xi_-)| \operatorname{Re}(\langle \mathbf{r}_A | \Theta(\xi_+) \rangle \langle \Theta(\xi_-) | \mathbf{r}_A \rangle \exp(i\alpha(\xi_+, \xi_-))), \quad (7)$$

by adding the contributions for the two degrees of freedom in orientation of separation vectors. Re denotes the real part. Integrand of Eq. (7) means that each geometric potential mode excites the base states of space with vertices at a given pair of points ξ_{\pm} with the same cosine-like spatial modulation. However, the spatial structures of the excited states are mirror symmetrical to each other due to the positions of their vertices, as shown later.

Because of geometric potential $\langle \mathbf{r}_A | \hat{G}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle$, the individual excited states are realized as spatially structured Lorentzian wells $\langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle$, i.e. the excitation distributes the confinement in specific zones within the base state volume. As a consequence, light energy and single particle quantum probability concentrate in such specific confinement zones.

Excitation uncertainty

Let us consider Young interference with two pinhole mask, with separation vector $\xi_D = \mathbf{a}$, whose non-local transmission function is $\tau(\xi_+, \xi_-) = (\delta(\xi_A - \mathbf{a}/2) + \delta(\xi_A + \mathbf{a}/2))\delta(\xi_D) + (\delta(\xi_D - \mathbf{a}) + \delta(\xi_D + \mathbf{a}))\delta(\xi_A)$, with $\delta(\bullet)$ the Dirac delta. First two terms with factor $\delta(\xi_D)$ are the local component (i.e. transmission function of individual pinholes), while remaining terms with factor $\delta(\xi_A)$ are the non-local component with the two degrees of freedom in orientation for the separation vector. By inserting this non-local transmission in integrand of Eq. (1), the spatially structured wells of the two individual excited states of space in Young interference become

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle &= \left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 |\psi(\xi_A)|^2 \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A|^2}\right)^2 \delta(\xi_A \pm \mathbf{a}/2) \\ &+ \left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 |\kappa(\xi_A + \mathbf{a}/2, \xi_A - \mathbf{a}/2)| \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - (\xi_A + \mathbf{a}/2)|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - (\xi_A + \mathbf{a}/2)|^2}\right) \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - (\xi_A - \mathbf{a}/2)|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - (\xi_A - \mathbf{a}/2)|^2}\right) \\ &\times \cos(k|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - (\xi_A + \mathbf{a}/2)| - k|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - (\xi_A - \mathbf{a}/2)| + \alpha(\xi_A + \mathbf{a}/2, \xi_A - \mathbf{a}/2)) \delta(\xi_A) \end{aligned} \quad (8)$$

First term of Eq. (8) describes the Lorentzian wells with vertices at $\xi_A = \pm \mathbf{a}/2$ of base states of space, while the second term points out that Young interference is monomodal and, the geometric potential mode with vertex at the midpoint between pinholes, $\xi_A = 0$, equally excites the two base states.

Cross-section of the overlapped excited states of space at D determines the observable defined Eq. (1) for the Young interference pattern,

$$|\psi(\mathbf{r}_A)|^2 = \langle \mathbf{r}_A | \hat{W}\left(\frac{\mathbf{a}}{2}\right) | \mathbf{r}_A \rangle + \langle \mathbf{r}_A | \hat{W}\left(-\frac{\mathbf{a}}{2}\right) | \mathbf{r}_A \rangle = \langle \mathbf{r}_A | \hat{R}\left(\frac{\mathbf{a}}{2}\right) | \mathbf{r}_A \rangle + \langle \mathbf{r}_A | \hat{R}\left(-\frac{\mathbf{a}}{2}\right) | \mathbf{r}_A \rangle + \langle \mathbf{r}_A | \hat{G}(0) | \mathbf{r}_A \rangle. \quad (9)$$

A very important feature of Young interference is the dependence of geometric potential from pinhole separation. Specifically, there is an inverse relationship between the excitation spatial frequency and the pinhole separation. Because Lorentzian envelope restricts the angular spreading of excitation modulation, it should be expected that the geometric potential mode does not provide spatial modulation for pinhole separation $|\mathbf{a}| \leq a_0$, with a_0 to be specified. More precisely, for $|\mathbf{a}| \leq a_0$ it takes on only positive values within Lorentzian envelope, instead of varying between positive and negative values. It is illustrated in **figure 2**.

Cosine-like characteristic interference excitation, provided by geometric potential mode for $|\mathbf{a}| > \lambda$ (Castañeda, 2017), is shown in (a). After shortening pinhole separation to $|\mathbf{a}| > \lambda$ in (b), only a wider axial main confinement zone is excited together with some lateral zones of low confinement. This geometric potential provides the characteristic diffraction excitation (Castañeda, 2017). By further shortening pinhole separation, spatial modulation of geometric potential become significantly smooth and axial main confinement zone

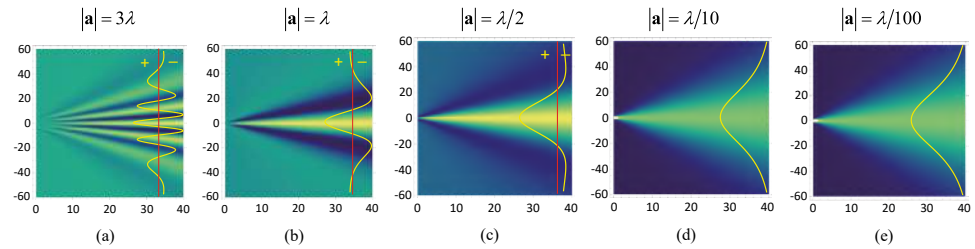


Figure 2. Axial sections of geometric potential for Young interference with different pinhole separation $|a|$ ($\lambda = 4\mu\text{m}$ for light waves and photons, and $\lambda = 4\text{pm}$ for single matter particles). Vertical profiles show the spatial modulation excited at $z = 10\lambda$. Horizontal axis $0 \leq z \leq 10\lambda$. Vertical axes are the components of ξ_A on left side and r_A on right side mutually parallel to the pinhole separation vector. Axes units are μm for light waves and photons, and pm for single matter particles.

increases its angular spreading, as shown in (c). For $|a| = \lambda/10$ in (d), geometric potential mode takes on only positive values of its Lorentzian envelope, and this behavior remains unchanged for $|a| < \lambda/10$, graph (e). Therefore, Lorentzian cone of invariant geometry for $|a| \leq \lambda/10$ seems to be the extreme shape of geometric potential mode.

Figure 3 illustrates the wells of individual states of space in Young interference, excited by geometric potential modes in **figure 2** under maximal prepared non-locality M . As expected, corresponding graphs in upper and bottom rows are mirror symmetrical to each other, with respect to the well axis, and graphs on columns 1 and 2 from left exhibit negative valued forbidden zones (Castañeda *et al.*, 2023). Graphs (a), (f) show that geometric potential for interference excites a set of confinement zones for the propagation of light energy and single particles that enter each individual excited state of space at its vertex. In contrast, diffraction confinement in (b) and (g) occupies only the wider axial main zone, surrounding by zones with lower confinement. In graphs (c), (h), these lateral confinement zones disappear in each individual state of space, and their main axial confinement zones remain narrower than Lorentzian well of corresponding base state. However, for $|a| \leq \lambda/10$ each individual excited state becomes identical to the base state of space, which indicates that geometric potential is unable to spatially modulate them.

It is confirmed by the complete excited state of space resulting by overlapping the two individual excited states, as illustrated in **figure 4** for the examples in **figure 3**. A set of narrow disjoint confinement zones modulate the Lorentzian well as excited by geometric potential for interference, graph (a). Because of spatial entanglement of individual excited states of space (Castañeda *et al.*, 2023), their forbidden zones are reduced to null points between consecutive confinement zones in the complete excited state. So, confinement zones behave as propagation channels for light energy and single particles. A wider main axial zone surrounding by lateral zones with lower confinement modulates the well as excited by the geometric potential for diffraction, graph (b). This confirms diffraction as particular case of interference. Because of geometric potential for $|a| = \lambda/2$, lateral low confinement zones are removed and axial main zone remains narrower than the base space of state, graph (c). However, for $|a| = \lambda/10$ graph (d), the complete excited state of space for interference becomes identical to the base state of space with vertex at the midpoint between the pinholes. This remains unchanged for $|a| < \lambda/10$, graph (e). Therefore, it is completely uncertain if both individual and complete states of space are excited by the geometric potential mode for $|a| \leq \lambda/10$. This suggests $a_0 = \lambda/10$.

The same behavior occurs by weak prepared non-locality, with the only difference that forbidden zones of both individual excited states are removed. Consequently, confinement zones of the complete excited state of space are not disjoint. Nevertheless, $|a| \leq \lambda/10$ remains valid as criterion for excitation uncertainty.

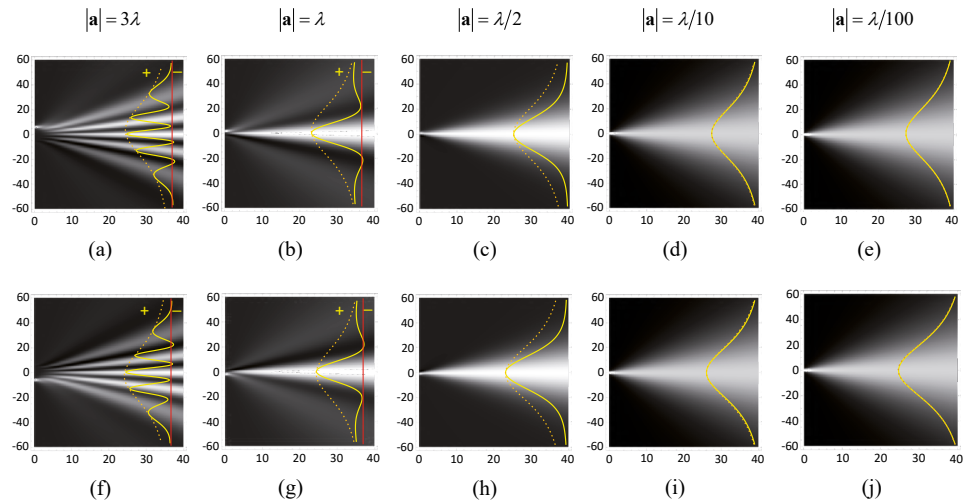


Figure 3. Axial sections of wells of individual states of space in Young interference, excited by geometric potential modes in **figure 2** under maximal prepared non-locality at M . Vertical profiles show well cross-sections at $z = 10\lambda$, which exhibit forbidden zones for $|a| \geq \lambda$, removed for $|a| < \lambda$. Dotted line profile describes Lorentzian cross-section of corresponding base state of space. It points out that each individual excited state becomes identical to its base state of space for $|a| \leq \lambda/10$. Graph axes and units are the same as in **figure 2**.

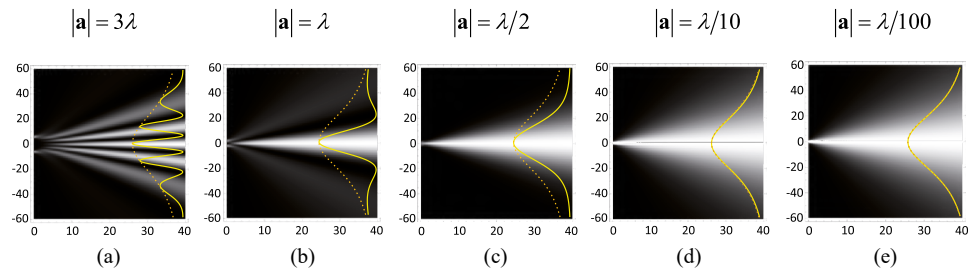


Figure 4. Axial sections of spatially structured Lorentzian wells for Young interference, resulting from overlapping the individual states of space in **figure 3**. It should be noted that spatial structure of each well is identically shaped as the corresponding geometric potential mode in **figure 2**. Vertical profiles show the well cross-sections at $z = 10\lambda$. Dotted line profile describes Lorentzian cross-section of base state of space with vertex at the midpoint between pinholes. Complete excited state of space becomes identical to the base state for $|a| \leq \lambda/10$. Graph axes and units are the same as in **figure 2**.

The analysis above can be extended for interference with masks with arbitrary distributions of space state vertices. Indeed, each geometric potential mode, activated by arbitrary prepared non-locality, excites only two specific base states of the distribution. As a consequence, Eq. (1) can be expressed as the overlapping of a set of Young interference contributions. It is illustrated without loss of generality in **figure 5**, by considering a mask with a regular 3×3 pinhole array, whose size is determined by the length of array diagonal L . It should be noted that the spatially structured Lorentzian well of the complete excited state of space is shaped by the corresponding geometric potential. For first column on the left, array size and spacing fulfil interference condition $L > |a| > \lambda$ (Castañeda, 2017), so that the spatial modulation of the well cross-sections at any distance z determines an interference pattern after a significant number of individual experimental realizations. For second column from left, diffraction condition $L > \lambda$ and $|a| < \lambda$ is fulfilled (Castañeda, 2017).

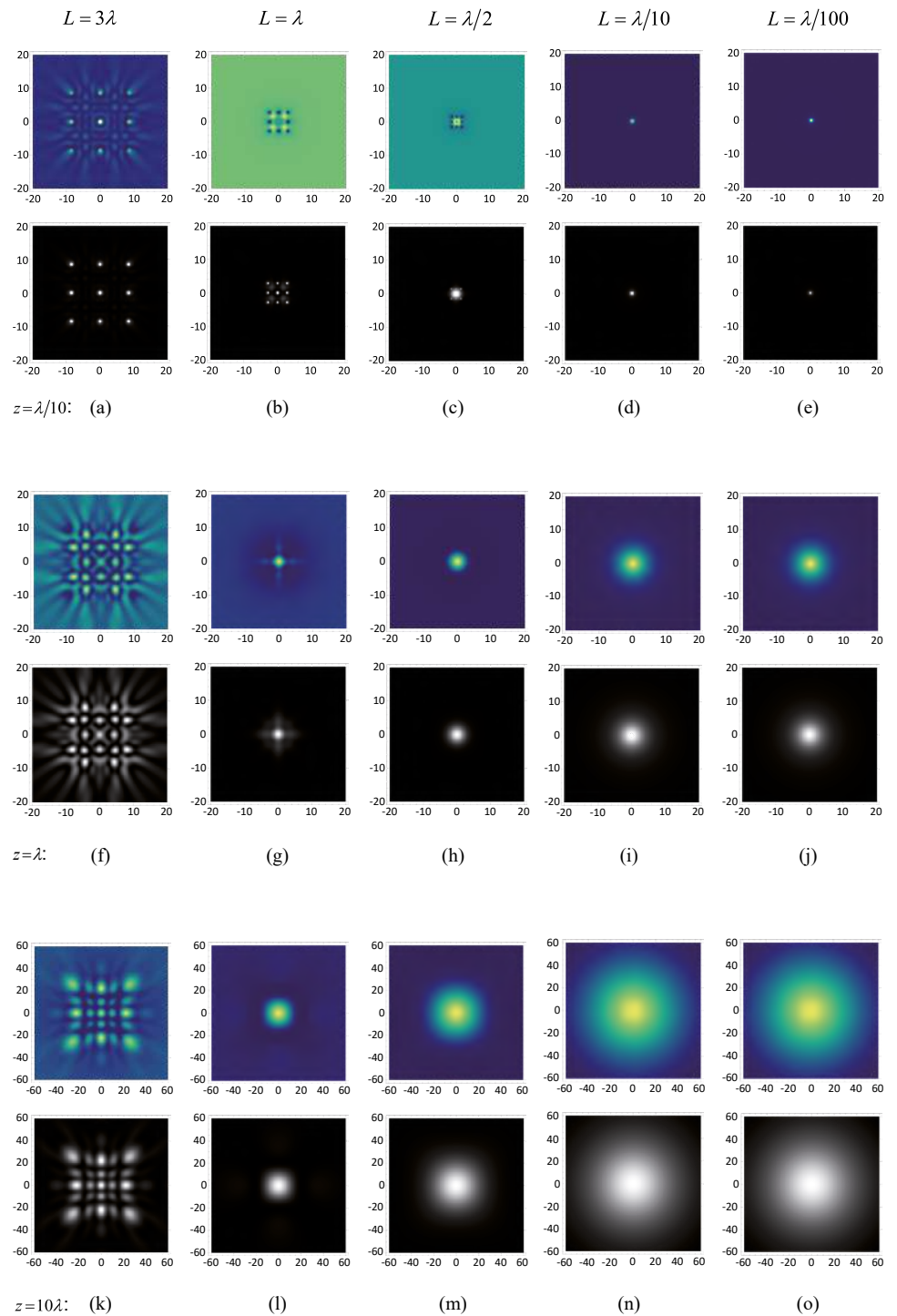


Figure 5. Cross-sections at different distances z of geometric potentials (rows 1, 3, 5 from top) and spatially structured Lorentzian wells (rows 2, 4, 6 from top) for interference with a regular array of 3×3 pinholes under maximal prepared non-locality. Array vertical and horizontal spacing is $|\mathbf{a}| = L/\sqrt{2}$ (L is the length of array diagonal and $\lambda = 4\mu\text{m}$ for light and single photons and 4pm for single matter particles). Horizontal and vertical axes are the cartesian components of \mathbf{r}_A . Axes units are μm for light waves and single photons, and pm for single matter particles.

Well cross-sections at $z \geq \lambda$ in (g), (l) exhibit the characteristic shape of diffraction patterns, that is main axial confinement zone surrounding by zones of lower confinement. However, an important feature is appreciated at very short distance from the mask, graphs (b), i.e. array discreteness. This confirms the notion that discreteness of individual space states is required for diffraction (Castañeda, 2017). Indeed, for $|a| < L < \lambda$, graphs on third column from left, geometric potential provides a smooth modulation for the excited state of space, i.e. the lateral zones disappear and the main axial confinement zone becomes wider, although array discreteness remains appreciable at very short distance from mask.

For $L \leq \lambda/10$, graphs in columns 4 and 5 from left, array discreteness is not appreciable even at $z = \lambda/10$ and complete excited state of space becomes identical to the base state of space with vertex at any of the nine pinholes, no matter that the pinhole array is under maximum prepared non-locality. The invariance of this behavior for array sizes $L \leq \lambda/10$ allows us generalizing the geometrical excitation uncertainty by this inequality. Specifically, it is completely uncertain that any set of individual states of space with vertices distributed on an area of size $L \leq \lambda/10$ is excited by a geometric potential, because the geometric state of space resulting from their overlapping is identical to the base state of space with vertex at any point in the distribution area. It is useful to assume the vertex position of complete space state at the array midpoint, even if this point is not the vertex of an individual geometric state of set.

The independence of this result from physical and statistical properties of light, single photons and single matter particles propagating in the interferometer leads to the following discussion, related to the use of diffraction as proof of Heisenberg's uncertainty principle (Feynman *et al.*, 1965; Matteucci *et al.*, 2010). Figures 4 and 5 show that angular spreading of the main axial confinement zone increases as the size of vertex array of individual excited states of space diminishes. By single matter particle interference, vertex array is considered a set of points for eventual particle crossings through the mask at M. So, in quantum mechanics context, vertex array size can be connected with particle position uncertainty at M. Furthermore, the angular spreading of far-field diffraction central maximum is connected with the uncertainty of the transversal component of the particle momentum. Thus, the inverse relationship between the array size and the central maximum angular spreading has been interpreted as a proof of Heisenberg's uncertainty principle, which formalizes a fundamental quantum attribute of particles. It is reasonable to propose such connections because, in each individual experimental realization, particle should enter only one of the individual states of space at its vertex, and propagates through the space state confined in any of its zones. So, by considering the particle arrival to the mask as a statistical event, the vertex array at M should constitute an area of particle position uncertainty, that could be interpreted as the position uncertainty for the particle at the mask. Furthermore, particle is free of propagating along any path, under the condition that the path remains contained within the main axial confinement zone of the excited state for diffraction. Paths can be distinguished by their transversal components, determined by momentum transversal component. Nevertheless, the specific path following by the particle on propagation is unknown, which means that transversal momentum component is uncertain.

Despite this compatibility between Heisenberg's principle and space states for diffraction, there are significant differences between them. It has been proved that the vertex array is specified by the setup configuration, the geometric potential is activated by the prepared non-locality at the mask and diffraction is determined by the vertex array size and spacing, independently of physical and statistical attributes of particles. All these features are formalized by deterministic parameters, that specify the spatial structure of the excited state of space, which in turn results in the setup as a consequence of vacuum fluctuations (Castañeda & Hurtado, 2023). In addition, the limit $L \leq \lambda/10$ of the set of excited states of space has been not considered in quantum mechanics, because its paraxial approach is unable to account for it. This limit seems to restrict the use of diffraction in connection with Heisenberg's principle, because for $L \leq \lambda/10$ the angular spreading of the well is maximal and remains fixed ($\sim 68.5^\circ$ for a decay in $\sim 95\%$ (Castañeda, 2017)), and the well cross-section remains Lorentzian.

Vertex position uncertainty

In absence of prepared non-locality, geometric potential is not activated so that $\langle \mathbf{r}_A | \hat{G}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle = 0$ and Eq. (1) reduces to the overlapping of base states of space, i.e.

$$|\psi(\mathbf{r}_A)|^2 = \int_M d^2 \xi_A \langle \mathbf{r}_A | \hat{R}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle = \left(\frac{k}{4\pi} \right)^2 \int_M d^2 \xi_A |\psi(\xi_A)|^2 |t(\xi_A)|^2 \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A|^2} \right)^2. \quad (10)$$

Equation (10) points out that base states of space cannot induce spatially modulations on them. Moreover, at long enough distance from M, the cross-section geometry of overlapped base states equals the geometry of the cross-section of an individual base state, independently of the number of overlapped base states and the distribution of their vertices at M. It is illustrated in **figure 6** for two base states and generalized in **figure 8** by considering an array of 3x3 base states. So, the connection between diffraction and Heisenberg’s principle seems to be feasible by providing $\kappa(\xi_+, \xi_-) \neq 0$, $L > \lambda$ and $|\mathbf{a}| < \lambda$. For $\kappa(\xi_+, \xi_-) = 0$, the angular spreading of far-field diffraction is maximal, i.e. identical to the Lorentzian well of a base space. Indeed, **figure 6** shows the excellent fit, at $z = 10\lambda$, between the cross-section profile of the overlapped base states of space and the individual base state with vertex at the midpoint between the mask pinholes.

Figures 6, 7 show a further feature of geometric uncertainty, involved in Eq. (10). **figure 6** points out that, for each pinhole separation, there is a finite distance z_0 so that the two base states can be distinguished for $z \leq z_0$. In addition, $z_0 \rightarrow 0$ as $|\mathbf{a}| \rightarrow 0$. Therefore, it should be interesting to analyze the distinguishability related to the excitation uncertainty $|\mathbf{a}| < \lambda/10$.

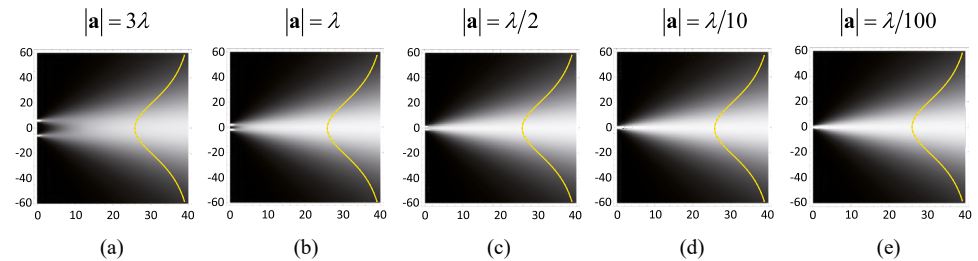


Figure 6. Axial sections of the overlapping of base states of space in Young interference, for different pinhole separations $|\mathbf{a}|$. Vertical profiles compare, at $z = 10\lambda$, the cross-sections of the overlapped wells (solid line) with the Lorentzian cross-section of the base state of space with vertex at the midpoint between the mask pinholes (dotted line). The overlapped state of space becomes identical to the base state for $|\mathbf{a}| \leq \lambda/10$. Graph axes and units are the same as in **figure 2**.

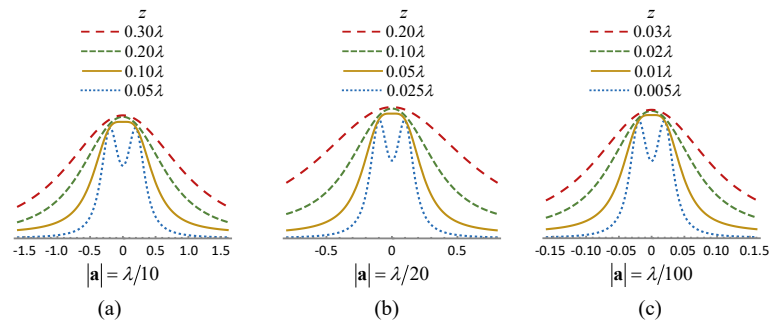


Figure 7. Cross-section profiles at different distances z , of the overlapping of base states in Young interference, for different pinhole separations $|\mathbf{a}| \leq \lambda/10$. In all cases, solid line profile with flat maximum is corresponding to $z = |\mathbf{a}|$. For $z < |\mathbf{a}|$ the profiles exhibit two distinguishable maxima, corresponding to each base state. For $z > |\mathbf{a}|$ the profiles become Lorentzian, so that the two base states are not distinguishable.

Cross-section profiles in **figure 7** describe the overlapping of two base states of space along a very short distance from mask, $z \leq 0.3 \lambda$, for pinhole separations $|\mathbf{a}| \leq \lambda/10$. They suggest to consider $z = |\mathbf{a}|$ as limit distance for base state distinguishability. Profile at this limit distance exhibits a flat maximum, which evolve to two maxima along $z < |\mathbf{a}|$ corresponding to distinguishable base states, and to only one acute maximum along $z > |\mathbf{a}|$, so that the two base states become undistinguishable to each other, and the overlapped state exhibits the same geometry as the individual base state with vertex at the midpoint between the pinholes.

This geometrical non-distinguishability can be interpreted as base state vertex position uncertainty, because the Lorentzian wells of all the base states with vertices in the area of radius $r = \lambda/10$ centered at a given point are identical to the Lorentzian well of the individual base state with vertex at the center for $z \geq \lambda/10$. In other words, the Lorentzian well remains invariant no matter the position of its vertex in such area, and therefore, its vertex position is completely uncertain within such area. As a consequence, single particles that arrive to any point within the uncertainty area become confined in the base state with vertex at the area center, no matter the statistics of the particle arrivals.

The analysis above can be generalized to any set of base states of space, with an arbitrary distribution of vertices of size L in the mask. So, if $L \leq \lambda/10$ then all the base states of space are represented by the individual Lorentzian well with vertex at the midpoint of the array. It is illustrated in **figure 8** for an array of 3x3 vertices at M. Graph (d) is the cross-

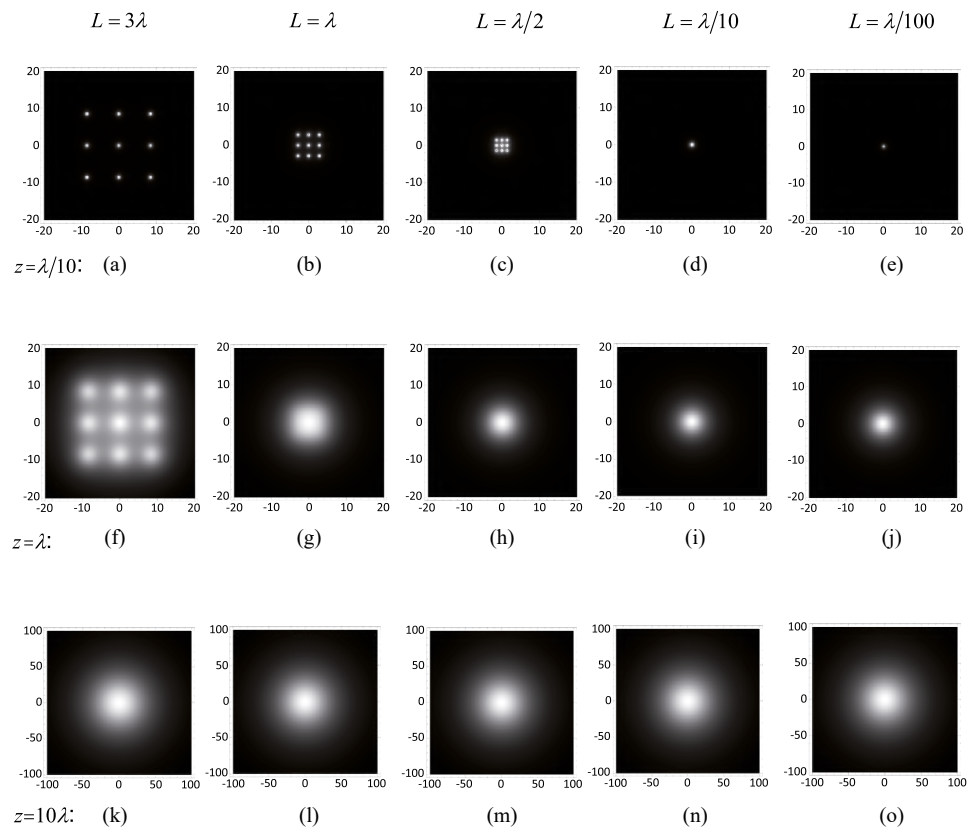


Figure 8. Cross-sections at different distances z of the overlapping of Lorentzian wells with vertices at the 3x3 pinhole array of a mask placed at M. Array vertical and horizontal spacing is $|\mathbf{a}| = L/2\sqrt{2}$ (L is the length of the array diagonal and $\lambda = 4\mu\text{m}$ for light and single photons and 4pm for single matter particles). Horizontal and vertical axes are the cartesian components of \mathbf{r}_A . Axes units are μm for light waves and single photons, and pm for single matter particles.

section at the distinguishability limit $z = L = \lambda/10$, so that the 3x3 array is distinguishable in (a)-(c) and remains undistinguishable in (e). Graphs on bottom row, $z = 10\lambda$, show that cross-sections of all the arrays are identical to the Lorentzian cross-section of the individual base state with vertex at the array midpoint. Graphs on columns for $L \leq \lambda/10$ indicate that Lorentzian well of overlapped state of space remains identical to Lorentzian well of this individual base state along $z \geq \lambda/10$.

It is worth clarifying the difference between vertex position uncertainty and resolution limit. The term resolution limit refers to quantitative descriptors of the ability of an optical system (mainly imaging and spectroscopy systems) to distinguish fine details (**Born & Wolf**, 1993). Therefore, resolution limit is a characteristic of optical system performance. Geometric uncertainty refers to a property of the states of ordinary space, described by the quantitative limit $L \leq \lambda/10$, with L the size of state vertex array. If this condition is satisfied, then the complete array behaves as an individual base state, whose vertex can be placed in any of the array points, even at the center of the array no matter that this point is not the vertex of a space state of the array, and no matter the prepared no-locality on the mask plane. So, both the excitation provided by the geometric potential and the vertex position of the space state are completely uncertain, although the vertices of the array can be resolved for $z < \lambda/10$, as illustrated by profiles in **figure 7**.

An interesting connection between Heisenberg's principle and geometric uncertainty can be appreciated by considering $\Delta x = \lambda/10$, with Δx Heisenberg's position uncertainty. Therefore, Heisenberg's principle leads to $\Delta p \geq \frac{\hbar}{2\Delta x}$, i.e. $\Delta p \geq \frac{5\hbar}{2\lambda}$ and, by using de Broglie's formula $p = h/\lambda$ (**Feynman et al.**, 1965), it gives $\Delta p \geq 0.7958p$ for Heisenberg's momentum uncertainty. By considering the particle confinement in the base state of space due to the Heisenberg's position uncertainty, and assuming the particle enters the base state with the momentum parallel to the Lorentzian well axis, then Δp should be contained in the angular spreading of the base state. It means $\Delta p = p \sin 68.5^\circ = 0.9304p$, which is compatible with Heisenberg's principle. Nevertheless, this result has a further meaning, not implied by Heisenberg's principle, i.e. it seems to establish an upper limit for Δp due to the geometry of the Lorentzian well of base state of space. In addition, the position uncertainty $\Delta x = \lambda/10$ cannot be reduced by using smaller openings because arrays of points with sizes $L \leq \lambda/10$ are associated to a unique base state of space with a fixed Lorentzian geometry. Thus, $\lambda/10$ seems to be the lower limit for Δx . Such extreme limits for the notion of uncertainty due to the geometrical properties of states of space are proposed for the first time in this paper.

Conclusion

The notion of geometric uncertainty has been discussed in the framework of the non-paraxial interference theory based on confinement in geometric states of space. This notion refers to two important features of any set of excited states of space, whose vertices distribute in an arbitrary array of size L , and is formalized by the condition $L \leq \lambda/10$. If this condition is fulfilled, then both the excitation provided by the geometric potential and the vertex position of the states become completely uncertain, i.e. the set of states (i) are not spatially modulated, even under maximal prepared non-locality, and (ii) are represented by the Lorentzian well of an individual base state of space with vertex at any point of the array (it is useful to assume the vertex of this well at the midpoint of the array, even if this point is not a vertex of any state of the set). Geometric uncertainty is different but compatible with Heisenberg's uncertainty principle. In fact, it establishes both the upper limit for Heisenberg's momentum uncertainty and the lower limit for Heisenberg's position uncertainty. It should be mentioned that the limit $\lambda/10$ is a criterion established by numerically comparing the geometries of the base state and the excited states of ordinary space. Descriptors like the rms-value for cross-section comparison at $z \geq \lambda/2$ support this limit with a precision of order 95%.

Conflicts of interest

Author declares no conflicts of interest.

Data availability

No data were generated or analyzed in the presented research.

Funding Statement

This work was carried out under research program Semillero 2241 - Ciencia de la Luz of Universidad Nacional de Colombia.

References

- Ballentine L.** (2014). *Quantum Mechanics: A Modern Development*, 2nd ed. World Scientific.
- Born, M., Wolf, E.** (1993). *Principles of Optics* 6th ed. Oxford: Pergamon Press.
- Busch, P., Lahti, P., Werner, R.F.** (2013). Proof of Heisenberg's Error-Disturbance Relation. *Physical Review Letters*, *111*, 160405.
- Castañeda, R., Hurtado, C.** (2023). Vacuum fluctuations in single photon interference. Submitted to *Journal Mod. Opt.*
- Castañeda, R., Bedoya, P., Hurtado, C.** (2023). Quantum formalism of interference as confinement in spatially structured Lorentzian wells. *Journal of Physics. A: Mathematical and Theoretical*, *56*, 045302. <https://doi.org/10.1088/1751-8121/acb6c6>
- Castañeda, R., Bedoya, P., Matteucci, G.** (2021). Non-locality and geometric potential provide the phenomenology of the double-hole single massive particle and light interference. *Physica Scripta*, *96*, 125036. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac3ea5>
- Castañeda, R.** (2017). Discreteness of the real point emitters as a physical condition for diffraction. *Journal of the Optical Society of America A*, *34*, 184-192. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.34.000184>
- Erhart, J., Sponar, S., Sulyok, G., Badurek, G., Ozawa, M., Hasegawa, Y.** (2012). Experimental Demonstration of a Universally Valid Error-Disturbance Uncertainty Relation in Spin Measurements. *Nature Physics*, *8*, 185-189. <http://dx.doi.org/10.1038/nphys2194>
- Feynman, R., Leighton R., Sands, M.** (1965). *The Feynman Lectures on Physics* vol 3. Menlo Park: Addison-Wesley.
- Matteucci, G., Ferrari, L., Migliori, A.** (2010). The Heisenberg uncertainty principle demonstrated with an electron diffraction experiment. *European Journal of Physics*, *31*, 1287-1293. <http://iopscience.iop.org/0143-0807/31/5/027>
- Ozawa, M.** (2003). Universally valid reformulation of the Heisenberg uncertainty principle on noise and disturbance in measurement. *Physical Review A*, *67*, 042105.
- Rozema, L.A., Darabi, A., Mahler, D.H., Hayat, A., Soudagar, Y., Steinberg A.M.** (2012). Violation of Heisenberg's Measurement-Disturbance Relationship by Weak Measurements. *Physical Review Letters*, *109*, 100404.
- Rozema, L.A., Mahler, D.H., Hayat, A., Steinberg, A.M.** (2013). A Note on Different Definitions of Momentum Disturbance. *arXiv:1307.3604*.

Original article

Influence of the temperature on the band-gap energy of reduced graphene-oxide nanoplatelets described with the Varshni model

Influencia de la temperatura en la brecha energética de nanoplaquetas de óxido de grafeno reducido según el modelo de Varshni

✉ John Jairo Prías-Barragán

Programa de Doctorado en Ciencias Física, Programa de Tecnología en Instrumentación Electrónica, Instituto Interdisciplinario de las Ciencias, Universidad del Quindío, Colombia

Inaugural article as Correspondent Member of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences

Abstract

The present study estimated the influence of temperature on the band-gap energy in reduced graphene oxide (rGO) nanoplatelets obtained from bamboo. Individual rGO nanoplatelets were synthesized via double thermal decomposition (DTD) in a pyrolysis system under a controlled nitrogen atmosphere and carbonization temperature fixed at $T_{CA} = 973$ K. For the electrical characterization of individual rGO nanoplatelets, the I-V curves method was used at four electrical contacts of Pt nano-wires grown by focused electron-ion beam induced deposition (FEBID) system. The influence of temperature on the band-gap energy ($E_g(T)$) was estimated via electrical resistivity measurements taken at different temperatures varying from 30 to 290 K. As regards the electrical properties, the rGO samples exhibited an electrical response at room temperature, acting as a narrow band-gap semiconductor with a band-gap energy value of 0.11 eV and an electrical response at low temperature described mainly by the Mott 3-dimensional variable range hopping (VRH-3D) model. The $E_g(T)$ dependence was analyzed considering the Varshni, Bose-Einstein, Magnoogian-Wooley, Viña, *et al.*, and Päsler phenomenological models. The Varshni model adequately described the $E_g(T)$ behavior with extrapolated $E_g(T = 0$ K) value at 0.292 eV and Varshni parameters at $\alpha = 6.70 \times 10^{-4}$ eV/K and $\beta = 33.62$ K. These values agree with the known order of magnitude of the Varshni coefficients reported for other narrow band-gap semiconductors such as InAs and InSb. Hydroxyl bridges on rGO were found modifying carbon-carbon bond length and controlling electrical responses, as previously reported when employing first-principle calculations via the density functional theory (DFT). These results suggest that individual rGO nanoplatelets can be excellent materials for developing advanced electronics for sensors and devices.

Keywords: Reduced graphene oxide; Nanoplatelets; Band-gap energy; HR-TEM.

Resumen

Se estimó la dependencia de la temperatura con la energía de banda prohibida ($E_g(T)$) en nanoplaquetas individuales de grafeno oxidado reducido (rGO) obtenidas de bambú. Las rGO se sintetizaron mediante el método de la doble descomposición térmica en un sistema de pirólisis, bajo una atmósfera de nitrógeno controlada y temperatura de carbonización fija en $T_{CA} = 973$ K. Para la caracterización eléctrica de las rGO se empleó el método de curvas I-V en cuatro contactos eléctricos con nanocables de Pt depositados mediante el sistema de deposición inducida por haces enfocados de electrones e iones. La $E_g(T)$ se estimó usando medidas de resistividad eléctrica tomadas a temperaturas que variaban entre los 30 y los 290 K. Las rGO exhibieron una $E_g(T)$ descrita principalmente por el modelo de Mott de salto de rango variable tridimensional (VRH-3D). La $E_g(T)$ se analizó considerando los modelos fenomenológicos de Varshni, Bose-Einstein, Magnoogian-Wooley, Viña, *et al.*, y Päsler. Se encontró que el modelo de Varshni describía adecuadamente el comportamiento experimental de la $E_g(T)$, con el valor de $E_g(T = 0$ K) extrapolado a 0,292 eV y los parámetros de

Citation: Prías-Barragán JJ. Influence of the temperature on the band-gap energy of reduced graphene-oxide nanoplatelets described with the Varshni model. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185):807-821, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2008>

Editor: Gabriel Téllez Acosta

Corresponding autor:

Jhon Jairo Prías-Barragán;
jjprias@uniquindio.edu.co

Received: September 12, 2023

Accepted: November 30, 2023

Published on line: December 14, 2023



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

Varshni de $\alpha = 6,70 \times 10^{-4}$ eV/K y $\beta = 33,62$ K. Estos valores concuerdan con el orden de magnitud de los coeficientes de Varshni reportados para otros semiconductores de banda prohibida estrecha como el InAs y el InSb. Asimismo, se encontró que la presencia de puentes de hidroxilo en la rGO modificaba la longitud de los enlaces carbono-carbono, lo cual domina la respuesta eléctrica, como se preveía y ha sido reportado previamente al emplear cálculos de primeros principios vía la teoría del funcional de la densidad (DFT). Estos resultados sugieren que las rGO pueden ser excelentes materiales para el desarrollo de la electrónica avanzada de sensores y dispositivos.

Palabras claves: Grafeno oxidado reducido; Nanoplaquetas; Energía de banda prohibida; HR-TEM.

Introduction

In recent years, the interest in rGO has grown, given the relevance of graphene and graphene oxide for science and technological applications (**Geim & Novoselov**, 2007; **Novoselov et al.**, 2005; **Novoselov et al.**, 2004; **Jiang et al.**, 2014). Graphite oxide (GO) has received attention for its use as a source of graphene oxide by exfoliation techniques. Reduced graphene oxide has surface properties and a layered structure that makes it a versatile material for applications (**Jiang et al.**, 2014; **Sachdeva et al.**, 2020; **Kigozi et al.**, 2020; **Benevides et al.**, 2020; **Fenfen et al.**, 2020; **Wang et al.**, 2020; **Faiz et al.**, 2020; **Mizoguchi et al.**, 2020; **Abbas et al.**, 2020; **Naser et al.**, 2020; **Newman et al.**, 2020). The physicochemical properties of GO can be modified and functionalized by tuning its oxide composition and crystal structure. With an oxide coverage of $< 10\%$, it is possible to obtain rGO. Reduced GO platelets can be obtained as micro-platelets and nanoplatelets decorated mainly with multifunctional groups, i.e., hydroxyl bridges and epoxy groups that can dominate the physical transport properties on rGO given that oxides get the out-plane carbon atoms from the basal graphene plane, inducing defects and imperfections on its surface that dominate rGO nature (**Geng et al.**, 2009; **Hoyos-Ariza et al.**, 2023). Transport properties can be influenced in these platelets can be influenced by the multilayered configuration, and the π -bond delocalization can produce van der Waals forces between the induced electric dipoles (**Rozploch et al.**, 2007) and the defects (**He et al.**, 2011). All these effects can be profited in advanced thermo-electrical, electronic, magnetic, optical, photomechanical, and electro-optical devices and sensors (**Tang et al.**, 2008). GO platelets can be used in batteries (**Kim et al.**, 2012; **Prusty & Swain**, 2012; **Matsuo & Ueda**, 2014; **Zou et al.**, 2015), electrical energy storage (**Lobato et al.**, 2014; **Singh & Chandra**, 2013), advanced electronic sensors and devices (**Ghosh et al.**, 2014; **Wei et al.**, 2009; **Zhang et al.**, 2012; **Llatser et al.**, 2012; **Mishra & Ramaprabhu**, 2012; **Grande et al.**, 2012; **Sangwan et al.**, 2011; **He & Tjong**, 2013), catalysis (**Geng et al.**, 2014), metal sorption (**Petit & Badosz**, 2015), hydrogen storage (**Xue et al.**, 2014), carbon dioxide sorption (**Arango-Hoyos et al.**, 2023), and to obtain graphene oxide (**Liu et al.**, 2015; **Jia et al.**, 2014; **Kyzas et al.**, 2014; **Tang et al.**, 2012).

Graphite oxide and rGO can be obtained by the traditional methods of Brodies (**Jia et al.**, 2014), Hummers (**Kyzas et al.**, 2014), or Tang Lau (**Tang et al.**, 2012) or by their modified versions.

However, these methods yield only micron-sized graphene flakes, require strong oxides (Brodie and Hummer methods) or glucose (Tang Lau method), and are time consuming. Although they are excellent for basic research, the GO obtained with these methods decomposes at temperatures between 553 and 573 K, becoming amorphous carbon and losing many oxides. The thermal decomposition method employing a pyrolysis system is a low-cost and eco-friendly alternative to synthesize graphene oxide multilayers such as the nanoplatelets from bamboo using pyrolytic acid (BPA) as source material at higher temperatures: from 573 to 973 K, which differs from the traditional methods as previously reported by **Prías-Barragán et al.** (2015-2022). The composition, stage structure, defects, and graphitization degree of rGO depend on the carbonization temperature (TCA): higher temperatures promote the elimination of organic compounds and oxygen functional groups leading to the improvement of the crystal structure with a positive impact on the thermal,

electrical, and magnetic transport (**Kuzemsky**, 2013; **Rao**, 2012; **Makarova et al.**, 2011; **Virendra et al.**, 2011; **Gross et al.**, 2016). TCA at 973 K in the DTD method leads to a reduction of oxygen contents to 5.3% and an increase in electrical conductivity of nearly two orders of magnitude as evidenced by preliminary electrical measurements performed on individual nanoplatelets (**Prías-Barragán et al.**, 2022; **Gross et al.**, 2016). The thermal conductivity of rGO platelets is also expected to reduce when oxygen contents decrease, as reported in graphene oxide (**Gross et al.**, 2016; **Mu et al.**, 2014), which may be convenient for electronic applications. Electrical conductivity and oxygen concentration are strongly correlated in rGO; it has been shown that by increasing the rGO reduction level, *i.e.*, by restoring sp^2 hybridization, room temperature conductivity tends to increase (**Geng et al.**, 2009; **He et al.**, 2011; **Tang et al.**, 2008; **Petit & Badosz**, 2015; **Gross et al.**, 2016). Electrical conduction in rGO is mainly due to sp^2 hybridization resulting from delocalized electrons (π orbital) moving freely throughout the graphite structure. Oxygenized areas containing high amounts of carbon domains show hybridized sp^3 that behaves as an insulator. The electrical charge transport mechanism in a landscape of coexisting sp^2/sp^3 regions is akin to that of disordered semiconductors where electron localization and hopping conduction play a significant role. As they depend on oxygen contents, rGO-based materials undergo insulator-semiconductor-semimetal transitions with the reduction. Studies where the sp^2 fraction varies have shown that diverse types of conduction mechanisms occur depending on whether the rGO sheet is slightly or highly reduced (**Xue et al.**, 2014; **Liu et al.**, 2015; **Gross et al.**, 2016).

Regarding the temperature dependence of the electrical conductivity in rGO exhibiting semiconductor-like transport behavior, there are different conduction mechanisms (**Novoselov et al.**, 2004; **Jiang et al.**, 2014; **Rozploch et al.**, 2007). Other authors (**Xue et al.**, 2014; **Gross et al.**, 2016) found that while at a higher temperature regime of well-rGO, thermally excited carriers dominate the conduction, the low-temperature regime has to be described through the Mott variable range hopping (VRH) model. The temperature-dependent longitudinal conductivity described by the VRH model is well-known in all the dimensionalities described in the system (**Gross et al.**, 2016). Thus, the dimensionalities correspond to the Mott VRH conduction mechanism proposed respectively for 2D and 3D systems, without considering the Coulomb interaction. When there is a Coulomb interaction between initial and final hopping sites, Efros and Shklovskii proposed the unidimensional case for the long-range hole-electron interaction at the Fermi level (**Gross et al.**, 2016). Finally, the zero-dimensionality case corresponds to the Arrhenius type for thermal-activated conduction mechanisms. It is worth mentioning that the first three possibilities have also served to analyze charge transport mechanisms in non-crystalline materials (**Gross et al.**, 2016). However, the basic description of the temperature dependence of the energy band gap is an open research question, as suggested by possible rGO applications in temperature sensors (**Árias-Niquepa et al.**, 2019).

Considering rGO nanoplatelets as a narrow band-gap semiconductor (**Prías-Barragán et al.**, 2015-2022; **Gross et al.**, 2016), various models have been proposed to describe the temperature dependence of the band-gap energy in rGO (**Varshni**, 1967; **O'Donnell & Chen**, 1991; **Krystek et al.**, 1995; **Rui et al.**, 2011; **Viña et al.**, 1984; **Pässler**, 1997). In this sense, the present study aims to determine the best model to elucidate temperature dependence of the band-gap energy in rGO nanoplatelet samples. Its results may help further understand the systematic transport mechanism and electrical properties of graphene oxide multilayers as nanoplatelets and their impact on advanced electronic sensors and devices.

Methods

The rGO nanoplatelet samples were synthesized using the double thermal decomposition (DTD) method from bamboo pyrolygneous acid or tar (BPA) in a pyrolysis system under controlled temperature and nitrogen atmosphere at 973 K with a carbonization temperature (TCA), a 5.3% rGO value as oxides coverage estimated using XPS and EDAX measurements, as reported before (**Prías-Barragán et al.**, 2018).

The BPA was obtained from bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth, macana biotype) through an initial pyrolysis process at 973 K and collected in a decanting funnel glass where the bamboo tar was easily decanted and separated. Then, the BPA bamboo tar was used as source material for rGO at 973 K. The waste product of the commercial bamboo-*Guadua angustifolia* Kunth was disposed of according to the relevant regulations.

At TCA = 973 K, the thermal decomposition of the aromatic structure of the phenol compounds in the bamboo tar forms carbon structures (Gross *et al.*, 2016); when the BPA or tar carbonization process is completed, carbon foam is obtained and subsequently turned into platelet powders by mechanical grinding with a ceramic hand mortar. The carbonization yield of the rGO sample was around 18%, measured as the quotient between the rGO sample weight after the carbonization process and the pyroligneous acid weight before carbonization. For an overview of these processes and other experimental details, see Prías-Barragán *et al.* (2015-2022).

For the electrical measurement of individual nanoplatelets, the samples were prepared by suspending rGO in isopropanol and then depositing them in the proximity of the metallic contact pads (fabricated firstly by optical lithography) on a SiO₂/Si substrate. Individual nanoplatelets were then located at low voltages (<5 kV) using an SEM system with a focused ion beam (FIB) (Helios 650 model by FEI). The focused ion beam-induced deposition (FIBID) technique was used to deposit four Pt lead wires to connect the nanoplatelets to the metallic contact pads where the micro-probes were positioned. The Pt-based contacts deposited optimally by FIBID allowed low contact resistivity to perform noise-free electrical characterization of micro- or nanostructures (Gross *et al.*, 2016; Kajen *et al.*, 2013; Mineo *et al.*, 2013). For additional details on this technique, see Gross *et al.* (2016).

The SEM images of the experimental setup displaying the microprobes, the metallic contact pads, and the Pt wires on individual rGO nanoplatelets as reported (Gross *et al.*, 2016). For the electrical measurements, current in a range of $\pm 6 \mu\text{A}$ was injected on the two external contacts using a Keithley 6220 DC current source, while the voltage was measured at the two internal contacts with a Keithley 2182 A nanovoltmeter. Temperature-dependent measurements of the resistance were registered inside a vacuum chamber using a closed-cycle Helium cryostat system.

The Raman measurements were registered with a Horiba Jobin Yvon micro-Raman spectrometer, model Labram HR. All spectra were collected in the backscattering configuration and excited with visible laser light at 532 nm wavelength. The spectra were recorded with a 600 line/mm grating. A 50 X objective was used to focus the excitation laser light on the right spot of the GO samples. The sample temperature was controlled using a cold-hot cell operated with a liquid nitrogen source in a Linkam accessory. Precautions were taken to avoid local heating of the samples by the excitation laser, so all measurements were performed at low excitation power. The power on top of the cold-hot cell window was below 4.8 mW (correspondingly, much smaller on the sample surface). The estimated accuracy of the cell temperature control was around 0.1 °C. All spectra were obtained under the same conditions from 1000 to 4000 cm⁻¹. X-ray diffraction patterns were obtained using a Panalytical Systems diffractometer with Cu K α radiation ($\alpha = 1.542 \text{ \AA}$).

The morphological and compositional characteristics of rGO nanoplatelets were examined using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) with a Phenom G2 Pro Microscopy field-emitting scanning electron microscope. Transmission electron microscopy (TEM) and high-resolution (HR)-TEM images were obtained with a Tecnai F20 Super Twin TMP on an FEI microscope operating at 80 kV and equipped with a Cs image corrector and a Gatan Tridiem spectrometer. The oxide coverage composition of GO nanoplatelet samples was measured using the XPS technique in an XPS Spectrometer Kratos AXIS Supra system considering an X-ray Source Mono Al K α 225 W (15 mA/15 kV), low pressure of 10⁻⁹ Torr, analysis of an initial area of 700 × 300 μm^2 , and a depth profile at 110 μm of diameter, a pass energy/step width of

160 eV/1000 meV at regions of 20 eV/100 meV (200 meV in CKLL), an ion milling at GCIB 2.5 keV Ar 500+, and a charge neutralizer. Relative hybridizations (sp² and sp³) were determined from the carbon Auger signal at CKLL contributions.

Theory

The band-gap energy can depend on temperature, which can describe different phenomenological models for $E_g(T)$. Some expressions for $E_g(T)$ are the Varshni, Bose-Einstein, Magnoogian-Wooley, Viña, and Pässler models. The Varshni empirical expression describes temperature dependence on the band-gap energy in semiconductors (Varshni, 1967; O'Donnell & Chen, 1991; Krystek *et al.*, 1995; Chen *et al.*, 2011; Viña *et al.*, 1984; Pässler, 1997):

$$E_g(T) = E_g(0) - \left(\frac{\alpha T^2}{T + \beta} \right) \quad (1),$$

where $E_g(0)$ is the extrapolated band-gap energy value at zero temperature; α and β are fitting parameters characteristic of a given material (Varshni, 1967; O'Donnell & Chen, 1991; Krystek *et al.*, 1995; Chen *et al.*, 2011; Viña *et al.*, 1984; Pässler, 1997). This model considers the temperature effect on the band-gap energy, but the Varshni coefficients offer a few physics descriptions of the carriers or exciton interactions involved in some semiconductors whereby the Bose-Einstein model considers these effects in $E_g(T)$.

The Bose-Einstein model obtained from considering the 3N oscillator theory of the specific heat problem considers the free charge carriers or exciton interactions with the phonon average participant, and it has the following functional form (O'Donnell & Chen, 1991):

$$E_g(T) = E_g(0) - \left(\frac{2a_B}{\exp\left(\frac{\theta_B}{T}\right) - 1} \right) \quad (2),$$

where $E_g(0)$ is the extrapolated band-gap energy value at zero temperature; a_B and θ_B are the fitting parameters characteristic of a given material related to the coupling strength between the charge carrier and the excitons and the average characteristic temperature of the phonon participant (optical or acoustic phonon), respectively. This model does not consider the lattice dilation contribution in $E_g(T)$ whereby the Magnoogian-Wooley model appears.

The Magnoogian-Wooley expression considers the effect of thermal expansion and electron-phonon interaction in the band-gap energy, and it is given by (Krystek *et al.*, 1995):

$$E_g(T) = E_g(0) + UT^s + V\theta \left[\coth\left(\frac{\theta}{2T}\right) - 1 \right] \quad (3),$$

where the first term, $E_g(0)$, is the band-gap at $T = 0$ K; the second term represents the lattice dilation with U as the lattice dilation coefficient; s describes the average exciton-phonon coupling strength, and the third term is related to the electron-phonon interaction; V is the temperature-dependent shift in the band-gap, and θ is the temperature-related parameter. The fitting parameters U , s , and θ are independent of the temperature (Chan, 2011). As expression (3) has five fitting parameters, a similar model with lower fitting parameters was proposed in the Viña expression.

Viña *et al.* (1984) fitted data on the critical-point energies of germanium to the Varshni relation, pointing out that they can also fit these data to an expression where the energy thresholds decrease proportionally to the Bose-Einstein statistical factors for phonon emission plus absorption and proposing that:

$$E_g(T) = E_g(0) - b \left[1 + \frac{2}{\exp\left(\frac{\theta}{T}\right) - 1} \right] \quad (4),$$

where b is an energy factor related to the phonon emission plus absorption and θ is the temperature-related parameter. The term within the brackets in expression (4) readily reduces to $\coth(\theta/2T)$ so that equation (4) can be written in a form comparable to

expression (3). Equation (4) describes $E_g(T)$ in terms of the Bose-Einstein statistical factors for phonon emission plus absorption via exponential factor. Another interpretation of $E_g(T)$ in terms of the power law was proposed by the Pässler model (Pässler, 1997).

The Pässler expression has another focus regarding the temperature-dependent band-gap energy, $E_g(T)$, that resorts to the power law behavior for phononic contribution (Pässler, 1997):

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha_p \theta \left[\sqrt[p]{1 + \left(\frac{2T}{\theta}\right)^p} - 1 \right] \quad (5),$$

where $E_g(T)$ is the band-gap energy at 0 K; α_p is a factor that represents the strength of the phononic contribution; θ is the effective phonon temperature, and exponent p relates to the symmetry of the phononic contribution to the band-gap energy. In this section, the $E_g(T)$ different models were compared as given in expressions (1-5) describing the experimental data of temperature dependence on the band-gap energy in rGO samples.

Results and discussion

Figure 1 shows the morphology analysis in individual rGO nanoplatelets using HR-TEM. As shown in **Figure 1a** TEM of individual rGO nanoplatelets, there is a high electron transparency associated with lower thickness (~ 60 nm); the graphitic plate formations and high electron transparency are expected in graphite material. The thickness was 60 nm and the lateral dimensions were $10 \mu\text{m}$, which agree with the nanoplatelets dimensions in the ISO/TS 27687:2008 technical specifications (ISO Technical specification, 2008). The HR-TEM in **Figure 1b** shows local graphene formations, defects, and impurities of oxygen and hydrogen (sp^2 and sp^3) domains identified by EDS, FTIR, and EELS (Gross *et*

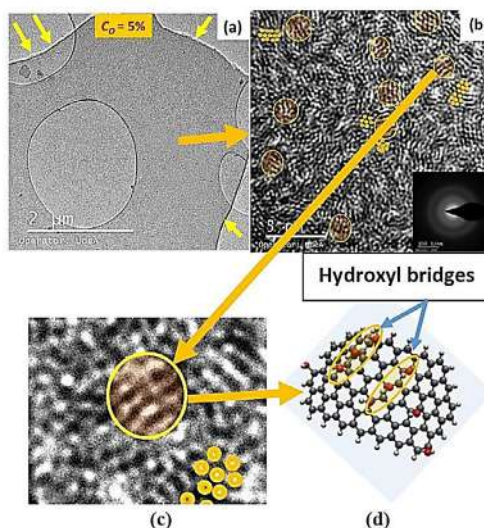


Figure 1. Morphology of individual rGO nanoplatelet: **(a)** TEM image of rGO nanoplatelet presents lateral dimensions and thickness of $10 \mu\text{m}$ and 60 nm, respectively. The TEM image shows graphitic plate-type formations (HR in white representing surface position used in high-resolution mode); the yellow arrows indicate the nanoplatelet border. **(b)** HR-TEM image shows the expected graphene formations on the surface of a single graphene oxide nanoplatelet. The inset of **(b)** corresponds to electron diffraction pattern results as diffuse rings revealing the polycrystalline structure of the rGO sample. **(c)** Negative zoom image from HR-TEM showing graphene formations, impurities, defects in patterns formed by the parallel lines associated with the presence of hydroxyl bridges (Prías-Barragán *et al.*, 2022; Hoyos-Ariza *et al.*, 2023) and the patterns presented in **Figure 1d**. **(d)** The structure of rGO simulated by first principle calculations via DFT shows atomic patterns of parallel lines, which can be attributed to hydroxyl bridges induced by hydrogen atom interactions with neighboring oxygen atoms.

et al., 2016) with a random distribution on the surface of the graphite oxide nanoplatelets and carbon-oxygen and carbon-hydrogen bonds, such as epoxy and hydroxyl bridges (Prías-Barragán *et al.*, 2022; Hoyos-Ariza *et al.*, 2023), that can make carbon atoms exit out-plane and generate local corrugation defects (local deformation of the graphene layers) of great interest in the study of the magnetic properties of carbon materials resulting from electron delocalization, as reported (Kuzemsky, 2013; Rao *et al.*, 2012; Makarova *et al.*, 2011; Virendra *et al.*, 2011; Gross *et al.*, 2016). The inset in figure 1b shows the electron diffraction pattern revealing the polycrystalline structure of the rGO sample as given by the diffuse rings observed experimentally.

Figure 1c shows a negative zoom image of graphene formations related to the rGO structure simulated computationally, as shown in figure 1d, with the hydroxyl bridge forming parallel lines as large-scale patterns, possibly due to hydrogen atoms interactions with oxygen atoms (Prías-Barragán *et al.*, 2022; Hoyos-Ariza *et al.*, 2023) using first principle calculations via the density functional theory. This computational simulation of the rGO structure exhibits the same band-gap energy value as the experimental one measured here in an individual rGO nanoplatelet sample (Hoyos-Ariza *et al.*, 2023). Local corrugation defects in the rGO structure are observed; this behavior can be attributed to the hydroxyl bridge in the C-OH groups (Figure 1d) corroborated by EDAX, FTIR spectra, and XRD results previously reported (Prías-Barragán *et al.*, 2016-2022).

In figure 2a, the geometric structural dimensions in graphite and rGO samples are compared as determined via X-ray diffraction spectra analysis; in rGO samples, the presence of multifunctional oxide increases the geometric dimensions in rGO structures, as expected. Previously, we reported an rGO sample (TCA = 973 K) with a sp² domain (O-H and C-O-C groups) at around 66% and a sp³ domain (C-H group) at 34% as determined by EELS (Gross *et al.*, 2016). Figure 2b shows the typical Raman spectra of rGO samples (Prías-Barragán *et al.*, 2016).

In figure 2b, the Raman spectra analyses were carried out using a theoretical fitting with six Lorentzian function contributions associated with a G-band peak at 1550 cm⁻¹ (from 1550 to 1580 cm⁻¹), indicating the formation of a graphitized structure by the vibration of sp² bonded carbon atoms, a D-band peak of around 1330 cm⁻¹ (from 1330 to 1360 cm⁻¹) corresponding to the disorder-induced phonon mode by defect presence

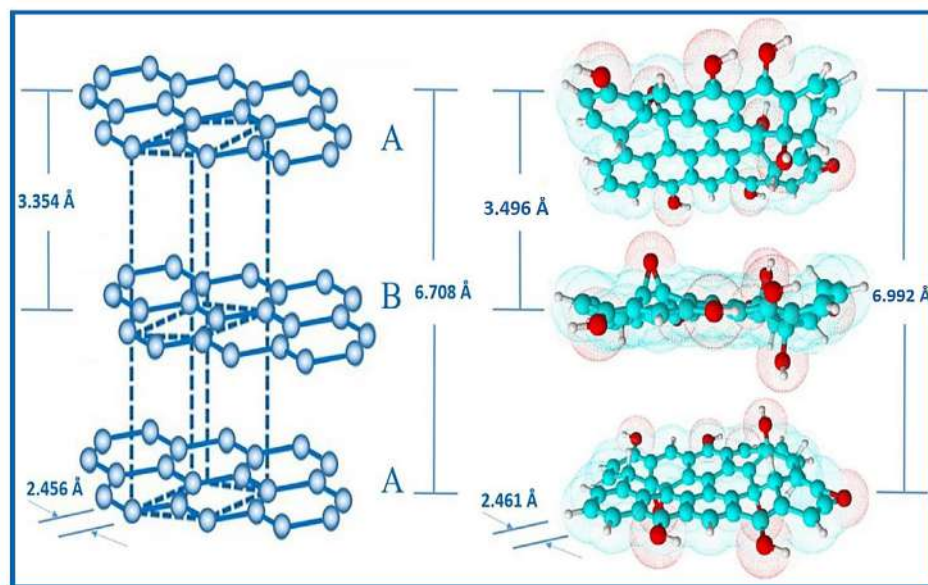


Figure 2. (a) Comparisons of geometric dimensions in graphite and rGO structures determined via XRD results analysis. (b) Typical Raman spectra in rGO sample

related to the elastic scattering due to structural defects such as grain boundaries, oxides, and sp^3 defects (C-O-C, C-OH, and C-H, respectively), and a D' band peak at 1593 cm^{-1} (from 1593 to 1620 cm^{-1}) due to the Raman inelastic scattering caused by the absorption or emission of phonons confined in defects, which can produce expansion and contraction of graphene oxide layers. The 2D, D+G, and 2D' band peaks at around 2697 , 2900 , and 3110 cm^{-1} , respectively, suggest that the stacking presence of many graphene layers with edges, defects, and sp^2 regions are prevalent features of rGO (Kajen *et al.*, 2013; Mineo *et al.*, 2013; Qiao *et al.*, 2005; Hyo *et al.*, 2014; Gregory *et al.*, 2014; Sánchez-Trujillo, 2023).

Figures 3a and b show the XPS spectra deconvolution analysis in an individual rGO nanoplatelet synthesized at 973 K carbonization temperature. It should be noted (Figure 3a) that the XPS spectra of high resolution in rGO nanoplatelets, exhibits oxidation presence and correspond to O1s, as expected, revealing the formation of hydroxyl groups, epoxy groups, and H_2O at 531.4 ± 0.2 , 532.3 ± 0.4 , and $535.9 \pm 0.5\text{ eV}$, respectively (Prías-Barragán *et al.*, 2022). Figure 3b corresponds to C1s and reveals the presence of C sp^2 , C sp^3 , hydroxyl groups, and C=O groups at 283.6 ± 0.1 , 284.9 ± 0.3 , 287.3 ± 0.4 , and $289.7 \pm 0.5\text{ eV}$, respectively, in the rGO sample. These values agree with previous works (Hoyos-Ariza *et al.*, 2023).

Figure 4a shows the SEM image of the individual rGO nanoplatelet electrically contacted by Ag nanowires deposited by the FEBID/FIBID technique and its geometric dimensions. These electrical connections allowed for measuring the temperature dependence with

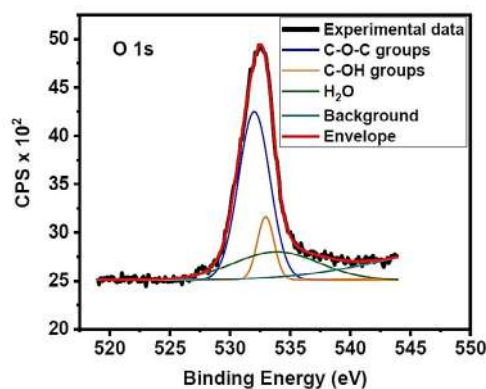


Figure 3. High resolution of XPS spectra in rGO nanoplatelet samples with 5.3% oxide coverage at (a) O1s high- and (b) low-binding C1s energies

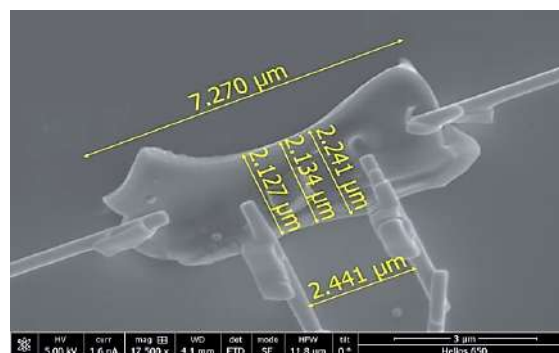


Figure 4. (a) SEM image of an individual rGO nanoplatelet electrically contacted by employing Ag nanowires with 300 nm thickness and the respective geometric dimensions. (b) Temperature dependence with the electrical resistivity in an individual rGO nanoplatelet, as shown in figure 4a. The inset in figure 4b shows the best fitting employing VRH-3D description.

the electrical resistivity in an individual rGO nanoplatelet (**Figure 4b**). The temperature decreased from 290 to 20 K, and the electrical resistivity increased from 0.001 to 0.0085 Ohm per meter, as in semiconductor materials. The inset in **figure 4b** shows the respective fitting description of the experimental data using the VRH-3D model (**Gross et al.**, 2016).

The inset in **figure 4b** plots $\ln(\sigma T^{1/2})$ as a function of $T^{-1/4}$ within 25 - 300 K, along with a best-fit line from the VRH-3D model. These results suggest that the charge transport in rGO is dominated by the Mott three-dimensional VRH transport behavior (**Gross et al.**, 2016; **Sánchez-Trujillo et al.**, 2023). In this case, the temperature dependence on conductivity can be expressed as in (6) (**Gross et al.**, 2016):

$$\sigma(T) = \frac{\sigma_o}{T^{1/2}} \exp \left[- \left(\frac{T_o}{T} \right)^{1/4} \right] \quad (6),$$

where σ_o and T_o are given by:

$$\sigma_o = \frac{3e^2 v_{ph}}{(8\pi)^{1/2}} \left[- \frac{N(E_F)}{\alpha K} \right]^{1/2} \quad (7)$$

and

$$T_o = \frac{16\alpha^3}{kN(E_F)} \quad (8),$$

where v_{ph} is the phonon frequency ($\approx 10^{13}$ Hz) at Debye temperature; $N(E_F)$ is the density of the localized electron states at Fermi level, and α is the inverse localization length of the wave function associated with the localized state. As shown in the graph, $\ln(\sigma T^{1/2})$ versus $T^{-1/4}$ in **figure 4** inset exhibits a linear behavior along the entire T range with a linearity factor of 0.997. From the slope and intercept values, parameters $T_o = 7.1 \times 10^4$ K and $\sigma_o = 8.8 \times 10^3$ Sm⁻¹ were obtained considering expressions (7) and (8), respectively. Using the values extracted for T_o and σ_o , the density of the localized states at Fermi Level $N(E_F) = 1.2 \times 10^{21}$ eV⁻¹cm⁻³ and an α value of 7.78×10^6 cm⁻¹ were calculated according to expressions (7) and (8) that revealed a magnitude order of importance in advanced electronics (**Gross et al.**, 2016).

Likewise, the localization length $\xi = 1/\alpha$ was determined at 1.3 nm in agreement with the average value of 1.6 nm determined by Raman in-plane crystal size (**Figure 1a-c**). Assuming a wave function confined in the graphitic domains of $D \sim \xi$ sizes and considering the linear dispersion relation for graphene as $E(k) = \hbar v_F k$, with v_F being the graphene Fermi velocity, and $k \sim 1/2\xi$, the bandgap energy value was estimated at 0.22 ± 0.02 eV, in good agreement with the value of 0.25 eV of oxidized graphene reported elsewhere (**Kajen et al.**, 2013). Temperature dependence on the band-gap energy of a single rGO nanoplatelet with 5.3% oxide concentration is presented in **Figure 5a-b**.

Given the low 5.3% average oxygen concentration value exhibited by an individual rGO nanoplatelet, here it is proposed that the $E_g(T)$ behavior in this sample can be estimated by considering $\sigma(T)$ as the inverse of the experimental data presented in **figure 4** inset and the following expression (**Prías-Barragán et al.**, 2018):

$$\sigma(T) = \sigma_G k T \exp \left[- \frac{E_g}{2kT} \right] \quad (9),$$

where σ_G is equal to 0.8×10^6 S/meV, which represents the shift ratio of the electrical conductivity in graphite by thermal energy unit in meV associated with the conductivity of graphite and independent of temperature; E_g is the band-gap energy and k is the Boltzmann constant. The exponential term is related to the temperature effect on the electrical response of the intrinsic semiconductor material, and the additional terms represent the temperature dependence on the electrical conductivity of graphite, as proposed by the Wallace model (**Wallace**, 1947). Thus, obtaining $E_g(T)$ from expression (9) can be written as (**Prías-Barragán et al.**, 2018):

$$E_g(T) = -2kT \ln \left[\frac{\sigma(T)}{\sigma_G kT} \right] + 2E_{g(300K)} \quad (10),$$

where two terms appear in the expression: the first one associated with the temperature effect on the band-gap energy of the rGO, as a semiconductor in the low-oxygen concentration regime (5.3% in an individual rGO nanoplatelet as already mentioned), and the second one corresponding to twice the band-gap energy value at room temperature (previously determined) required in expression (9), obtained from experimental data as a reference value to calibrate the curve (Gross *et al.*, 2016; Hoyos-Ariza *et al.*, 2023). Therefore, by replacing the values of $\sigma(T)$ calculated inversely from the experimental data presented in figure 4 and replacing $\sigma(T)$ in expression (10), it was possible to estimate the temperature influence on the band-gap energy of an individual rGO nanoplatelet (Figure 5a).

Figure 5a evidences that decreasing temperature from 290 to 25 K increased the band-gap energy from 0.117 to 0.285 eV, as expected in narrow band-gap semiconductor materials. The red solid line shows the data fit calculated using the Varshni model described in expression (1), with a square regression value at 0.99998 and $E_g(0 K) = 0.292$ eV as the best fit. The inset shows the same fit using the phenomenological models presented in the theory section. All the fit parameters obtained with expressions (1-5) are listed in table 1.

Figure 5b shows that the Viña model does not describe the experimental data as expected and has a square regression value of 0.83743. The other models can be related by means of these fit parameters: $\beta \cong \theta_B/2 \cong \theta_p$ and $\alpha \cong \alpha_p/2$ (Table 1). It was found that $E_g(T)$ can be described by the Varshni phenomenological expression (1), as expected for a

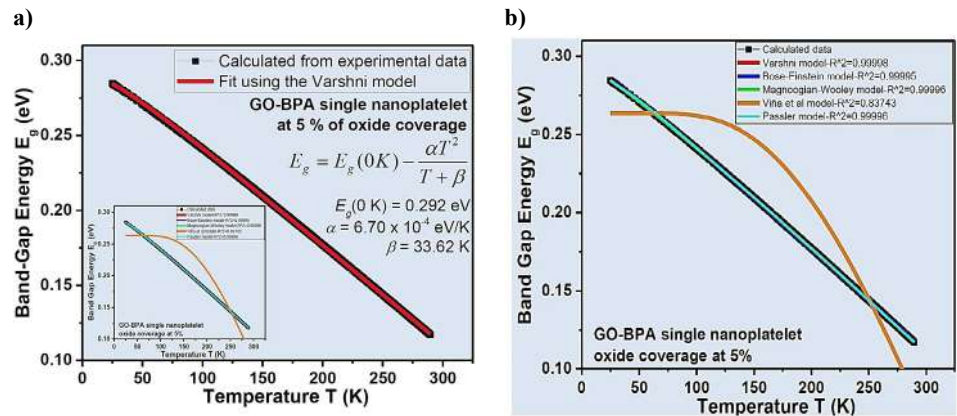


Figure 5. Temperature dependence with the band-gap energy values on an rGO nanoplatelet sample by employing (a) the Varshni model; the inset shows the fitting via other models; and (b) the Varshni, Bose-Einstein, Magnoogian-Wooley, Viña *et al.*, and Päsler models as given by expressions (1-5).

Table 1. List of fit parameters of the different models used

Models to describe $E_g(T)$				
Varshni	Bose-Einstein	Magnoogian-Wooley	Viña <i>et al.</i>	Päsler
$E_g(0 K) = 0.292$ eV	$E_g(0 K) = 0.288$ eV	$E_g(0 K) = 0.296$ eV	$E_g(0 K) = 0.263$ eV	$E_g(0 K) = 0.290$ eV
$\alpha = 6.70 \times 10^{-4}$ eV/K	$\theta_B = 67.49$ K	$V = 0.999$ eV/K	$b = 1.2$ eV	$\alpha_p = 3.34 \times 10^{-4}$ eV/K
$\beta = 33.62$ K	$\Theta_B = 67.49$ K	$\Theta = 1.1 \times 10^{-5}$ K	$\Theta = 721$ K	$\Theta_p = 67$ K
----	----	$U = 1$	----	$P = 1.95$
----	----	$S = 1$	----	----
$R^2 = 0.99998$	$R^2 = 0.99995$	$R^2 = 0.99996$	$R^2 = 0.83743$	$R^2 = 0.99996$

narrow band-gap semiconductor material, obtaining the Varshni coefficients at $E_g(0 K) = 0.292$ eV, $\alpha = 6.70 \times 10^{-4}$ eV/K, and $\beta \cong 34$ K; these values agree with the known order of magnitude of the Varshni coefficients reported for other narrow band-gap semiconductor materials like InAs ($E_g(0 K) = 0.417$ eV, $\alpha = 2.76 \times 10^{-4}$ eV/K, and $\beta = 93$ K) and InSb ($E_g(0 K) = 0.235$ eV, $\alpha = 3.90 \times 10^{-4}$ eV/K, and $\beta = 140$ K) (Prías-Barragán *et al.*, 2018).

Table 1 lists the fit parameters of the models used to describe the theoretical behavior of temperature dependence on the band-gap energy in an individual rGO nanoplatelet at 5.3% oxide concentration, as shown in **figure 1**.

The Varshni model describing electrical properties of rGO nanoplatelets suggests the temperature effect on the band-gap energy; however, the Varshni coefficients offer a few physics descriptions of the carriers or exciton interactions involved in some semiconductors, which explains why the Bose-Einstein model considers these effects in $E_g(T)$. Given that the R^2 values are similar in all the models used (**Table 1**), here, the Varshni phenomenological model was chosen to describe $E_g(T)$ since it contains fewer fitting parameters than the other phenomenological models and rGO is a polycrystalline material where disorder plays an important role; the Varshni model is simple for results interpretation without speculating on the physics involved in the description of $E_g(T)$.

From the result analyses in **figures 1** and **5**, it was established that the electrical behavior is dominated mainly by the presence of hydroxyl and epoxy bridges in rGO nanoplatelets, as reported by Hoyos-Ariza *et al.* (2023) employing first principle calculations via density functional theory (**Figure 3**). The hydroxyl and epoxy bridges can pull carbon atoms out-plane of the graphene locally (carbon out-plane defect), which results in uncompensated spin-charge density in GO systems (Prías-Barragán *et al.*, 2022); also, due to this defect, the carbon-carbon atoms average distance changes compared with the same distance in graphene or graphite (**Figure 2a**), with the opening of the band-gap energy appearing and rGO nanoplatelets exhibiting electrical behavior of narrow band-gap semiconductor (**Figures 2, 5**).

This effect of hydroxyl and epoxy bridges in rGO nanoplatelets is possibly responsible for the semiconductor behavior observed experimentally in rGO nanoplatelets. Theoretical and experimental results of the stable narrow band-gap semiconductor behavior induced by the adsorption of -OH and -O- atoms on graphene systems also suggest that rGO nanoplatelets can play a role in developing low-cost graphene and oxidized graphene-based technologies of advanced electronics of sensors and devices.

Conclusions

The theoretical and experimental evidence of temperature influence of the band-gap energy on rGO nanoplatelets, as in a narrow band-gap semiconductor system, is presented here. On the one hand, electrical measurement on individual rGO nanoplatelets revealed that electrical resistivity correlates with temperature as a semiconductor material, as expected. On the other hand, the temperature dependence with the band-gap energy on individual rGO nanoplatelets can be theoretically described by employing the Varshni model. Hence, these results, combined with the presence of hydroxyl and epoxy bridges in rGO nanoplatelets, may be explained as a semiconductor material given that the hydroxyl and epoxy bridges can pull carbon atoms out of the plane of the graphene locally (carbon out-plane defect) and, thus, produce the opening of the band-gap energy in the samples in the manner of a narrow band-gap system, as corroborated here experimentally. This effect is possibly responsible for the electrical properties observed in rGO nanoplatelets. Theoretical and experimental results of the stable narrow band-gap semiconductor behavior induced by the adsorption of -OH and -O- atoms on graphene systems also suggest that rGO nanoplatelets can play a role in developing low-cost graphene and oxidized graphene-based technologies of advanced electronics of sensors and devices.

Competing and financial interests

The author declares no competing financial interests.

Data availability statement

The datasets used and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

This work was funded partially by the Interdisciplinary Institute of Sciences at Universidad del Quindío, the Center of Excellence on Novel Materials at Universidad del Valle, and the Universidad del Quindío and MinCiencias project SGR BPIN: 2020000100600, internal code 1112.

References

- Abbas Z, Soomro, R. A., Kalmar, N. H., Mawada, T., Willander, M., Karakus, S. K., Ayben K. (2020). In Situ Growth of CuWO₄ Nanospheres over Graphene Oxide for Photoelectrochemical (PEC) Immunosensing of Clinical Biomarker. *Sensors*, 20, 148 1-10.
- Amir Faiz, M.S., Che Azurahaman, C.A., Yazid, Y., Suriani, A.B., Siti Nurul, A. M. (2020). Preparation and characterization of graphene oxide from tea waste and its photocatalytic application of TiO₂/graphene nanocomposite. *Journal Material Research Express*, 7, 015613 1-9.
- Arango Hoyos, B. E., Franco Osorio, H., Valencia Gómez, E. K., Guerrero Sánchez, J., Del Canto Palominos, A. P., Larrain, F. A., Prías-Barragán, J. J. (2023). Exploring the capture and desorption of CO₂ on graphene oxide foams supported by computational calculations. *Nature: Science Reports*, 13, 14476 1-15.
- Arias-Niquepa, R. A., Prías-Barragán, J. J., Ariza-Calderón, H., Rodríguez-García, M. E. (2019). Activated carbon obtained from bamboo: Synthesis, morphological, vibrational, and electrical properties and possible temperature sensor. *Physical Status Solidi A*, 2019, 1800422 1-11.
- Benevidesa, A.P., Campos, A.R., Vieira, L.C., Perez, C. dos Reis., Vargas, C.D. (2020). Reduced Graphene Oxide-Zinc Oxide Flower-Like Composite for Glass-Ionomer Materials Reinforcement. *Materials Research*, 23, e20190580 1-9.
- Geim, A.K., Novoselov, K.S. (2007). The rise of graphene. *Nat. Mater*, 6, 183-191.
- Geng, L., Wu, S., Zou, Y., Jia, M., Zhang, W., Yan, W., Liu, G. (2014). Correlation between the microstructures of graphite oxides and their catalytic behaviors in air oxidation of benzyl alcohol. *J. Colloid Interface Sci*, 421, 71-77.
- Geng, Y., Wang, S. J., Kim, J. K. (2009). Preparation of graphite nanoplatelets and graphene sheets. *Journal Colloid Interface Science*, 336, 592-598.
- Ghosh, R., Singh, A., Santra, S., Ray, S. K., Chandra, A., Guha, P. K. (2014). Highly sensitive large-area multi-layered graphene-based flexible ammonia sensor. *Sens. Actuators B*, 205, 67-73.
- Grande, L., Chundi, V.T., Wei, D., Bower, C., Andrew, P., Ryhänen, T. (2012). Graphene for energy harvesting/storage devices and printed electronics. *Particuology*, 10, 1-8.
- Gregory Thien S H, Pandikumar, A., Nay Ming, H., Hong Ngee, L. (2014). Highly exposed {001} facets of titanium dioxide modified with reduced graphene oxide for dopamine sensing. *Nature: Science Reports*, 4, 5044 1-8.
- Gross, K., Prías-Barragán, J. J., Sangiao, S., Lajaunie, L., Arenal, R., Ariza-Calderón, H., Prieto, P. (2016). Electrical conductivity of oxidized-graphenic nanoplatelets obtained from bamboo: effect of the oxygen content. *Nanotechnology*, 27, 365708 1-10.
- He, L. X., Tjong, S. C. (2013). Zener tunneling in conductive graphite/epoxy composites: Zener tunneling in conductive graphite/epoxy composites: Dielectric breakdown aspects. *Express Polymers Letters*, 7, 375-382.
- He, Z., Xia, H., Zhou, X., Yang, X., Song, Y., Wang, T. (2011). Raman study of correlation between defects and ferromagnetism in graphite. *J. Phys. D: Appl. Phys*, 44, 085001-9.
- Hoyos-Ariza, F. A., Prías-Barragán, J. J., Galván, D. H., Guerrero-Sánchez, J., Ariza-Calderón, H. (2023). Graphene nanostructures functionalization: Hydrogen bonds and oxide coverage effect. *Materials Today Communications*, 36, 106861 1-11.
- Hyo, J. K., Sung-Min, L., Yoon-Suk, O., Young-Hwan, Y., Young Soo, L., Dae, Ho Y., Changgu, L., Jong-Young, K., Rodney, S. (2014). Unoxidized Graphene/Alumina Nanocomposite: Fracture- and Wear-Resistance Effects of Graphene on Alumina Matrix. *Nature: Science Report*, 4, 5176 1-10.
- ISO Technical specification (2008). Nanotechnologies — Terminology and definitions for nano-objects — Nanoparticle, nanofibre and nanoplatelet. *ISO/TS 2008*, 27687:2008(E).

- Jia, G., Zhang, W., Jin, Z., An, W., Gao, Y., Zhang, X., Liu, J.** (2014). Electrocatalytically Active MOF/Graphite Oxide Hybrid for Electrosynthesis of Dimethyl Carbonate. *Electrochimica Acta*, 144, 1-6.
- Jiang, H., Chen, P., Zhang, W., Luo, S., Luo, X., Peter, C. Au., Li, M.** (2014). Deposition of nano Fe₃O₄@mZrO₂ onto exfoliated graphite oxide sheets and its application for removal of amaranth. *Appl. Surf. Sci.*, 317, 1080-1089.
- Kajen, R. S., Chandrasekhar, N., Pey, K. L., Vijila., C, Jaiswal M., Saravanan, S., Andrew M H Ng., Wong, C. P., Loh, K.P.** (2013). Trap Levels in Graphene Oxide: A Thermally Stimulated current study. *ECS Solid State Letters*, 2, M17-M19.
- Kigozi, M., Koech, R. K., Kingsley, O., Ojeaga, I., Tebandeke, E., Kasozi, G. N., Onwualu, A. P.** (2020). Synthesis and characterization of graphene oxide from locally mined graphite flakes and its supercapacitor applications. *Results in Materials*, 7, 100113 1-12.
- Kim, M., Kang, G. H., Park, H. W., Park, Y. B., Park, Y. H., Yoon, K. H.** (2012). Design, Manufacturing, and Characterization of High-Performance Lightweight Bipolar Plates Based on Carbon Nanotube-Exfoliated Graphite Nanoplatelet Hybrid Nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*, 159737, 1-8.
- Krystek, W., Malikova, L., Pollak, F. H.** (1995). Contactless electroreflectance study of temperature dependence of fundamental band gap of ZnSe. *Acta Physica Polonica A*, 88 (5), 1013-1017.
- Kuzemsky, A. L.** (2013). Unconventional and exotic magnetism in carbon-based structures and related materials. *Journal of Modern Physics B*, 27, 1330007 1-40.
- Kyzas G. Z., Bikiaris D. N., Deliyanni E. A.** (2014). Advanced low-swelling chitosan/graphite oxide-based biosorbents. *Mater. Lett.* 128, 46-49.
- Li, Fenfen., Linyu, L., Yunxuan, W.** (2020). A Review on the Contemporary Development of Composite Materials Comprising Graphene/Graphene Derivatives. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 1-16.
- Liu, Z., Duan, X., Cheng, H., Zhou, J., Zhou, X., Yuan, W.** (2015). Synthesis of platinum/graphene composites by a polyol method: The role of graphite oxide precursor surface chemistry. *Carbon*, 89, 93-101.
- Llatser, I., Kremers, C., Cabellos-Aparicio, A., Jornet, J.M., Alarcon, E., Chigrin, D. N.** (2012). *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, 10, 353-358.
- Lobato, B., Wendelbo, R., Barranco, V., Centeno, T. A.** (2014). Graphite Oxide: An Interesting Candidate for Aqueous Supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 149, 245-251.
- Makarova, T. L., Shelankov, A. L., Serenkov, I. T., Sakharov, V. I., Boukhalov, D. W.** (2011). Anisotropic magnetism of graphite irradiated with medium-energy hydrogen and helium ions. *Physical Reviews B*, 83, 085417 1-8.
- Matsuo, Y., Ueda, K.** (2014). Pyrolytic carbon from graphite oxide as a negative electrode of sodium-ion battery. *Journal of Power Source*, 263, 158-162.
- Mineo, H., Kondo, H., Hori, M.** (2013). Graphene Nanowalls. *In Tech Chapter 9*. 235-260.
- Mishra, A. K., Ramaprabhu, S.** (2012). Graphene-based nano-patch antenna for terahertz radiation. *Chem. Eng. J.*, 187, 10-15.
- Mizoguchi, T., Misaki, H., Shintaro, I., Michio, K.** (2020). Free Standing Graphene Oxide Membrane with Epoxy Groups for Water Purification. *Chemical Letters*, 49, 376-378.
- Mu, X., Wu, X., Zhang, T., Go, D. B., Luo, T.** (2014). Thermal Transport in Graphene Oxide –From Ballistic Extreme to Amorphous Limit. *Nature: Science Reports*, 4, 3909 1-9.
- Naser, A. A., Al-Sawaad, H. Z., Al-Mubarak, A. S.** (2020). Novel graphene oxide functionalization by urea and thiourea, and their applications as anticorrosive agents for carbon steel alloy in acidic medium. *J. Mater. Environ. Sci*, 11, 3 404-420.
- Newman, L., Rodrigues, A. F., Jasim Dhifaf, A., Vacchi, I. A., Menard-Moyon, C., Bianco, A., Busy, C., Kostarelos, K.** (2020). Nose-to-Brain translocation and cerebral biodegradation of thin graphene oxide nanosheets. *Cell Reports Physical Science*, 1, 100176 1-23.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Katsnelson, M.I., Grigorieva, I. V., Dubonos, S.V., Firsov, A. A.** (2005). Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 438, 197-200.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., Firsov, A. A.** (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 306, 666-669.
- O'Donnell, K. P., Chen, X.** (1991). Temperature dependence of semiconductor band gaps. *Appl. Phys. Letters*, 58, 2924-2926.

- Pässler, R.** (1997). Basic model relations for temperature dependencies of fundamental energy gaps in semiconductors. *Phys. Stat. Sol. B*, 200, 155-172.
- Petit, C., Bandosz, T. J.** (2015). Engineering the surface of a new class of adsorbents: Metal–organic framework/graphite oxide composites. *J. Colloid Interface Sciences*, 447, 139-151.
- Prías-Barragán, J. J.** (2018). Transport mechanisms study in graphite oxide platelets obtained from bamboo for possible applications in electronic. Doctoral Thesis, University of Valle, Colombia, 1, 1-209.
- Prías-Barragán, J. J., Echeverry-Montoya, N. A., Ariza-Calderón, H.** (2015). Fabricación y caracterización de carbón activado y de nanoplaquetas de carbón a partir de Guadua angustifolia Kunth para aplicaciones en electrónica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39, 444-449.
- Prías-Barragán, J.J., Gross, K., Ariza-Calderón, H., Prieto, P.** (2016). Synthesis and vibrational response of graphite oxide platelets from bamboo for electronic applications. *Phys. Status Solidi A*, 213, 85-90.
- Prías-Barragán, J. J., Gross, K., Ariza-Calderón, H., Prieto, P.** (2018). Transport mechanisms study in graphene oxide multilayers obtained from bamboo as source material and possible applications in electronic. *Revista de Divulgación Científica y Tecnológica, del Instituto Interdisciplinario de las Ciencias de la Universidad del Quindío*, 1, 9-47.
- Prías-Barragán, J. J., Gross, K., Ariza-Calderón, H., Prieto, P.** (2019). Graphene Oxide Multilayers Obtained from Bamboo: New Synthesis Method, Basic Properties, and Future Electronic Applications. *Wiley Scrivener Publishing LLC, London UK*. 8, 191-236.
- Prías-Barragán, J. J., Gross, K., Ariza-Calderón, H., Prieto, P.** (2019). Graphene oxide multilayers: Synthesis, properties and possible applications in electronics. *Latin American Electron Devices Conference IEEE 1*, 61-64.
- Prías-Barragán, J.J., Gross, K., Ariza-Calderón, H., Prieto, P., Di Giorgio, C., Bobba, E., Cucolo, A.M.** (2021). Room-temperature ferromagnetism in oxidized-graphenic nanoplatelets induced by topographic defects. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 524, 167664 1-11.
- Prías-Barragán, J. J., González-Hernández, R., Hoyos-Ariza, F., Ramírez, J. G., Ibarra, M. R., Prieto, P.** (2022). Magnetism in graphene oxide nanoplatelets: The role of hydroxyl and epoxy bridges. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 541, 168506 1-8.
- Prías-Barragán, J. J., Gross, K., Perea, J.D., Killilea, N., Heiss, W., Brabec, C. J., Ariza-Calderón, H., Prieto, P.** (2020). Graphene Oxide Thin Films: Synthesis and Optical Characterization. *Chemistry Select*, 5, 11737-11744.
- Prusty, G., Swain, S. K.** (2012). Dispersion of expanded graphite as nanoplatelets in a copolymer matrix and its effect on thermal stability, electrical conductivity and permeability. *New Carbon Materials*, 27, 271-277.
- Qiao, W. M., Song, Y., Huda, M., Zhang, X., Yoon, S. H., Mochida, I., Katou, O., Hayashi, H., Kawamoto, K.** (2005). Development of carbon precursor from bamboo tar. *Carbon*, 43, 3021-3025.
- Rao, C. N. R., Ramakrishna, Matte H. S., Subrahmanyam, K. S., Urmimala, M.** (2012). Unusual magnetic properties of graphene and related materials. *Chem. Sci.* 3, 45-52.
- Rozploch, F., Patyk, J., Stankowski, J.** (2007). Graphenes Bonding Forces in Graphite *Acta Phys. Polonica. A*, 112, 557-563.
- Rui Chen, Quan-Lin, Ye., He, T. C., Wu, T., Sun, H. D.** (2011). Uniaxial tensile strain and exciton–phonon coupling in bent ZnO nanowires. *Applied Physics Letters*, 98, 241916-1-3.
- Sachdeva, H.** (2020). Recent advances in the catalytic applications of GO/rGO for green organic synthesis. *Green Processing and Synthesis*, 9, 515-537.
- Sanchez-Trujillo, D. J., Osorio-Maldonado, L. V., Prías-Barragán, J. J.** (2023). Temperature dependence of electrical conductivity and variable hopping range mechanism on graphene oxide films. *Nature: Science Report*, 13(4810), 1-12.
- Sangwan, V. K., Southard, A., Moore, T. L., Ballarotto, V. W., Hines, D. R., Fuhrer, M. S., Williams, E. D.** (2011). Transfer printing approach to all-carbon nanoelectronics. *Nanoelectronics Microelectron. Eng.* 88, 3150-3154.
- Singh, A., Chandra, A.** (2013). Graphite oxide/polypyrrole composite electrodes for achieving high energy density supercapacitors. *J. Appl. Electrochem.* 43, 773-782.
- Tang, L., Li, X., Ji, R., Teng, K. S., Tai, G., Ye, J., Wei, C., Lau, S. P.** (2012). Bottom-up synthesis of large-scale graphene oxide nanosheets. *J. Mater. Chem.* 22, 5676-5683.

- Tang, Q., Wu, J., Li, Q., Lin, J.** (2008). High conducting multilayer films from poly (sodium styrene sulfonate) and graphite nanoplatelets by layer-by-layer self-assembly. *Polymer*, *49*, 5329-5335.
- Varshni, Y. P.** (1967). Temperature dependence of the energy gap in semiconductors. *Physica*, *34*, 149-154.
- Vina, L., Igothetidis, S., Cardona, M.** (1984). Temperature dependence of the dielectric function of germanium. *Physical Review B*, *30* (4), 1979-1991.
- Virendra, S., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S. I., Seal, S.** (2011). Graphene based materials: Past, present and future. *Progress in Materials Science* *56*, 1178-1271.
- Wallace, P.R.** (1947). The band theory of graphite. *Physical Review*, *71*(9), 622-634.
- Wang, Y., Yingbo, Q., Yu, S., Meng, Z., Shaobo, D.** (2020). A study on preparation of modified Graphene Oxide and flame retardancy of polystyrene composite microspheres *Designed Monomers and Polymers*, *23*, 1-15.
- Wei, T., Fan, Z., Zheng, C., Yao, C., Li, W.** (2009). Movement-induced voltage properties of stable graphite nanoplatelet suspensions. *Material Letters*, *63*, 1608-1610.
- Xue, C., Zou, J., Sun, Z., Wang, F., Han, K., Zhu, H.** (2014). Graphite oxide/functionalized graphene oxide and polybenzimidazole composite membranes for high temperature proton exchange membrane fuel cells. *International Journal Hydrogen Energy*, *39*, 7931-7939.
- Zhang, Bo., Li, Q., Cui, T.** (2012). Título del Artículo. *Biosensors Bioelectron*, *31*, 105-109.
- Zou, B. K., Zhang, Y. Y., Wang, J. Y., Liang, X., Ma, X. H., Chen, C. H.** (2015). Hydrothermally enhanced MnO/reduced graphite oxide composite anode materials for high performance lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, *167*, 25-31.

Artículo original

Información astronómica en la primera publicación periodica del Nuevo Reino de Granada

Astronomical information in the first periodical publication of the New Kingdom of Granada

 J. Gregorio Portilla

Observatorio Astronómico Nacional, Facultad de Ciencias, Sede Bogotá, Universidad Nacional de Colombia

Resumen

La inclusión de una sección titulada “afecciones astronómicas del día de hoy” en la primera publicación periódica del virreinato del Nuevo Reino de Granada, el *Papel Periódico de Santafé de Bogotá*, constituye, hasta donde se sabe, la manifestación más temprana de una serie de datos astronómicos calculados expresamente para la hora local de Santafé de Bogotá. En la presente comunicación se explora la razón que motivó su inclusión en el periódico, la fuente bibliográfica que se tomó como punto de partida, la posible identidad del calculista y la calidad de los datos obtenidos.

Palabras clave: Cálculos astronómicos; Santafé de Bogotá; Salida y puesta del Sol y la Luna.

Abstract

The inclusion of a section titled “Astronomical Conditions of Today” in the *Papel Periódico de Santafé de Bogotá*, the first periodical of the Viceroyalty of The New Kingdom of Granada, is the earliest known manifestation of a significant diversity of astronomical data calculated for the local time of Santafé de Bogotá. This communication explores the motivation behind its inclusion in the newspaper, the bibliographic source used as a starting point, the possible identity of the calculator, and the data quality.

Keywords: Astronomical calculations; Santafé de Bogotá; Sunrise, sunset, moonrise, moonset.

Introducción

La aparición de las publicaciones impresas en el Virreinato de la Nueva Granada fue relativamente tardía si se ha de comparar con lo que ocurrió en los virreinos tanto de la Nueva España como del Perú. En México ya existían imprentas en fecha tan temprana como 1535 (Gómez, 2007) y en Lima ya se imprimían libros en 1584 (Sandal, 2013). La primera imprenta que arribó a Santafé la trajeron los jesuitas en el año de 1737 y comenzó a operar el año siguiente (Hernández de Alba, 1986) aunque las primeras publicaciones con un claro propósito informativo solo vieron la luz en 1785 con la aparición del *Aviso del terremoto* y la *Gaceta de Santafé* (Vidales, 1997). La primera tuvo el propósito de informar a la población sobre el sismo que afectó Santafé y sus alrededores (pero que llegó a sentirse hasta en Ibagué y Popayán) el 12 de julio de ese año y cuyo recuento del fenómeno se ha valorado desde un punto de vista geológico (Sarabia, Cifuentes & Robertson, 2010); tal aviso tuvo al menos dos entregas adicionales en julio y agosto de ese año y llegó a incluir algunas noticias ajenas al terremoto propiamente dicho. Con relación a la *Gaceta*, se sabe de al menos tres tirajes de la misma, emitidas entre los meses de agosto y octubre del año

Citación: Portilla JG. Información astronómica en la primera publicación periodica del Nuevo Reino de Granada. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185):822-836, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2016>

Editor: Elizabeth Castañeda

Correspondencia:

José Gregorio Portilla;
jgportillab@unal.edu.co

Recibido: 18 de septiembre de 2023

Aceptado: 7 de diciembre de 2023

Publicado en línea: 18 de diciembre de 2023



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

en referencia, y que tuvieron el propósito de relatar hechos poco comunes acaecidos en el virreinato tales como un evento meteorológico que atentó contra la propiedad, el brote de una enfermedad o sucesos considerados milagrosos o inexplicables. Infortunadamente, en estas publicaciones pioneras no quedó consignado el nombre de su redactor, pero ha sido lugar común de la historiografía nacional atribuir su autoría al cubano Manuel del Socorro Rodríguez (1758-1819), aunque poco ha importado el hecho de que este solo llegó a Santafé en octubre de 1790.

Lo que sí debe atribuirse a Manuel del Socorro Rodríguez es la aparición y la continuidad, por espacio de seis años, del *Papel periódico de la ciudad de Santafé de Bogotá* (PPSB), la primera publicación periódica de larga duración que surgió en el Virreinato de la Nueva Granada. De emisión semanal (los días viernes), el primer número vio la luz el 9 de febrero de 1791 llegándose a completar 265 ediciones. Su extensión en cada número era de 8 hojas y en ellas se consignaban fundamentalmente noticias, narrativas y opiniones cuyo propósito consistía en últimas en defender y resguardar los intereses de la corona española y la iglesia católica (Manrique-Grisales, González & Gadea, 2022). Ejemplares del PPSB pueden consultarse actualmente en la Biblioteca Luis Ángel Arango así como en la Biblioteca Nacional de Colombia, tanto en físico como en sus páginas electrónicas (Rodríguez, 1791). Por supuesto que el PPSB ventiló, a parte de información cuyuntural, una amplia diversidad de temáticas de naturaleza política, económica, literaria y científica. En lo que se refiere a este último ámbito, merece especial señalamiento el texto titulado “El arcano de la Quina” redactado por José Celestino Mutis (1732-1808), Director de la Expedición Botánica, cuya notable extensión requirió 40 números. Hubo también algunos otros artículos, muy pocos, que abordaron temas de interés médico-biológico, geográfico y meteorológico. En particular, y que constituye el motivo de esta comunicación, en varios números del PPSB se incluyó una sección titulada “Afecciones astronómicas del día de hoy” consistente en ofrecer datos de naturaleza astronómica relacionados con el Sol y la Luna correspondientes al día de la emisión. Tales datos, como los tiempos de salida y puesta del Sol y de la Luna, son la primera manifestación de la que se tenga constancia de fenómenos astronómicos calculados para la localidad, *i. e.*, para la hora local solar verdadera de la ciudad capital del Virreinato de la Nueva Granada. El propósito de este escrito es analizar el contenido de dichas “afecciones”, del porqué de su inclusión, de determinar el material bibliográfico de base, examinar la forma en que fueron calculados y determinar quién pudo haber sido el responsable de las mismas.

Las afecciones astronómicas

Las afecciones astronómicas (AA) comenzaron a ser incluidas en el PPSB a partir del número 3 que apareció el 25 de febrero de 1791, tal y como se había anunciado en el número inmediatamente anterior, en donde, en la última página, se informa al lector de varios aspectos de la naturaleza de la publicación, tales como su costo y periodicidad y, en las últimas líneas, el sitio en el que aparecerán dentro de la estructura de cada número: “al fin del discurso y antes de las noticias particulares” y en seguida la aparente razón para incluirlas: “para que los curiosos no echen de menos en este papel una práctica casi universal en todos los periódicos que circulan”. En efecto, a finales del siglo XVIII y buena parte del XIX, tanto en varios periódicos de España como en algunas de sus colonias, era práctica común incluir una sección titulada “afecciones” tanto meteorológicas como astronómicas. Eran comunicaciones breves en las que se registraban las condiciones atmosféricas que habían imperado el día inmediatamente anterior tales como temperatura, presión, dirección del viento, etc.; y, en lo que atañe a la parte astronómica, se incluían, para el día en cuestión, los tiempos de salida y puesta del Sol y la Luna, fase de esta última (o su edad), sus coordenadas celestes bien con respecto a la Eclíptica o el Ecuador Celeste, etc (Figura 1, izquierda). De llegarse al momento se daba información de la ocurrencia del solsticio y del equinoccio, eclipses

lunisolares y ciertas configuraciones planetarias. El término “afecciones”, en el sentido peiodístico que se le otorgaba hace dos siglos, es un arcaísmo; al parecer tenía la connotación de “afectación” o “condición” en el sentido de aludir a fenómenos naturales de incidencia en la cotidianidad.

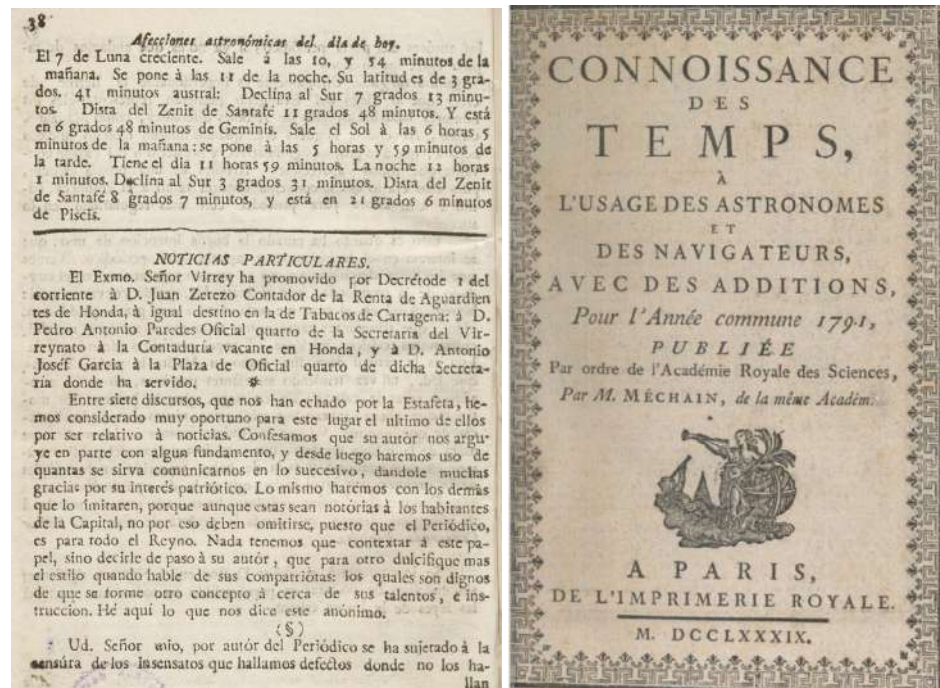


Figura 1. Izquierda: Una página del *Papel Periódico de Santafé de Bogotá* correspondiente al No. 5 del 11 de marzo de 1791 donde se incluyeron las Afecciones Astronómicas (AA) para ese día. Derecha: Presentación del *Connaissance des Temps* para el año de 1791 el cual, se presume, fue la referencia base para el cálculo de las AA.

En lo que respecta al PPSB propiamente dicho, nunca se incluyeron “afecciones” de naturaleza meteorológica. La razón, como se vio, de incluir las AA no era tanto suplir una necesidad de algún sector de la sociedad interesado en conocer ciertos valores de naturaleza astronómica sino más bien tratar de asemejar la nueva impresión lo más posible con las publicaciones periódicas europeas con la que estaba familiarizada la elite intelectual del virreinato. Las AA aparecieron solo en 29 de las 265 emisiones del PPSB (~ 11 %), todas en su primer año de emisión y de forma un tanto irregular. Aparecieron muy cumplidamente entre el número 3 y el número 14; siguieron apareciendo continuamente entre el número 16 y el 21; a partir de allí siguen un patrón discontinuo, pues aparecen en los números 24, 27, 28, luego del 30 al 36 y, finalmente, en el 42, que se emitió el 2 de diciembre de 1791. En ningún otro número volverían a aparecer a lo largo de los siguientes años hasta el cese del periódico ocurrido en enero de 1797. Se desconoce la razón de su interrupción, pues no aparece ningún registro en alguno de los números que aluda a su discontinuidad y a su definitiva suspensión. Las AA aparecieron siempre bajo el título *Afecciones astronómicas del día de hoy*; su extensión estuvo comprendida entre 7 y 13 líneas aunque en dos ocasiones excedió ese máximo para dar información adicional sobre el solsticio de junio (número 19) y de uno de los días en que el Sol se encuentra en el cenit en Santafé (número 31). Las notas aparecieron situadas, a lo largo de los números, en cualquiera de las ocho páginas que comprendía el PPSB con excepción de la primera aunque con más frecuencia entre las páginas seis a ocho y en dos ocasiones se colocaron en la segunda.

La información astronómica que se incluyó en casi todos los números es la siguiente:

- Edad de la Luna, E_{L} .
- Hora de salida de la Luna, TS_{L} .
- Hora de puesta de la Luna, TP_{L} .
- Latitud eclíptica de la Luna, β_{L} .
- Declinación de la Luna, δ_{L} .
- Distancia zenital de la Luna al momento de la culminación, z_{L} .
- Longitud eclíptica de la Luna, λ_{L} .
- Hora de salida del Sol, TS_{\odot} .
- Hora de puesta del Sol, TP_{\odot} .
- Duración del día, DD .
- Duración de la noche, DN .
- Declinación del Sol, δ_{\odot} .
- Distancia zenital del Sol al momento de la culminación, z_{\odot} .
- Longitud eclíptica del Sol, λ_{\odot} .

El número 3, cuando aparecieron por vez primera las AA, no incluyó β_{L} , así como δ_{\odot} y z_{\odot} . A partir del número 27 se incluyó un dato adicional:

- Hora del paso de la Luna por el meridiano, PM_{L} .

En las AA no se incluyeron datos adicionales sobre configuraciones planetarias, de manera que jamás se aportaron datos acerca de oposiciones, conjunciones, máximas elongaciones, etc., de los planetas; tampoco quedaron registrados los cuatro eclipses, dos de Luna y dos de Sol, que se sucedieron a lo largo de ese año de 1791. Por otra parte, en las AA del número 6 correspondiente al 18 de marzo no se comentó sobre el equinoccio que ocurriría el día 20; tampoco aparece el anuncio del equinoccio de septiembre en el número 32 del 16 de septiembre; sin embargo, el número 19 del 17 de junio sí incluyó el anuncio del solsticio de verano que ocurriría el “lunes inmediato”, esto es, el día 20 para lo cual anexó los datos de TS_{\odot} , TP_{\odot} , DD y DN correspondientes a ese día. Cuando arribó el solsticio de invierno ya se había interrumpido la aparición de las AA. Finalmente, en el número 31 del 9 de septiembre se anunciaba el paso del Sol por el cenit de Santafé que sucedería el “domingo inmediato”, esto es, el 11 de septiembre y en donde “hacia ningún lado haremos sombra, pues esta caerá precisamente a plomo a nuestros pies”; curiosamente no se anunció el mismo fenómeno que acaece en Santafé el 2 de abril: el número 8 del 1 de abril no lo refiere.

Autoría y fuente

En ninguna parte de los 265 números que alcanzaron a ser emitidos se comentó explícitamente sobre la identidad de la persona que estuvo tras los cálculos que demandaban las AA. Como veremos más adelante, no bastaba con copiar los datos de una fuente bibliográfica. El autor se preocupó por determinar las coordenadas lunisolares a una hora específica local de Santafé de Bogotá, lo que supuso la realización de interpolaciones entre los valores consignados en la fuente. Además, los tiempos de salida y puesta del Sol y la Luna, conjuntamente con el paso del meridiano de esta última que aparecen en los almanaques astronómicos de la época, están calculados para la hora local del meridiano del observatorio astronómico que los elaboraba (París, Greenwich, San Fernando) de manera que si se desea conocer esos tiempos para otra latitud y longitud es necesario contar con conocimientos básicos de astronomía de posición y cierta experticia matemática. Es poco probable que el mismo Manuel del Socorro Rodríguez tuviera ese conocimiento astronómico-matemático lo que no significa que su talento literario y su cultura hayan que colocarse en entredicho; la irregularidad en la aparición de las AA así como su brusca interrupción sugiere que era otro individuo el responsable de esa nota. Un candidato más plausible de la autoría de las AA es José Celestino Mutis pues, al menos en el papel, contaba con los conocimientos necesarios

para su elaboración ya que ostentaba el cargo de Astrónomo Real desde 1783; recordemos que colaboró en el PPSB con un extenso artículo que demandó numerosas entregas. No está demás añadir que el autor no pudo ser Francisco José de Caldas (1768-1816) quien para la época, si bien se encontraba en Santafé completando sus estudios en derecho, estaba todavía a un año de despertarse su interés por la astronomía cuando retornó a su natal Popayán (Portilla, 2021). Otra posibilidad que hay que contemplar es que el autor haya sido alguien con instrucción en ingeniería militar o en navegación, pues no eran pocos los subscriptores del PPSB que eran oficiales militares (Manrique-Grisales, González & Gadea, 2022).

Pese a lo anterior, creemos que existe un candidato más probable: el abogado rosarista Antonio Joseph García de la Guardia (1770-1815). Aunque este ejerció importantes cargos de carácter administrativo, es bien cierto también que era aficionado a elaborar calendarios, almanaques y guías de forasteros lo que ocurrió tanto a finales del siglo XVIII como a comienzos del XIX. Caballero (1946), en su célebre diario, registra la muerte de García y menciona que era el administrador de las salinas de Zipaquirá y el “que hacía los almanaques”. En la Guía de Forasteros de 1810 que él mismo compiló se lee que es natural de Panamá (se entiende que se refiere a la actual capital del país de ese nombre) y que nació en el año de 1770. Sin embargo, en un compendio de panameños notables en la Colonia se consigna que García nació en Portobelo (en ese entonces, un importante enclave del Imperio Español sobre el Caribe situada a unos 70 km al norte de Ciudad de Panamá) en 1771 (Susto, 1972). Esta última reseña omite cualquier alusión a su elaboración de calendarios o almanaques, pero sí menciona que García tuvo la osadía de rescatar caudales y papeles de la Real Audiencia al momento del incendio del Palacio de los Virreyes en Santafé el 29 de mayo de 1786 “con el mayor trabajo y con grave peligro para su vida”. Para ese entonces contaba apenas con 15 años.

Varios indicios sugieren que la probabilidad de que García fuese la persona encargada de elaborar las AA es relativamente alta. Primero que todo, su nombre no era ajeno en el PPSB. En el número 3, aquel en donde se introdujeron las AA por primera vez, en la última página aparece una breve nota titulada “Advertencia”. En ella se menciona el nombre de García y su deseo de recuperar un libro de su pertenencia que extravió: el primer tomo de *Principios de Matemáticas* de Benito Bails y para lo cual “promete una gratificación”. El número siguiente, el del 4 de marzo aparece el nombre de “D. Antonio García, Oficial de Secretaría”, dentro de los 81 suscriptores del PPSB que había en el momento; en efecto, Susto (1972) refiere que García sirvió en la Secretaría del Virreinato como oficial supernumerario en 1789 y dos años después estuvo como Oficial de la Secretaría. El nombre de García vuelve a aparecer en el número 36 del 14 de octubre (la penúltima ocasión en que las AA aparecerían en el PPSB); en esta ocasión con una nota, colocada inmediatamente después de las AA titulada, otra vez, “Advertencia”. En ella se lee que García, el “Autor del Calendario” (sic), anunció el día 10 a través de varios carteles que colocó en “los puestos más públicos de esta Ciudad” que por “una inadvertencia puramente material” quedó erróneamente, en dicho calendario, que el eclipse era el día 11 pero, al hacer varios cálculos para prepararse para ver el eclipse notó que en realidad sucedería el día 12, “a las mismas horas, y con las mismas circunstancias con que se había anunciado: lo que manifiesta en prueba de su sinceridad y buena fe”. La nota es significativa, pues informa que García había elaborado un calendario —presumiblemente redactado en 1790— y aunque no fue el primero en el virreinato en elaborar un texto de tal naturaleza, pues se sabe que los hubo entre 1778 a 1784 (Madrid, 1964), sí es el primero en el que su nombre no quedó relegado al anonimato.

Sabemos que García elaboró no solo sencillos almanaques con extensión de apenas de dos hojas sino también varias emisiones del “Calendario Manual y Guía de Forasteros

en Santafé de Bogotá” como los de 1805 y 1806 (Torres, 2018), que comprendieron varios centenares de páginas. De los almanaques (Kalendarios) sobrevivientes se infiere que, aparte de la información necesaria que este tipo de publicaciones implicaba (día de la semana, santo de cada día, fiestas litúrgicas, días en operación de los tribunales de justicia), también estaba consignada la ocurrencia de las fases lunares (con día, hora, minuto y constelación en la que se encontraba la Luna) y el instante en que el Sol ingresaba en una constelación zodiacal (con día, hora y minuto). En un texto aparte refiere la ocurrencia de eclipses lunisolares con las etapas dadas en hora local, de cuánto hay que adicionar o restar a esos tiempos para el caso de un usuario ubicado en ciertas ciudades del Virreinato y menciona los días en que el Sol se ubica en el cenit al mediodía en Santafé.

De todo lo anterior se infiere que García no solo era una persona intelectualmente inquieta sino que poseía los conocimientos astronómico-matemáticos necesarios para determinar las horas locales de ciertos fenómenos celestes. Y en el medio que lo rodeaba era conocido por poseer una destreza matemática por encima de la media al punto de ser recomendado por el mismo Mutis para elaborar almanaques (Uribe, 2019).

Los calendarios y los almanaques inmersos dentro de las guías de forasteros que García elaboró contenían información astronómica básica de un evidente interés para el grueso de la población. El conocimiento de las fases lunares es esencial para jornaleros y campesinos; así mismo, la información del ingreso del Sol en una determinada constelación puede servir como elemento para la elaboración de horóscopos o como insumo adicional dentro de prácticas adivinatorias de carácter ancestral. A ese respecto no se debe olvidar que Francisco José de Caldas, varios años después, incluyó dentro de los almanaques que elaboró, no solo esos eventos, sino también las fechas de la ocurrencia de “puntos lunares”, eventos en los que la Luna atravesaba la Eclíptica y el Ecuador Celeste o su máxima separación entre ellos, convencido como estaba él —y no pocos de sus contemporáneos— de que tales fenómenos incidían directamente en el estado del tiempo (Portilla, 2021). No hace falta añadir que la inclusión de los eclipses lunisolares es apenas obvia por su espectacularidad y relativa poca ocurrencia. El PPSB, por otro lado, estaba dirigido a la crema y nata de la intelectualidad del Virreinato; sus lectores en un buen porcentaje ostentaban estudios superiores o eran estudiantes de universidad y no pocos de ellos poseían cargos de importancia religiosa, política, militar, administrativa y económica. Aunque la inclusión de las AA, como ya se dijo, tenía la intención cosmética de asemejarse a publicaciones de otras latitudes y en particular a las existentes en España, la calidad de su público demandaba información de más fina factura, parte del cual podría considerar útil o al menos interesante conocer con exactitud la hora de salida y puesta del Sol y la Luna, el paso de esta última por el meridiano, etc. Por supuesto, los cálculos necesarios para elaborar las AA requerían tiempo y esfuerzo, en una época en donde los cálculos matemáticos involucrados había que hacerlos manualmente, lo que podría explicar en parte la discontinuidad de su aparición, al menos en los meses finales de 1791.

En lo referente a la fuente que consultó el autor de las AA hay dos posibilidades: o se trató del *Connaissance des Temps* (CDT) o bien fue *The Nautical Almanac and Astronomical Ephemeris* correspondientes ambos, y como es apenas obvio, a la emisión del año de 1791 (Figura 1, derecha). Los dos eran de emisión anual; el primero elaborado por los astrónomos del Observatorio de París (Francia) a partir de 1679 y el segundo por los astrónomos del Observatorio de Greenwich (Inglaterra) a partir de 1767 (Seidelmann, 2019). Tales publicaciones contenían además del almanaque, ocurrencia de fases lunares, eclipses lunisolares, configuraciones planetarias, etc., así como las posiciones, léase coordenadas, de los cuerpos del Sistema Solar, estas últimas no solo útiles para astrónomos y geógrafos, sino también necesarias para los navegantes que las requerían para hallar su ubicación en mar abierto. Si se considera la continua rivalidad existente entre Inglaterra y España que ocasionó no pocas confrontaciones en el siglo XVIII, así como la fuerte influencia francesa en España y sus colonias a partir del advenimiento de los borbones, lo que originó que un buen segmento de

la élite criolla fuera fluente en el idioma francés, nos inclinamos a creer que el libro consultado fue el CDT, cuyos ejemplares, comprendidos entre los años de 1680 a 1803, pueden consultarse en la siguiente página: gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb327469896/date. Se descarta que la fuente haya sido el *El Almanaque Náutico y Efemérides Astronómicas* del Real Observatorio de San Fernando (Cádiz, España) por la sencilla razón de que solo comenzó a emitirse a partir del año de 1792 (González, 1995).

La construcción de las “Afecciones astronómicas” para Santafé

Asumiendo que la fuente directa para el cálculo de las AA fuese el CDT, su autor debió recurrir a varias de las tablas que corresponden en esa publicación a cada mes del año. Específicamente el libro dedica, para cada mes, 12 páginas, en donde solo las 4 primeras se ocupan de mostrar los datos para la Luna y el Sol. Describimos a continuación el contenido de esas cuatro primeras páginas.

- Primera: el número del día, y al frente de este el día de la semana, el santo del día o la fiesta religiosa, el tiempo de salida y puesta tanto del Sol como de la Luna (en horas y minutos) dados en tiempo civil (TC), *i. e.*, el día comenzando a media noche correspondiente a la hora en París, los días de la Luna y, en la parte inferior de la tabla, el día y la hora solar de cada fase lunar.
- Segunda: el número del día, y al frente de este la longitud eclíptica del Sol (λ_{\odot}) dada en signo, grados, minutos y segundos a las 0^h de tiempo astronómico (TA) *i. e.*, con el inicio del día solar a mediodía; la distancia del equinoccio al Sol en unidades de tiempo (horas, minutos y segundos) a las 0^h de TA y que es igual a $360 - \alpha_{\odot}$, donde α_{\odot} es la ascensión recta del Sol; la declinación del Sol (δ_{\odot}) en grados, minutos y segundos (a las 0^h de TA) y en las que, para especificar el hemisferio celeste en el que se encuentra, se indica con las palabras “boreal” o “austral” en lugar de los signos + o -, que es como se hace modernamente; en la última columna, el ángulo horario del sol medio al momento de la culminación del sol verdadero, esto es, la ecuación del tiempo; en la parte inferior de la tabla, el semidiámetro del Sol para dos fechas del mes.
- Tercera: el número del día, y al frente de este la longitud eclíptica de la Luna (λ_{L}) dada en signo, grados, minutos y segundos y correspondientes a dos instantes de tiempo: a mediodía y a media noche; la latitud eclíptica de la Luna (β_{L}) dada en grados, minutos y segundos y correspondientes a dos instantes de tiempo: a mediodía y a media noche (0^h y 12^h de TA); el instante de tiempo, dado en TA, al momento del paso de la Luna por el meridiano de París.
- Cuarta: el número del día, y al frente de este la ascensión recta de la Luna (α_{L}) en unidades de grados y minutos, correspondiente tanto a mediodía como a media noche (0^h y 12^h de TA); la declinación de la Luna (δ_{L}) dada en grados y minuto para cuatro instantes de tiempo: a las 0^h , 6^h , 12^h y 18^h de TA.

Las restantes ocho páginas, y que en apariencia el autor de las AA nunca consultó, o al menos no hizo referencias a los datos allí contenidos, se ocupan en ofrecer la paralaje lunar, configuraciones planetarias, coordenadas así como salidas y puestas de los planetas del Sistema Solar cada cierto número de días, eclipses y configuraciones de los satélites de Júpiter y las distancias angulares del centro de la Luna al Sol y a ciertas estrellas brillantes con intervalos de tres horas.

En lo que sigue explicaremos los posibles procedimientos que el autor utilizó para calcular las distintas “afecciones” correspondientes a observadores ubicados en Santafé de Bogotá a una hora solar verdadera determinada.

- Edad de la Luna, E_{L} .

Este dato, que el CDT llama “Jours de la Lune”, es una forma indirecta de ofrecer la fase de la Luna en el día en cuestión. Por ejemplo: la primera AA que, como ya vimos, apareció el 25 de febrero, dice: “el 23 de Luna menguante”. Esto significa que, para el día 25 de febrero, han transcurrido 23 días desde la Luna nueva. Desde el novilunio (el cero) hasta 15 días (aproximadamente la mitad del mes sinódico) la Luna está en “crecimiento”; desde ahí hasta el día 30 la Luna estará en “decrecimiento”, lo que explica que, para el caso que nos ocupa, la Luna esté en menguante.

- Latitud eclíptica (β_{L}), declinación (δ_{L}) y longitud eclíptica lunar (λ_{L}) al igual que declinación (δ_{S}) y longitud eclíptica solar (λ_{S}).

Estos cinco valores pueden ser calculados apelando a una sencilla interpolación de los valores registrados en el CDT. Llamando θ a cualquiera de estos ángulos, el cálculo para hallar el valor a una hora específica para Santafé de Bogotá, y que llamaremos $(\theta)_S$, puede proceder del siguiente modo:

$$(\theta)_S = (\theta)_{P,t} + \Delta\theta \times DH$$

donde $(\theta)_{P,t}$ es el valor del ángulo en cuestión consultado en el CDT y por lo tanto a la hora t en París; $\Delta\theta$ representa la variación del ángulo en cuestión por cada hora transcurrida (y que puede obtenerse a partir de una simple diferencia entre dos datos consecutivos) y DH es la diferencia de horas entre París y Santafé que el autor adoptó. Debido al fuerte movimiento de la Luna a través de la esfera celeste, el CDT, como ya vimos, da los valores de β_{L} y λ_{L} para dos instantes de tiempo separados por 12 horas; para δ_{L} los da cada 6 horas; de manera que es sencillo, a partir de una simple resta y luego de una división determinar $\Delta\theta$. En el caso del Sol, por su movimiento más lento, tanto δ_{S} como λ_{S} se dan para cada día.

Una nota aclaratoria aquí es necesaria para el caso de las longitudes. Por varios siglos fue costumbre que los astrónomos expresaran las longitudes eclípticas de los astros con relación al signo zodiacal en el que se encontraban. Cada constelación contaba entonces con una extensión de 30 grados. Por ejemplo, “está en 10° en Tauro”, significa que está a 10° dentro de esta constelación. Si se desea expresar la longitud de un astro (lunar o solar) con respecto al punto vernal (λ), que es como se expresa hoy en día, bien puede entonces apelarse a la siguiente expresión:

$$\lambda = (\lambda)_S + (N - 1) \times 30^\circ,$$

donde $(\lambda)_S$ es el número de grados dentro de la constelación específica y N el número de constelación zodiacal correspondiente: $N = 1$ (Aries), $N = 2$ (Tauro), $N = 3$ (Geminis), ..., $N = 12$ (Piscis).

- Distancia zenital de la Luna (z_{L}) y del Sol (z_{S}) al momento de la culminación.

Esto es equivalente al valor de la distancia zenital del astro en el momento del paso por el meridiano del observador.

Para el cálculo de la distancia zenital, z , se requiere conocer la latitud del observador, ϕ y la declinación, δ , del astro en cuestión, pues la relación entre ellos es la conocida expresión (Portilla, 2009):

$$z = 90^\circ - h = \phi - \delta,$$

donde h es el ángulo llamado altura.

Tendremos entonces que la distancia zenital del Sol $(z_{\text{S}})_S$ en Santafé al momento del paso por el meridiano, es:

$$(z_{\text{S}})_S = \phi_S - (\delta_{\text{S}})_S,$$

siendo $(\delta_{\odot})_S$ el valor de la declinación del Sol a mediodía local aparente, esto es, a las 12^h de TC en Santafé y es el valor de declinación que ha hallado previamente; ϕ_S es el valor de la latitud que el autor adoptó para Santafé.

Para el caso de la Luna, la ecuación es:

$$(z_{\text{L}})_S = \phi_S - (\delta_{\text{L}})_S,$$

siendo $(\delta_{\text{L}})_S$ el valor de la declinación que tiene la Luna al momento de la culminación.

- Hora del paso de la Luna por el meridiano, PM_{L} .

Se debe recordar que en aquella época el tiempo que medían los relojes, debidamente ajustados, era el tiempo solar verdadero, esto es, el tiempo en cuestión era el ángulo horario del Sol verdadero en el lugar de la observación. Puesto que modernamente el tiempo local se mide con referencia al Tiempo Universal Coordinado (esto es, con base al tiempo solar medio) a través de la adopción de un huso horario en particular y que las posiciones de los astros en esos instantes requieren especificar la posición del punto vernal, esto es, se requiere el conocimiento del tiempo sidereal en Greenwich, el cálculo de los tiempos del paso por el meridiano así como los de salida y puesta de un astro en particular difiere en algunos aspectos del procedimiento cuando los tiempos están basados en el tiempo solar verdadero, de modo que explicaremos con algo de detalle la forma de calcular estos instantes.

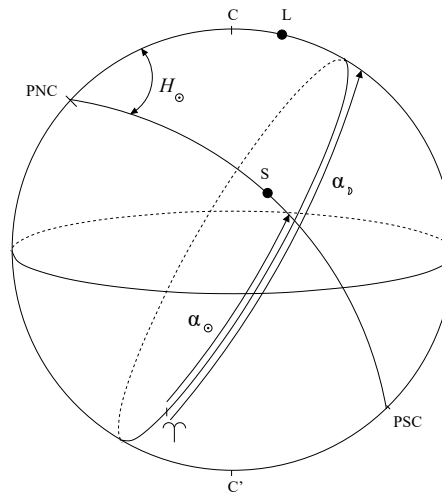


Figura 2. Al momento en que la Luna (L) atraviesa el meridiano, se ha de localizar la posición del Sol (S), que puede establecerse a través de su ángulo horario, H_{\odot} que es numéricamente igual a $\alpha_{\text{L}} - \alpha_{\odot}$. El punto γ es el punto vernal así como PNC, PSC, C y C' representan, respectivamente, el polo norte celeste, el polo sur celeste, el cenit y el nadir.

Al momento de que la Luna atraviesa el meridiano, ver Figura 2, su ángulo horario es numéricamente igual a cero, así, el ángulo horario del Sol para ese instante, que corresponde al tiempo solar verdadero, está dado por:

$$PM_{\text{L}} = H_{\odot} = \alpha_{\text{L}} - \alpha_{\odot}, \tag{1}$$

donde α_{L} puede tomarse del CDT, en la página cuarta del mes, y puede escogerse el valor de mediodía en París (0^h en TA) y que corresponde a las ~7 a. m. TC en Santafé; el valor de la ascensión recta del Sol se halla a partir del valor de la “distancia

al Sol del equinoccio”, y que es igual a $24^h - \alpha_{\odot}$ que también está dado para las 0^h de TA.

Sin embargo, este valor es una primera aproximación, pues hay que tener en cuenta que, para tal instante, las ascensiones rectas de la Luna y el Sol ya han cambiado, en particular para la primera debido a su fuerte movimiento a través del cielo. Los incrementos (o decrecimientos) según el caso, se pueden determinar con una simple interpolación entre dos datos consecutivos. Los valores de ascensión recta para ambos objetos se reemplazan de nuevo en la ecuación (1) para obtener un valor corregido de $PM_{\mathcal{D}}$.

- Hora de salida, TS_{\odot} , y puesta del Sol, TP_{\odot} .

El autor determina el tiempo solar verdadero del momento de la salida y puesta del Sol con relación a un observador situado en Santafé. Por la naturaleza del cálculo, no sirve de nada saber los datos correspondientes para un observador en París, que están consignados en el CDT en TC. De manera que hay que proceder a calcularlo, lo que requiere conocer algunos aspectos básicos de trigonometría esférica.

Como se desprende de la Figura 3, la relación entre el ángulo horario H del astro A en el momento de la puesta, su declinación y su distancia zenital conforman el triángulo PNC-C-A, en el que, al aplicar el teorema del coseno, puede obtenerse:

$$\cos H = \frac{\cos z - \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta}{\cos \phi \cos \delta}. \quad (2)$$

Al hacer este cálculo de forma rigurosa (**Lalande**, 1771, tomo 1, pág 464), el ángulo z no se asume igual a 90° , pues es necesario hacer dos correcciones: la refracción, que hace aumentar la distancia cenital, y el paralaje horizontal que la disminuye. El valor del efecto de la refracción en el horizonte se toma como de $33,5'$. Para el Sol, el paralaje horizontal es muy pequeño ($10''$) y por ello no se tiene en cuenta; para la Luna es de $54,5'$. Así, en la salida y la puesta, para el Sol $z = 90^\circ 33,5'$ y para la Luna $z = 90^\circ 21'$. En aquella época no se acostubraba a realizar la corrección por semidiámetro, pues los tiempos de salida y puesta para ambos objetos que registraba

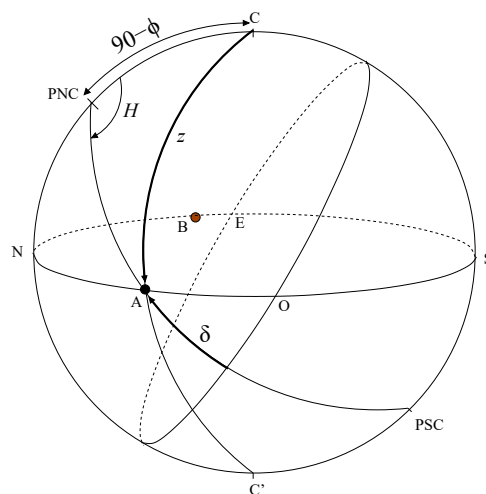


Figura 3. Representación de la puesta (A) y de la salida (B) de un astro y que corresponde a los momentos en que éste atraviesa el horizonte, representado por el círculo máximo sobre el cual se ubican los puntos cardinales N-E-S-O.

el CDT correspondían al centro del cuerpo celeste. La solución de la ecuación (2) permite, pues, encontrar tanto el tiempo de salida como puesta.

Para el caso específico de encontrar los tiempos de salida y puesta del Sol, se puede hacer uso del valor de δ_{\odot} dado en la segunda hoja del CDT para cada mes, el cual está dado a las 0^h de TA. Es claro que el tiempo en que se verifica la puesta (punto A de la Figura 3) está dado por:

$$TP_{\odot} = (H_{\odot})_p.$$

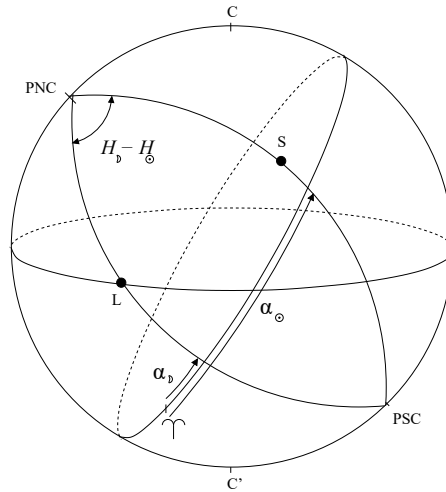


Figura 4. Representación de la puesta para el caso específico de la Luna (L). La diferencia de ascensiones rectas entre el Sol y la Luna es igual a la diferencia entre sus ángulos horarios y ello permite determinar el ángulo horario del Sol.

Para un astro relativamente próximo al ecuador celeste, el valor de TP_{\odot} es del orden de $(H_{\odot})_p \sim 90^{\circ}$, esto es, $(H_{\odot})_p \sim 6^h$, al que se adiciona 12^h para expresarlo en TC que, como se sabe, inicia el día a media noche. El tiempo de la salida del astro está dado por $(H_{\odot})_s \approx 360^{\circ} - H_p$, o sea:

$$TS_{\odot} = (H_{\odot})_s.$$

De nuevo, si el astro en cuestión está relativamente próximo al ecuador celeste se tendrá que: $(H_{\odot})_s \sim 270^{\circ}$ ($\sim 18^h$), que en TC es igual a $\sim 6^h$. Debido al relativamente lento movimiento del Sol a través del cielo, y en particular la lenta variación de la declinación solar, no se hace necesario realizar una segunda aproximación consistente en determinar el valor correcto de la declinación del Sol para el momento de la salida o de la puesta. En el caso de hacerse, la diferencia es de pocos segundos en tiempo.

- Duración del día, DD y duración de la noche, DN

Hallados los tiempos de salida y puesta del Sol, la duración del día (DD) y de la noche (DN) son inmediatos. En efecto:

$$DD = TP_{\odot} - TS_{\odot}, \quad DN = 24^h - DD.$$

- Hora de salida de la Luna, TS_{L} y puesta de la Luna, TP_{L} .

El cálculo es semejante al de la salida y puesta del Sol, aunque un poco más elaborado. Se comienza por hacer uso de la ecuación (2) pero, en este caso, el valor de la declinación corresponde, obviamente, al de la Luna (δ_{L}). Tal valor puede extraerse

de la página cuarta del mes en el CDT en el que está dado en cuatro tiempos distintos separados por 6^h y en TA. En ángulo así hallado corresponde a la puesta, esto es $(H_{\text{D}})_p$. Para efectos de hallar la ubicación del Sol (a través de su ángulo horario) en ese instante se deben conocer las ascensiones rectas tanto del Sol como de la Luna, semejante a como se hizo en el cálculo del paso por el meridiano de la Luna. De la Figura 4 es fácil ver que:

$$H_{\text{D}} - H_{\odot} = \alpha_{\odot} - \alpha_{\text{D}},$$

y por lo tanto, al momento de la puesta:

$$TP_{\text{D}} = H_{\odot} = (H_{\text{D}})_p - (\alpha_{\odot} - \alpha_{\text{D}}), \quad (3)$$

en donde α_{\odot} se toma de la página segunda del mes, a partir del dato de la distancia al equinoccio ($24^h - \alpha_{\odot}$), que está dado a las 0^h de TA hora de París, y α_{D} se toma de la página cuarta del mes (de la cual hay dos valores, mediodía y media noche hora de París). Como en los casos precedentes, este valor es tan solo una primera aproximación; se deben calcular los valores que han de tener δ_{D} , α_{D} y α_{\odot} para el instante en cuestión a través de sencillas interpolaciones. Con estos datos en el “instante” correspondiente, se reemplazan de nuevo tanto en la ecuación (2) como en la ecuación (3), dando un valor corregido para TP_{D} .

Para el cálculo de la salida se ha tener en cuenta que: $(H_{\text{D}})_s = 360^{\circ} - (H_{\text{D}})_p$. De manera que:

$$TS_{\text{D}} = H_{\odot} = (H_{\text{D}})_s - (\alpha_{\odot} - \alpha_{\text{D}}), \quad (4)$$

el cual, de nuevo, se constituye en una primera aproximación, para lo cual habrá que determinar los valores “instantáneos” de los datos involucrados y reemplazándolos de nuevo en las ecuaciones (2) y (4) para obtener un valor más aproximado de TS_{D} .

Análisis

En la Tabla 1 se encuentran reunidos en su conjunto los valores de las AA que aparecieron a lo largo del año de 1791. Algunos datos han sido convenientemente expresados, como la adición del signo negativo para los valores australes de latitud y la declinación o la presentación de los tiempos en “hora militar” (de 0 a 24). Para el caso de la edad de la Luna, en una gran mayoría de los casos, el autor tomó el valor correspondiente para el meridiano de París y lo consignó tal cual en las AA. Sin embargo, se advierten algunas diferencias. De forma importante, en dos casos en particular, números 4 y 21, el autor anotó a partir de qué hora de ese día en cuestión comienza a ser creciente; al comparar con el tiempo en que se registra el novilunio en el CDT se infiere la diferencia horaria existente que el autor adoptó entre el meridiano de París y Santafé: $4^h 57^m$ en un caso y $4^h 59^m$ en el segundo. En relación con los valores de la distancia cenital en el momento de la culminación, los datos son consistentes con un valor de latitud adoptado de $4^{\circ}35'$ norte. De igual modo, con relación a valores tales como declinaciones, latitudes y longitudes, que fueron hallados por el autor de las AA, hay consistencia de que fueron calculados por sencillas interpolaciones para un tiempo de cinco horas después del mediodía hora de París, lo que significa que el instante de tiempo para el que fueron calculados (que, entre otras cosas, nunca se especificó en ningún lado del PPSB) corresponde al mediodía de Santafé de Bogotá del día en cuestión, lo cual supone una diferencia horaria de $5^h 0^m 0^s$ entre las dos ciudades, esto es, una diferencia en longitud de 75° exactamente.

En la Tabla 1 se han señalado aquellos valores que posiblemente sean debidos a errores por parte del impresor así como errores propiamente de cálculo. En este último caso se han indicado como errores a aquellos que constituyen yerros flagrantes de cálculo. Así que hemos colocado una cota para considerar qué valor puede considerarse como erróneo, de modo que se indican solo aquellos valores que presentan diferencias —entre lo que el

autor consignó y lo que debería arrojar— de más de un grado en ángulo y más de media hora en los cálculos de los tiempos. Ciertamente no son pocos los errores que el calculista cometió (y que hemos sido lo suficientemente permisivos en no señalarlos) consistentes en elementales yerros de sumas y restas que una sencilla revisión de los cálculos hubiera permitido detectarlos, lo que sugiere que en su gran mayoría los cálculos fueron realizados con premura. Sin embargo, hay una notable excepción: los tiempos de salida y puesta del Sol fueron calculados con esmero, lo que explica que incluso los haya expresado, en una gran mayoría de las veces, al segundo y con diferencias de apenas unos pocos segundos con respecto al cálculo realizado de nuestra parte. Empero, tales valores por él determinados indican que adoptó en la ecuación (2) $z = 90^\circ$ y no $z = 90^\circ 33,5'$, esto es, no tuvo en cuenta ni la refracción ni el paralaje solar. Por supuesto, esto conduce a que los datos por él obtenidos frente a los que se obtienen con las correcciones mencionadas tengan una diferencia —en defecto en las salidas y en exceso en las puestas— del orden de dos a tres minutos.

Por otra parte, no hay forma de entender por qué el calculista obtuvo un no despreciable número de valores completamente equivocados de la declinación de la Luna. Los primeros nueve valores de la declinación lunar son del todo errados, algo difícil de comprender cuando su obtención está basada en una simple interpolación. Solo a partir de número 12 ya comienzan a aparecer valores consistentes con lo que se lee en el CDT, aunque a medida que avanza el año volverá a obtener otros tres valores errados. Aquellos valores que podemos denominar “correctos” son consistentes para un cálculo al mediodía en Santafé del día en cuestión; sin embargo, el calculista utilizó ese mismo valor de declinación para determinar la altura cenital tanto del Sol como de la Luna en el paso por el meridiano, lo que es válido para el primero (pues para este, como vimos, interpoló el valor de la declinación para mediodía en Santafé), pero no lo es para la segunda, cuya culminación se puede verificar a cualquier otra hora.

De ahí que el valor que más presenta errores comparado con el correcto es la distancia cenital de la Luna. Por otra parte, los valores que el calculista prestó para los tiempos del paso de la Luna por el meridiano así como en los tiempos de salida y puesta de ese mismo astro indican que no se esforzó en ejercer una labor rigurosa en el cálculo de esos valores, de manera que siempre se obtuvieron diferencias de varios minutos entre lo que encontró el calculista y lo que obtuvimos de nuestra parte; no obstante, tales diferencias, casi siempre en exceso, y salvo contados casos, nunca excedieron los 30 minutos.

Detalles como la omisión de la ocurrencia tanto de los equinoccios como del paso del Sol por el cenit del 2 de abril, conjuntamente con la inclusión tardía del dato del tiempo por el paso por el meridiano de la Luna y, más tardío aun, el dato adicional de especificar si la Luna o el Sol se encontraban al norte o al sur del cenit en las distancias cenitales (lo cual solo advirtió a partir del 16 de septiembre para el Sol) sugiere que la persona detrás de los cálculos, a lo largo de los meses en que se incluyeron las afecciones, estaba en un proceso de aprendizaje sobre la marcha. Al margen de lo exactos o no que hallan sido realizados los cálculos, no está demás comentar brevemente sobre el posible impacto de las AA en el medio cultural santafereño. **Chacón** (2018) sostiene que la motivación de su inclusión en el PPSB era “un gesto que intentaba darle importancia a una actividad de aficionados”, esto es, un intento de refinar una práctica de observación grupal entre una población joven de asiduos visitantes de la Biblioteca Pública —que el mismo Socorro Rodríguez organizó— ávida de conocimientos, incluyendo los científicos. No podemos estar más de acuerdo con este autor con que muy escasos lectores podían entender el significado de las palabras y los números que constituían las AA, y menos sin una explicación anexa que, infortunadamente, al parecer no se creyó necesaria. Empero, parece haber existido un grupo de personas que estaban al tanto de la información y, con base en ella, tener la posibilidad de cotejar entre lo calculado y lo observado.

Tabla 1. Afecciones astronómicas tomadas del PPSB. Para el caso de las latitudes eclípticas y declinaciones se colocó el signo negativo en lugar de “austral” o “sur”. Los tiempos de salida, puesta y paso por el meridiano se colocaron en formato de 24 horas y no de 0 a 12 (en el que se especifica si es en la mañana o en la tarde).

No.	Mes	Día	$E_{\text{Día}}$	$TS_{\text{Día}}$	$PM_{\text{Día}}$	$TP_{\text{Día}}$	$\beta_{\text{Día}}$	$\delta_{\text{Día}}$	$z_{\text{Día}}^b$	$\lambda_{\text{Día}}^c$	$TS_{\text{Día}}$	$TP_{\text{Día}}$	DD	DN	$\delta_{\text{Día}}$	$z_{\text{Día}}^b$	$\lambda_{\text{Día}}^c$
				h m	h m	o	o	o	o'	CZ o'	h m s	h m s	h m s	h m s	o'	o'	CZ o' ''
03	02	25	23M	12 04†	-	00 12§†	-	-05 16†	09 51†	S 08 03	06 03	17 57	11 54	12 06	-	-	P 07 06
04	03	04	30M	05 53	-	18 08	03 20	-02 56†	07 31†	P 12 15	06 02	17 58	11 58	12 02	-06 16	10 51	P 14 07
05	03	11	07C	10 54	-	23 00	-03 41	-07 13†	11 48†	G 06 48	06 05†	17 59	11 59	12 01	-03 31	08 07	P 21 06
06	03	18	14C	16 39	-	05 06§†	-03 44	-04 54†	09 29†	V 06 32	06 00 24	17 59 36	11 59 36	12 00 24	-01 10	05 45	P 28 03 30
07	03	25	21M	23 32†	-	11 39§†	04 19	09 24†	04 46†	S 16 30†	05 59	18 01 00	12 02	11 58	01 59	02 36	A 05 00
08	04	01	21M†	05 16†	-	17 20†	02 41	05 55†	01 50†	P 31 18†	05 59	18 01	12 02	11 58	04 25	00 10	A 11 59
09	04	08	05C	09 44	-	21 40	-04 15	03 08†	01 27†	G 15 06	05 57 36	18 02 36	12 04 48	11 55 12	07 23	02 48	A 18 47
10	04	15	12C	15 23†	-	03 33§†	-03 13	06 43†	02 08†	V 14 33	05 56 48	18 03 12	12 06 24	11 53 36	09 56	05 21	A 25 38
11	04	22	19M	21 35	-	09 46§	03 52†	16 16†	11 41†	S 07 47†	05 56	18 04	12 08	11 52	12 24	-	T 02 33
12	04	29	29M†	03 33	-	15 34	01 55	02 10	02 25	A 00 38	05 55 16	18 04 44	12 09 28	11 50 32	14 37	-	T 09 15
13	05	06	04C	08 30	-	20 50	-04 38	18 42	14 07	G 23 53	05 54 33	18 05 27	12 10 54	11 49 06	16 40	12 05	T 16 02
14	05	13	11C	14 09	-	02 26§	-02 35	00 36	03 59†	V 21 56†	05 53 51	21 09 08‡	12 12 16	11 47 44	18 31	13 59	T 22 47
16	05	27	25M	02 15	-	14 18	01 01	04 49	00 14†	A 09 45	05 52 48	18 07 12	12 14 24	11 45 36	21 24	16 49	G 06 14
17	06	03	02C	07 32	-	19 29	-04 37	18 49	14 14	C 02 57	05 52 28	18 07 32	12 15 04	11 44 56	22 19	17 44	G 12 10
18	06	10	09C	12 50	-	00 52§	-01 33	-02 22	06 57†	Li 02 22	05 52 12	18 07 48	12 15 36	11 44 24	23 06	27 41†	G 19 37
19	06	17	16M	19 20	-	07 24§	05 02	-17 33	22 08†	Ca 15 48	05 52 04	18 07 56	12 15 52	11 44 08	23 17	18 52	G 26 19
19	06	20	-	-	-	-	-	-	-	-	05 52 00	18 08 00	12 16 00	11 44 00	-	-	-
20	06	24	23M	00 58	-	13 02§†	00 01	05 42†	01 07†	A 18 38	05 52 04	18 07 56	12 14 56	11 45 04	23 28	18 53	G 02 19†
21	07	01	30M	06 03	-	18 15	-05 00	17 57	13 22	C 12 00	05 52 21	18 07 48	12 15 36	11 44 14	23 09	17 34	C 09 40
24	07	22	21M	23 30	-	11 36§	-00 57	09 25	04 50	A 26 48	05 53 12	18 06 48	12 13 36	11 46 25	20 16	15 41	C 29 41
27	08	12	13C	17 40†	23 36	05 52§†	04 26	12 19†	16 54†	Ac 13 44	05 55 04	18 04 56	12 09 52	11 50 08	14 55	10 20	L 19 49
28	08	19	20M	22 11	04 15§	10 18	-01 54	11 13	06 38	T 04 04	05 55 52	18 04 08	12 08 08	11 51 08‡	11 41†	08 07†	L 26 34
30	09	02	04C	09 24	15 20	21 17	01 54	-11 20	15 55	E 03 58	05 57 20	18 02 28	12 04 56	11 55 04	07 48	03 13	V 10 05
31	09	09	11C	15 52	21 47	03 43§	04 35	-12 33	17 08	Ac 12 13	05 58 20	18 01 40	12 03 20	11 56 40	05 14	00 39	V 19 45
32	09	16	18M	02 52†	08 56†	15 00†	-02 39	13 00	08 25	T 12 38	05 59 12	18 00 48	12 01 36	11 58 24	02 30	02 05s	V 23 43
33	09	23	25M	02 27	08 35	14 43	04 51	22 38†	18 03†	L 07 03	06 00 00	18 00 00	12 00 00	12 00 00	-00 13.5	00 48.5s†	- 00 34
34	09	30	03C	09 04†	14 59†	20 55†	02 47	-13 19	16 54s†	E 10 07	06 01	17 59	12 59‡	12 02	-02 58	07 33s	Li 07 27
35	10	07	10C	14 47	20 44	01 40§†	04 09	-10 09	14 44s†	Ac 21 42	06 01 50	17 58 10	11 56 20	12 03 40	-05 40	10 15s	Li 14 21
36	10	14	17M	19 50	01 55§	08 00§	-03 17	14 42	10 07n	T 20 49	06 02 40	17 57 20	11 54 40	12 03 20	-08 19	13 44s	Li 21 17
42	12	02	07C	12 21	18 20	00 18§	02 27	-04 28	09 03s	P 12 26	06 07 26	17 52 34	11 45 08	12 14 52	-22 05	26 40s	S 10 30†

a: M: menguante; C: creciente.

b: n: norte; s: sur (se refiere a que está explícitamente en el texto).

c: La longitud se especifica con respecto a la constelación zodiacal (CZ): A, Ari.; T, Tau.; G, Gem.; C, Cán.; L, Leo; V, Vir.; Li, Lib.; E, Esc.; Ca, Cap.; S, Sag.; Ac, Acu.; P, Pis.

§: del día siguiente.

†: valor errado.

‡: probable error de imprenta.

Esto se infiere de un comentario aparecido en el número 27 en la cual inmediatamente después de las AA, aparece una nota en la que señala que los tiempos que aparecen allí son los solares “y no las que señalan los relojes de Santafé; pues aunque estos se arreglaron a fines del año próximo pasado, ya han vuelto a su antiguo desconcierto”. El funcionamiento de los relojes no debió mejorar dos décadas después, pues Caldas, en el Almanaque de 1811, advierte en una nota que los tiempos de los contactos predichos para los eclipses de ese año “es el verdadero” y no las “horas arbitrarias de los sacristanes” (Portilla, 2021).

Conclusión

En esta comunicación se analizó el contenido de textos breves de naturaleza astronómica que fueron incluidos en varios de los números del primer periódico del Virreinato del Nuevo Reino de Granada y que constituyen los primeros datos sobre el ciclo lunisolar calculados para la hora local de Santafé de Bogotá. La razón de su inclusión en el periódico fue asemejarlo a otras publicaciones de distintas latitudes que solían incorporar noticias astronómicas y meteorológicas.

Se dieron argumentos para respaldar que quien estuvo detrás de los cálculos fue Antonio García de la Guardia, conocido entre sus contemporáneos por su afición a elaborar almanaques y calendarios, y cuya fuente original, muy posiblemente, fue el ejemplar del *Connaissance des Temps* de 1791. Es evidente que el calculista incurrió en no pocos errores, tal vez por la prisa con que hacía sus cálculos, exceptuando aquellos de la salida y la puesta del Sol, cuya precisión llegaba incluso al segundo.

Agradecimientos

El autor expresa un sincero agradecimiento a dos revisores anónimos cuyos comentarios y sugerencias permitieron mejorar la versión original de este escrito. Esta investigación fue posible a través del proyecto de investigación con código Hermes 52596 de la Universidad Nacional de Colombia.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Caballero, J. M.** (1946). Particularidades de Santafé. Biblioteca Popular de Cultura Colombiana.
- Chacón, N. J.** (2018). Crítica, práctica y socialización: caminos de aproximación hacia la ciencia moderna en la Nueva Granada, 1760-1800. Tesis de doctorado, Universidad de Berlín.
- Gómez, H. M.** (2007). Historia de la imprenta en México. Archivos de Neurociencias, *12*, 69-70.
- González, F. J.** (1995). El Almanaque náutico y la difusión de la astronomía en la España de la primera mitad del siglo XIX: trabajos publicados (1795-1845), *Revista de Historia Naval*, *51*, 33-58.
- Hernández de Alba.** (1986). Conatos de reformas coloniales, en *Historia de Colombia*, Tomo 3, Salvat Editores S. A.
- Lalande, J. J. L.** (1771). Astronomie, Chez la Veuve Desaint.
- Madrid, N.** (1964). Ensayo de un diccionario de la literatura colombiana, *Boletín Cultural y Bibliográfico*, *7*, 1183-1194.
- Manrique-Grisales, J., González, D., & Gadea, W. F.** (2022). Construcción social de realidad y memoria en El Papel Periódico de Santafé de Bogotá (1791-1797). *Anuario Electrónico de Estudios en Comunicación Social "Disertaciones"*, *15*, 1-19.
- Portilla, J. G.** (2009). Elementos de astronomía de posición. Universidad Nacional de Colombia.
- Portilla, J. G.** (2021). Firmamento y atlas terrestre: la astronomía que practicó Francisco José de Caldas. Universidad Nacional de Colombia.
- Rodríguez, M.** (1791). Papel Periódico de la Ciudad de Santafé de Bogotá. Disponible en: https://catalogoenlinea.bibliotecanacional.gov.co/client/es_ES/search/asset/118304/ y en: <https://babel.banrepcultural.org/digital/collection/p17054coll26/id/596>
- Seidelmann, P. K.** (2019). A history of estern astronomical almanacs, *Journal of Astronomical History and Heritage*, *22*, 93-112.
- Sandal, E.** (2013). La emigración de los impresores italianos a España y América durante el siglo XVI, *Boletín del Instituto de Investigaciones Bibliográficas*, *2*, No 2.
- Sarabia, A. M., Cifuentes, H. M. & Robertson, K.** (2010). Análisis histórico de los sismos ocurridos en 1785 y en 1917 en el centro de Colombia. Cuadernos de Geografía: *Revista Colombiana de Geografía*, *19*, enero-diciembre, 153-162.
- Susto, J. A.** (1972). Panameños de la época colonial. *Revista Lotería*, *202* (septiembre), 94-101.
- Torres, V. A.** (2018). El impreso olvidado: El Calendario manual y guía de forasteros del Nuevo Reino de Granada para el año de 1805. Tesis de Grado, Universidad del Rosario.
- Uribe, R.** (2019). Composición, impresión y consulta del tiempo en los calendarios iberoamericanos (Valladolid 1628-Bogotá 1888), *Historia y Sociedad*, *37* (julio 2019), 52-82.
- Vidales, C.** (1997). Colombia: el primer siglo de periodismo (1785-1900). Foro Hispánico, *Revista hispánica de los Países Bajos*, septiembre de 1997, 47-55.

Artículo original

Ajuste de los modelos de velocidad de transferencia de gases en el embalse tropical andino Porce III

Adjustment of gas transfer velocity models in the tropical Andean reservoir Porce III

✉ Eliana Bohórquez-Bedoya^{1,*}, ✉ Jhonier Andrés Guevara-Cáceres²,
✉ Andrés Gómez-Giraldo¹, ✉ Juan Gabriel León-Hernández²

¹Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Medellín, Colombia

²Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Palmira, Colombia

Resumen

En los embalses se producen gases de efecto invernadero por la descomposición microbiana de la materia orgánica en los sedimentos o de otros procesos bioquímicos en la columna de agua y la superficie. Estos gases se emiten a la atmósfera por distintas vías. Concretamente los flujos difusivos dependen de la diferencia de concentración entre el agua y la atmósfera y la velocidad de transferencia de los gases (k) controlada por forzantes hidrodinámicos que alteran la turbulencia en la superficie del agua. El forzante más reconocido de control de la k es la velocidad del viento (U). Numerosos modelos empíricos relacionan estas variables, la mayoría basados en embalses situados en altitudes altas y medias, aunque algunos suelen replicarse en distintos ambientes y latitudes, incluso en sistemas tropicales. Aquí medimos directamente los flujos difusivos de metano en el embalse tropical andino Porce III utilizando cámaras flotantes y las concentraciones del gas por cromatografía de gases. La k se estimó a partir de la ley de difusión o primera ley de Fick y la U en una estación meteorológica ubicada sobre la superficie del embalse para verificar la aplicabilidad de los modelos de velocidad de transferencia de gases propuestos en función de la velocidad del viento en un embalse tropical andino. Los resultados revelaron que dichos modelos, propuestos para lagos y embalses, subestimaron la k en el embalse Porce III.

Palabras clave: Velocidad de transferencia de gases; Emisiones; Metano; Embalses tropicales; Velocidad del viento.

Abstract

Greenhouse gases are produced inside reservoirs due to the microbial decomposition of organic matter in the sediments and other biochemical processes in the water column and the surface. These gases are emitted to the atmosphere through different flow pathways. Diffusive fluxes depend on the difference in their concentration in the water and the atmosphere and the gas transfer rate (k), controlled, in turn, by hydrodynamic forces that alter turbulence on the water surface. The most widely recognized force controlling k is wind speed (U). Numerous empirical models relate both variables ($k = f(U)$), most based on reservoirs located in high and mid-latitudes. However, some have been widely replicated in different environments and latitudes, even in tropical systems. Here, we measured the methane diffusive fluxes in the tropical Andean reservoir Porce III using floating chambers and gas chromatographic measurements for gas concentrations. k was estimated from the diffusion law, i.e., Fick's first law, and U from a meteorological station located on the reservoir surface. Our objective was to verify the applicability of the proposed gas transfer rate models as a function of wind speed in a tropical Andean reservoir. The results revealed that most models in the literature for lakes and reservoirs underestimated k in the Porce III reservoir.

Keywords: Gas transfer velocity; Emissions; Methane; Tropical reservoirs; Wind velocity.

Citación: Bohórquez-Bedoya E, Guevara-Cáceres JA, Gómez-Giraldo A, *et al.* Ajuste de los modelos de velocidad de transferencia de gases en el embalse tropical andino Porce III. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185):837-848, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefn.1970>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Eliana Bohórquez-Bedoya;
elibohorquezbed@unal.edu.co

Recibido: 14 de agosto de 2023

Aceptado: 10 de diciembre de 2023

Publicado en línea: 18 de diciembre de 2023



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

Introducción

Los embalses emiten gases de efecto invernadero (GEI) como producto de la descomposición microbiana de materia orgánica en los sedimentos y otros procesos bioquímicos que suceden en la columna de agua (Rudd, 1993) y en la superficie, una zona de gran actividad biológica (Bohórquez-Bedoya *et al.*, 2023; Donis *et al.*, 2017; Günthel *et al.*, 2019; Ordóñez *et al.*, 2023). Según estimaciones, los embalses producen entre el 1,3 y el 7 % de las emisiones antropogénicas de CO₂ en 100 años (Deemer *et al.*, 2016; St. Louis *et al.*, 2000).

Una vez los GEI se producen a partir de procesos bioquímicos, se almacenan o se transportan a través del embalse debido a procesos físicos (Vachon *et al.*, 2019) y se emiten a la atmósfera por distintas vías de flujo (Bastviken *et al.*, 2008). Una porción importante de los GEI se transporta a través de la columna de agua y alcanza su superficie, donde puede llegar a la atmósfera por difusión (Abe *et al.*, 2005; Peeters *et al.*, 2019). La magnitud de los flujos difusivos en la interfaz agua-aire depende de las diferencias de concentración entre el agua y el aire y de la velocidad de transferencia de los gases, la cual aumenta con la turbulencia superficial por la acción de los forzantes hidrodinámicos (Barros *et al.*, 2011; Peeters *et al.*, 2019). Aunque también depende de otros procesos como la mezcla convectiva en la superficie y la turbulencia generada por las gotas de lluvia, la velocidad del viento es el principal forzante de la velocidad de la transferencia de gases (k) en la superficie del agua (Klaus & Vachon, 2020; Wanninkhof, 2014).

El modelamiento de las emisiones desde los embalses no es exacto debido a la gran variabilidad de la latitud, la topografía, el tamaño, el estado trófico, las condiciones hidrometeorológicas y la profundidad de los sistemas, entre otros aspectos (Bastviken *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2014). Por lo tanto, el modelamiento y la predicción de los flujos de los GEI en la interfaz agua-atmósfera representa un reto para la comunidad científica y los operadores de embalses. Muchos autores han propuesto modelos empíricos para estimar la k , la mayoría en función de la velocidad del viento, que es reconocido como el principal forzante regulador de la k . Algunos modelos se utilizan ampliamente para estimar los flujos de GEI, a pesar de la gran variabilidad de condiciones de los sitios y la participación de otros procesos generadores de turbulencia superficial, como la mezcla convectiva, la morfología y la lluvia.

En Colombia el mayor desarrollo hidroeléctrico se concentra en la región andina. Los estudios previos se han enfocado en la cuantificación de los GEI o la comprensión de las dinámicas espaciotemporales de los flujos y las concentraciones de los gases en embalses hidroeléctricos andinos (Bohórquez-Bedoya *et al.*, 2023; Guérin & León, 2015; León, 2020; León *et al.*, 2020; Rodríguez & Peñuela, 2022). En el presente estudio nos propusimos ajustar los modelos de la velocidad de la transferencia de los gases normalizada (k_{600}) recogidos en la literatura científica a partir de los resultados de las mediciones *in situ* en un embalse andino para explorar su aplicabilidad en las condiciones de clima y topografía propios de los Andes colombianos.

Materiales y métodos

Zona de estudio

El estudio se llevó a cabo en Porce III, un embalse elongado y encañonado en los Andes colombianos (Figura 1), donde se registra una temperatura media de 24,5 °C y una precipitación anual de 2.500 mm. El embalse está ubicado a 660 m.s.n.m., su profundidad media es de 45 m y la máxima de 140 m en cercanías a la presa; almacena hasta 169 mm³ en un área total de 4,61 km², con una longitud aproximada de 11 km y un ancho entre 300 y 500 m (Figura 1); su capacidad instalada puede generar hasta 660. Se ubicaron puntos de monitoreo (P1, P2 y P3) distribuidos a lo largo del embalse sobre su eje longitudinal desde la presa hasta la cola del embalse (Figura 1), los cuales se monitorearon en seis campañas de campo entre mayo del 2017 y febrero del 2019 que cubrieron las principales temporadas del régimen hidrológico (Tabla 1).

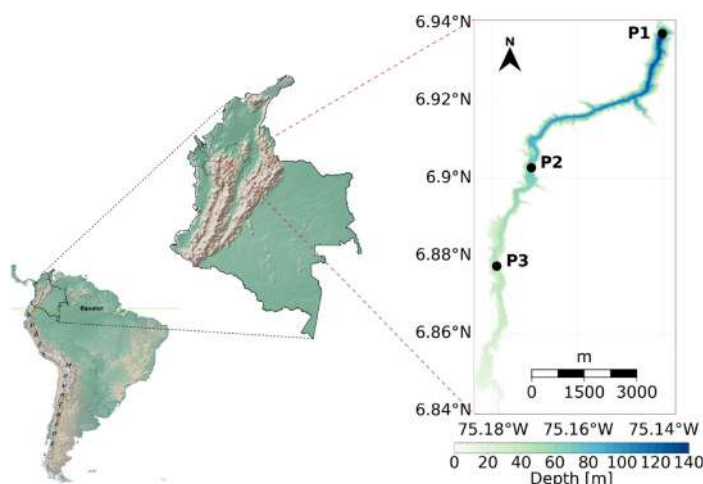


Figura 1. Ubicación continental y regional del embalse Porce III en los Andes colombianos y batimetría del embalse

Tabla 1. Condiciones meteorológicas e hidrológicas en el área de estudio durante las campañas de monitoreo

Campaña	Fechas	Condición meteorológica	Condición hidrológica
1 (May/17)	8-12 mayo de 2017	Estación húmeda	Aguas altas
2 (May/18)	8-12 mayo de 2018	Estación húmeda	Aguas altas
3 (Ago/18)	31 julio - 3 agosto de 2018	Estación seca	Descenso de aguas
4 (Sep/18)	19-22 septiembre de 2018	Transición seca-húmeda	Descenso de aguas
5 (Nov/18)	11-15 noviembre de 2018	Estación húmeda. Las precipitaciones se vieron atenuadas por la influencia del fenómeno de El Niño de carácter débil (IDEAM, 2018).	Ascenso de aguas
6 (Feb/19)	26 febrero - 2 marzo de 2019	Estación seca, acentuada por fenómeno de El Niño	Aguas bajas

Variables meteorológicas

Se recolectaron los datos de velocidad del viento cada 30 minutos durante todo el período de estudio utilizando una estación meteorológica (Davis Vantage Pro2) instalada a 2 m por encima de la superficie del agua, cerca de la presa. La velocidad del viento (U_z) se tomó de las series de tiempo ajustadas en la fecha y hora más cercana de la recolección de mediciones discretas de flujos de CH_4 y se normalizaron a 10 m de altura utilizando el perfil logarítmico propuesto por **Amorocho & DeVries** (1980).

Flujos superficiales, CH_4 disuelto en superficie y k_{600}

Los flujos difusivos de CH_4 en la interfaz agua-atmósfera se midieron utilizando cámaras flotantes (**Guérin et al.**, 2007) en los tres puntos de monitoreo durante las seis campañas de campo (**Tabla 1**, **Figura 1**). Los muestreos en la zona de la presa (punto de muestreo P1) se hacían tres veces al día durante la mañana (P1-M, 08:00-12:00), la tarde (P1-A, 14:00-20:00) y la noche (P1-N, 22:00-03:00). El muestreo siguió una secuencia típica: zona de entrada, P3, dos veces al día; zona media del lago, P2, dos veces al día (ambos puntos en horas de luz solar) y, finalmente, la zona de la presa, P1, capturando la dinámica diurna, como se explicó antes.

Para cada medición, se desplegaron simultáneamente dos cámaras plásticas de ~40 L cubiertas con cinta de aluminio para minimizar su calentamiento interior (Vachon *et al.*, 2010) y se equiparon con un tapón de butilo que permitía el muestreo de gases con una jeringa y una aguja. Las cámaras, que se adentraban unos 5 cm en el agua, flotaban libremente en la superficie durante 45 minutos y las muestras se tomaron cada 15 minutos para luego ser almacenadas en viales de 5 mL; las concentraciones de gas se analizaron por cromatografía de gases. Como parte de este procedimiento, se recolectaron muestras de CH₄ disuelto en el agua a 0,20 m de profundidad en viales de 20 mL preservados con HgCl₂. En las muestras se determinó la concentración de CH₄ mediante cromatografía en fase gaseosa (Shimadzu GC-2014 equipado con detector de llama de ionización) utilizando la técnica Headspace (Guérin *et al.*, 2007). La temperatura superficial del agua se midió durante en serie de recolección de datos con una sonda multiparamétrica (Yellow Springs Instruments YSI EXO1 multiparameter sonde).

El flujo a través de la interfaz agua-atmósfera ($F_{g,T}$) se calculó a partir de la tasa de cambio lineal de la concentración de gas dentro de la cámara (dC_{cham}/dt), el volumen interno de la cámara (V_{cham}) y el área de la base de la cámara en contacto con el agua (A_{cham}), así:

$$F_{g,T} = (dC_{cham}/dt) V_{cham} / A_{cham} \quad (1)$$

A continuación, se estimó la velocidad de transferencia de gases de la primera ley de Fick:

$$F_{g,T} = k_{g,T} (C_w - C_{eq}), \quad (2)$$

donde $k_{g,T}$ es la velocidad de transferencia del gas a la temperatura *in situ* y C_w y C_{eq} son las concentraciones de gas disuelto en el agua superficial y de equilibrio con la atmósfera, respectivamente. Los flujos positivos van del agua a la atmósfera. La ecuación (2) se resolvió para $k_{g,T}$ y luego se normalizó a un número de Schmidt de 600 ($Sc=600$, para CO₂ a 20 °C), con el fin de obtener la velocidad de transferencia del gas normalizada (k_{600}) según Jähne *et al.* (1987).

Se estimó la máxima velocidad de transferencia de gases teóricamente posible con base en la mayor velocidad del viento medida *in situ* empleando el modelo de renovación de superficie (*surface renewal model*, SRM) k_{600_SRM} :

$$k_{600_SRM} = A 600^{-n} (\epsilon \nu)^{1/4}, \quad (3)$$

donde A es el coeficiente de proporcionalidad, n es 0,5, ϵ es la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta calculada de acuerdo con la ecuación (4), y ν es la viscosidad cinemática dependiente de la temperatura del agua.

$$\epsilon = u^{*3} / (\kappa z); u^* = \left(\frac{\rho_a C_d U^2}{\rho_w} \right)^{0.5}, \quad (4)$$

donde u^* es la velocidad de fricción calculada a partir del esfuerzo cortante en la interfaz agua-atmósfera siguiendo a MacIntyre *et al.* (2002), κ es la constante de von Karman (0,41), z es la profundidad del agua de la estimación (0,15 m), ρ_a y ρ_w son la densidad del aire y del agua, respectivamente, U es la velocidad del viento medida a 2 m por encima de la superficie del agua y C_d es el coeficiente de dragado considerando la estabilidad atmosférica según Verburg & Antenucci (2010). Los resultados establecieron que la tasa de disipación teórica máxima, ϵ (Ec (6.1)), y la viscosidad cinemática máxima (ν) fueron $4 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{s}^{-2}$ y $9,15 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Para ser conservadores, se utilizó el coeficiente de proporcionalidad máximo reportado en la literatura ($A = 1,46$) (Esters *et al.*, 2017), y se obtuvo una k_{600_max} de ~ 30 cm h⁻¹ para la máxima velocidad del viento medida (13 m s⁻¹). Los resultados mayores a este valor de referencia se descartaron, asumiendo la presencia de burbujas durante la medición.

Modelos de k_{600} y ajuste

Se hizo una exhaustiva revisión de la literatura científica en busca de modelos de k_{600} derivados de lagos, embalses, océanos, estuarios y algunos ríos. Tales modelos proponen la estimación de k_{600} en relación con la velocidad del viento normalizada, U_{10} . Al examinar

en detalle los modelos, se encontraron patrones definitorios de tipos de modelos: lineales, bilineales, cuadráticos, cúbicos, exponenciales, potenciales y polinómicos. Por último, se eligieron expresiones representativas de cada tipo de modelo utilizado ampliamente en la parametrización de k_{600} a partir de mediciones en ambientes hidrodinámicamente similares: embalses, lagos y estuarios. Se descartaron algunos tipos de modelo que aplican para otros sistemas, por ejemplo, los modelos cúbicos que se emplean para los océanos.

Se calcularon las regresiones lineales entre los resultados de k_{600} estimados a partir de las mediciones *in situ* (k_{600_estim}) y los obtenidos de los modelos (k_{600_model}). Para calificar el ajuste de la regresión, se utilizó el coeficiente de determinación (r^2), y se siguió el estándar convencional presentado por **Schober & Schwarte** (2018) para su valoración.

Se registró, además, el valor de la pendiente y del intercepto: el más cercano a 1 y el más cercano a 0, respectivamente, indicaron el mejor ajuste del modelo. Finalmente, se estimó el porcentaje de error:

$$\% \text{ error} = \frac{\text{valor estimado con modelo} - \text{valor medido}}{\text{valor medido}} \quad (5)$$

Resultados

Mediciones *in situ*

Las mediciones continuas de las variables meteorológicas tomadas durante el periodo de estudio arrojaron lo siguiente: la temperatura superficial del agua en el embalse Porce III permaneció cálida, en un rango entre los 22,4 y los 28,7 °C, y la velocidad del viento, U_{10} , varió entre 0 y 13,0 m s⁻¹. La columna de agua se mantuvo débilmente estratificada. Durante los periodos de luz solar, la capa superficial (0-5 m) presentó sobresaturación de oxígeno. La pluma del río Porce fue constantemente intrusiva, excepto en el periodo de lluvias de noviembre de 2018, cuando viajó por el fondo promoviendo un ambiente óxico en la zona más profunda del embalse. Este fenómeno contrastó con la anoxia observada en las demás campañas de monitoreo. Las características de la columna de agua se presentan más ampliamente en **Bohórquez-Bedoya et al.** (2023).

Durante las mediciones discretas de los flujos de CH₄ con cámaras flotantes se registró una velocidad del viento entre 0,5 y 7,8 m s⁻¹ y una temperatura del agua estable, entre 23,6 y 27,8 °C, lo que se espera en condiciones tropicales sin variaciones abruptas de la temperatura atmosférica a lo largo del año; además, la mayoría de las mediciones se realizaron durante las horas del día (**Tabla 2**). Los flujos de CH₄ (n = 20) variaron entre 0,05 y 2,36 mmol m⁻²d⁻¹; las concentraciones de CH₄ en el agua (C_w) fueron las típicas, de $\sim 1 \times 10^{-1} \mu\text{mol L}^{-1}$, aunque tres mediciones resultaron en valores de $\sim 7 \times 10^1 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $\sim 3,5 \times 10^2 \mu\text{mol L}^{-1}$ en P1 y P3, dos de ellas durante una temporada de fuerte sequía (feb/2019). La concentración de equilibrio de CH₄, que depende de la temperatura superficial del agua, permaneció alrededor de $2,5 \times 10^{-3} \mu\text{mol L}^{-1}$ y la k_{600} estimada a partir de los datos *in situ* varió entre 0,01 y 27,7 cm h⁻¹.

Tabla 2. Síntesis de los principales resultados de las mediciones *in situ* y estimaciones en superficie durante las mediciones discretas con cámaras flotantes (n = 20)

Medición o estimación	Mínimo	Máximo	Media ± desviación estándar
F_{CH_4} (mmol m ⁻² d ⁻¹)	0,05	2,36	1,20 ± 0,74
C_w (μmol L ⁻¹)	0,10	369,70	0,42 ± 0,54 ^a
T_w (°C)	23,60	27,80	25,7 ± 1,0
U_{10} (m s ⁻¹)	0,50	7,80	4,1 ± 2,2
k_{600} (cm h ⁻¹)	0,01	27,70	13,8 ± 9,5

^a Excluyendo tres datos extremos: 336,8, 69,3 y 369,7 μmol L⁻¹

A lo largo del periodo de estudio, el embalse fue una fuente continua de emisiones de metano a la atmósfera, alcanzando las más altas en la zona cercana al afluente principal. Durante las épocas de sequía, cuando los niveles del embalse eran bajos, tanto las emisiones como las concentraciones superficiales de CH₄ fueron mayores y se distribuyeron más irregularmente en comparación con los periodos de lluvia y los niveles de agua altos. El comportamiento espacial y temporal de los flujos y concentraciones de metano se encuentran descritos en detalle en **Bohórquez-Bedoya *et al.* (2023)**.

Ajuste de los modelos de k_{600}

Los valores resultantes de aplicar los modelos representativos enumerados del 1 al 6 en la **tabla 3** (k_{600_model}), mostraron coeficientes de determinación similares con respecto a los resultados de k_{600} medidos *in situ* (k_{600_estim}), todos ellos entre 0,59 y 0,66 (**Figura 2**). Estos resultados demuestran una fuerte correlación entre los modelos y la variable medida *in situ*, lo que demuestra que la velocidad del viento es, en efecto, una variable adecuada para estimar la velocidad de transferencia de los gases en el embalse Porce III.

Los modelos 1, 2 y 5 presentaron pendientes elevadas, de 2, 3,5 y 2,3, respectivamente, frente a los modelos 3, 4 y 6, que presentaron pendientes más cercanas a 1 (1,2, 1,3 y 1,5, respectivamente). La dispersión de los puntos alrededor de la línea 1:1 en la **figura 2** demuestra que los modelos 4 y 6 se ajustaron mejor a la magnitud de los datos medidos que los demás modelos, cuyos resultados de k_{600_model} se concentraron en velocidades de transferencia de gases bajas, de $k_{600_model} < 15 \text{ cm h}^{-1}$, en tanto que las estimaciones *in situ* se extendieron hasta valores de $k_{600_estim} \sim 28 \text{ cm h}^{-1}$ para las velocidades del viento más altas medidas con las cámaras flotantes. Aunque todos los modelos probados subestimaron las velocidades de transferencia de gases a juzgar por las pendientes resultantes en la regresión lineal, los modelos 3, 4 y 6 representaron mejor los datos medidos. Entre los modelos con mejor ajuste, el modelo 6 tuvo un intercepto más cercano a 0 (-2,9) que el modelo 4 (-8) y el modelo 3 (+3,1). Por otro lado, el modelo 3 reprodujo mejor las bajas velocidades de transferencia de gases ($k_{600_estim} < 10 \text{ cm h}^{-1}$) y el modelo 4 los datos cuando $k_{600_estim} > 15 \text{ cm h}^{-1}$.

Tabla 3. Modelos representativos de k_{600} propuestos en la literatura

Referencia	Ambiente	Modelo k_{600} de (cm h^{-1})	Tipo de modelo
1 (Liss & Merlivat, 1986)	Lago	$k_{600} = 0,17U_{10}$ $U_{10} < 3,6 \text{ m/s}$ $k_{600} = 2,85U_{10} - 9,65$ $3,6 \text{ m/s} < U_{10} < 13 \text{ m/s}$	Bilineal de coeficiente pequeño
2 (Cole & Caraco, 1998)	Lago	$k_{600} = 0,215U_{10}^{1.7} + 2,07$	Potencial
3 (Crusius & Wanninkhof, 2003)	Lago	1) $k_{600} = 0,72U_{10}$ $U_{10} < 3,7 \text{ m/s}$ $k_{600} = 4,33U_{10} - 13,3,$ $U_{10} \geq 3,7 \text{ m/s}$	Bilineal con coeficiente medio
4 (Borges <i>et al.</i> , 2004b)	Estuario	$k_{600} = 2,580U_{10} + 4,045$	Lineal
5 (Guérin <i>et al.</i> , 2007)	Embalse	2) $k_{600} = 1,66e^{0,26U_{10}}$	Exponencial
6 (MacIntyre <i>et al.</i> , 2010)	Lago	$k_{600} = 2,25U_{10} + 0,16$	Lineal con intercepto cercano a 0

Según los resultados, ninguno de los modelos tomados de la literatura parece adaptarse completamente a las condiciones del embalse Porce III, aunque es claro que los modelos lineales se ajustaron mejor. Por otro lado, del ajuste lineal de los resultados de k_{600} estimado a partir de mediciones directas con cámaras flotantes en el embalse Porce III se obtuvo que la pendiente de la relación k_{600} vs U_{10} fue cercano a 3,4 (Figura 3).

Estimación del error

La estimación del error de los modelos seleccionados demostró que usualmente, pero no siempre, subestiman la velocidad de transferencia en el embalse (Figura 4). Sobre la base de todas las estimaciones, los errores fluctuaron de -97 a 86,5 %. Sin embargo, las mediciones *in situ* que resultaron en k_{600} menores a 1 cm h⁻¹ fueron extremadamente sensibles en el cálculo del error y arrojaron sobreestimaciones con altos porcentajes de error, del orden de cientos de miles (Figura 4a). A excepción de los k_{600} estimados con base en las mediciones, la $k_{600_estim} < 1$ cm h⁻¹, el modelo 4 de **Borges et al.** (2004 b), evaluado para un estuario, registró los mayores porcentajes de error por sobreestimación,

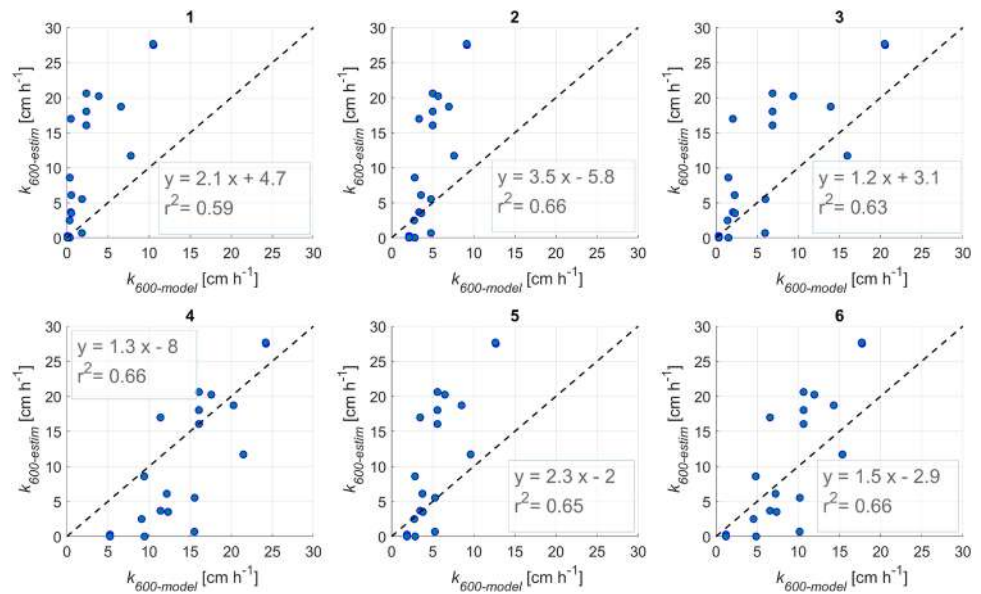


Figura 2. Velocidad de transferencia de gases estimada de los flujos de CH₄ (k_{600_estim}) versus modelada a partir de los modelos 1 a 6 presentados en la tabla 3 (k_{600_model}): 1. Bilineal de coeficiente pequeño. 2. Potencial. 3. Bilineal con coeficiente medio. 4. Lineal. 5. Exponencial. 6. Lineal con intercepto cercano a 0

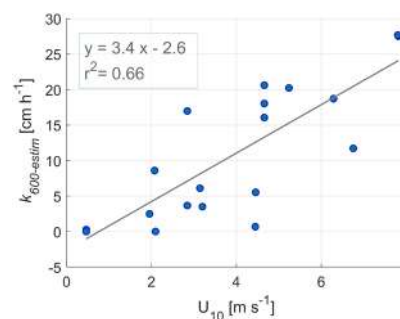


Figura 3. Velocidad de transferencia de gases estimada de los flujos de CH₄ (k_{600_estim}) versus velocidad del viento a 10 m sobre la superficie del embalse

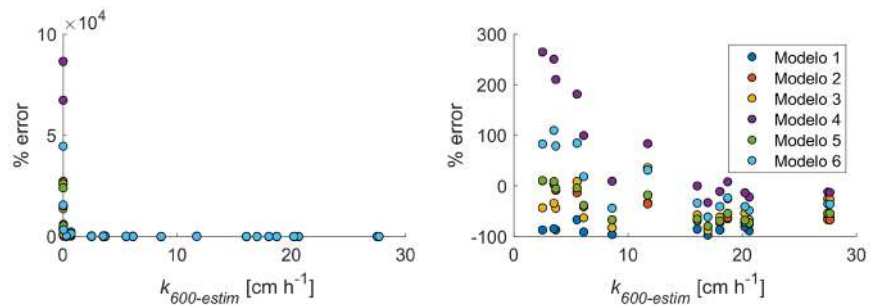


Figura 4. Porcentaje de error de las estimaciones a partir de los modelos evaluados (modelos 1-6) con respecto a las mediciones *in situ*. **a)** Todos los valores de k_{600} . **b)** Sólo valores de $k_{600} \geq 1 \text{ cm h}^{-1}$

especialmente en el rango de $k_{600} < 6 \text{ cm h}^{-1}$, en el que el error máximo encontrado fue de 264 %, cuando la mayoría de los modelos subestiman el valor medido *in situ* en porcentajes de error negativos y sin sobrepasar -97 % (**Figura 4b**).

Discusión

La mayoría de los resultados de flujos de CH_4 en el Porce III utilizados en este estudio se obtuvieron en el punto más cercano a la presa, donde debido a las profundidades de más de 100 m, se veían menos afectados por las burbujas, lo que coincide con la mayoría de los modelos en otros sistemas, usualmente centrados en las mediciones hechas en áreas abiertas de lagos y embalses (Cole & Caraco, 1998; Crusius & Wanninkhof, 2003; Guérin *et al.*, 2007), lo que puede constituir un factor importante a la hora de comparar entre estudios. Sin embargo, la zona de monitoreo en el embalse no es la única condición que puede generar diferencias entre estudios en la estimación de la k_{600} . La mayoría de los modelos propuestos en la literatura provienen de mediciones en sistemas ubicados en zonas templadas y altas latitudes, con características físicas distintas a las encontradas en sistemas tropicales de montaña. Variables como el área (Read *et al.*, 2012), la presencia de barreras topográficas (Klaus & Vachon, 2020), el método de medición (MacIntyre, 1995) o el comportamiento de la estructura térmica de la superficie (Pernica *et al.*, 2014) también pueden influir en la obtención de resultados distintos entre estudios.

En efecto, aunque los resultados de nuestro estudio evidenciaron que el ajuste (r^2) de los modelos evaluados fue fuerte, tendieron a subestimar los valores de k_{600} obtenidos en el embalse Porce III. En particular, el modelo potencial (casi cuadrático) de Cole & Caraco (1998), ampliamente utilizado para estimar k_{600} (Poindexter *et al.*, 2016), fue el que más subestimó los valores de k_{600} estimados a partir de los datos de campo, los cuales estuvieron 3,5 veces por encima de los predichos por el modelo. Por otro lado, los modelos lineales de Borges *et al.* (2004) y MacIntyre *et al.* (2010) reprodujeron mejor los resultados según la pendiente obtenida de la regresión lineal cercana a 1. En el caso del modelo de MacIntyre *et al.* (2010), se observó que, excepto por la latitud, las condiciones bajo las cuales se estimó fueron similares a las condiciones de este estudio. Estos autores propusieron el modelo a partir de las mediciones registradas durante el verano en un lago boreal de área similar al embalse Porce III (lago Meräsjarvi en Suecia, 3,82 km²), donde la velocidad del viento y la temperatura superficial del agua permanecieron en rangos entre los 0 y los 12 m s⁻¹ y alrededor de 20 °C, respectivamente. Por otro lado, en el caso del modelo de Borges *et al.* (2004b), los porcentajes de error fueron muy altos en $k_{600} < 6 \text{ cm h}^{-1}$, lo que indica sobreestimación. La disminución consistente del error con el aumento de k_{600} puede atribuirse a la naturaleza de su cálculo, pues los bajos valores de referencia son más sensibles a cambios que los valores más altos.

Habiendo observado que los modelos lineales se ajustaron mejor a los datos del sitio de estudio que otros tipos de modelo, se hizo el ajuste lineal entre la velocidad de transferencia de gases estimada a partir de los datos de campo y la velocidad del viento normalizada

a 10 m. Se observó que el coeficiente de ajuste lineal fue de 3,4, lo que representa bien todo el rango de mediciones (aproximadamente $0,5 < U_{10} < 8,0 \text{ m s}^{-1}$). Este valor de la pendiente es mayor que la de los modelos lineales propuestos en la literatura, cuyo coeficiente para embalses o lagos con bajas velocidades de viento ($< 4 \text{ m s}^{-1}$) se encuentra usualmente entre 0,2 y 1 (Crusius & Wanninkhof, 2003; Deacon, 1977; Liss & Merlivat, 1986; Rik Wanninkhof *et al.*, 1987). Algunos estudios han propuesto coeficientes entre 2,0 y 2,78 (Borges *et al.*, 2004b; MacIntyre *et al.*, 2010; Vachon *et al.*, 2010; Wanninkhof *et al.*, 1985) y pocos de los modelos propuestos previamente presentan coeficientes similares al obtenido en este estudio. Borges *et al.* (2004a) encontraron coeficientes de 3,5 y 3,6 en dos estuarios de Europa, mientras que en lagos y embalses los coeficientes similares o superiores a los de este estudio son escasos, en tanto que en sistemas lóticos se han propuesto valores altos de pendiente, entre 7,1 y 10,0 (Alin *et al.*, 2011; Beaulieu *et al.*, 2012), lo que indica que el uso directo de la mayoría de los modelos lineales propuestos en la literatura para cuerpos de agua léticos podría conllevar a subestimaciones de k_{600} en embalses tropicales de montaña.

Los aspectos morfológicos tienen un papel crucial en la magnitud de k_{600} en la medida en que pueden influenciar la respuesta del sistema ante los forzantes hidrometeorológicos. En consecuencia, la velocidad del viento sirve para una primera estimación, pero tiene limitaciones a la hora de representar, por sí sola, el comportamiento de k_{600} , por lo que deben considerarse otros aspectos que modulan la respuesta de la turbulencia al viento (Klaus & Vachon, 2020; Vachon *et al.*, 2010). Por ejemplo, a mayor longitud del *fetch* (longitud afectada uniformemente por una velocidad y dirección del viento), mayor la altura del oleaje y mayor turbulencia, y, en consecuencia, mayores valores de k (Vachon *et al.*, 2010). Por tanto, la longitud del *fetch* y el área superficial del sistema pueden ser parámetros que mejoren la predictibilidad de los modelos. En el Porce III, en particular, la morfología elongada y el carácter encañonado favorecen que la dirección predominante del viento sea en el sentido de la mayor longitud del embalse (Bohórquez-Bedoya *et al.*, 2023), lo que podría producir una respuesta más eficiente de la turbulencia ante la velocidad del viento.

Otro factor reconocido que puede aumentar la magnitud de la turbulencia y de k es la convección por enfriamiento de la superficie que genera flujo boyante (MacIntyre *et al.*, 2001). Durante las mediciones *in situ* la aparición de este fenómeno podría explicar la subestimación de k a partir de la velocidad del viento considerada como único forzante, suponiendo que el flujo boyante estuviera incrementando simultáneamente la turbulencia. Sin embargo, desestimamos esta hipótesis porque en la zona de estudio se ha demostrado que el flujo boyante y su efecto sobre la superficie es despreciable frente al efecto de la velocidad del viento (Bohórquez-Bedoya, 2023).

Por otro lado, al analizar los datos físicos y biogeoquímicos de un embalse tropical, MacIntyre *et al.* (2021) demostraron que la turbulencia y, por ende, la velocidad de transferencia de gases, aumentaron en los períodos de calentamiento de la superficie del agua y a las bajas velocidades del viento típicas de sistemas tropicales ($< 4 \text{ m s}^{-1}$), y que el incremento de la turbulencia fue mayor que el esperado con la velocidad del viento solamente. Este comportamiento podría coincidir con los resultados obtenidos en este estudio, pues la mayoría de las muestras se tomó en períodos de calentamiento de la superficie del embalse Porce III, lo que ocurre entre las 8:00 y las 16:00 (Bohórquez-Bedoya, 2023), y la velocidad del viento promedio es cercano a 4 m s^{-1} .

Otra explicación de la subestimación de k_{600} en los modelos basados en la velocidad del viento es la presencia de microburbujas de metano en la superficie (McGinnis *et al.*, 2015). Los autores proponen que el rompimiento de las olas, la precipitación o la supersaturación de metano en la capa superficial introduce microburbujas en esta zona de los lagos y los embalses. Sin embargo, probar esta teoría no es posible a partir de los resultados de nuestro estudio. Un acercamiento podría hacerse a través de la determinación de k_{600} con base en otro gas diferente al metano y comparar los resultados de ambos gases. Varios autores han encontrado que la k_{600} proveniente de mediciones de metano *versus* CO_2 evidencian la

presencia de microburbujas de metano que elevan la k_{600} medida (McGinnis *et al.*, 2015; Paranaíba *et al.*, 2018; Prairie & Giorgio, 2013). Desafortunadamente, en este estudio no se obtuvieron valores de k_{600} a partir de mediciones de un gas diferente al metano.

Agradecimientos

A Empresas Públicas de Medellín (EPM) por su apoyo durante el trabajo de campo y la información de soporte. A Victoria Ramírez-Rivera, Lina María Ramírez-Morales, Ricardo Román-Botero, Óscar Darío Beltrán-Pérez y Andrés Felipe Monsalve-Salazar por su participación en el trabajo de campo y los análisis de laboratorio. A la Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira por la financiación del presente trabajo a través de la Convocatoria de proyectos para el fortalecimiento de la investigación y la innovación de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira 2019-2021.

Contribución de los autores

EBB: conceptualización, recolección de datos de campo, integración de datos, cálculos, análisis e interpretación de datos, revisión de la literatura, redacción del artículo; JAGC: revisión de la literatura, integración de datos, cálculos, análisis de los resultados; AGG: conceptualización, recolección de datos de campo, análisis de los resultados, supervisión de la redacción del manuscrito; JGLH: diseño de la investigación, conceptualización, recolección de datos de campo, obtención de financiación.

Conflicto de intereses

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

Referencias

- Abe, D.S., Adams, D.D., Sidagis Galli, C.V., Sikar, E., Tundisi, J.G., Galli, C.V.S., Sikar, E., Tundisi, J.G. (2005). Sediment greenhouse gases (methane and carbon dioxide) in the Lobo Broa Reservoir, São Paulo State, Brazil: Concentrations and diffuse emission fluxes for carbon budget considerations. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 10(4), 201-209. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2005.00277.x>
- Alin, S. R., Rasera, M. de F.F.L., Salimon, C.I., Richey, J.E., Holtgrieve, G.W., Krusche, A.V., Snidvongs, A. (2011). Physical controls on carbon dioxide transfer velocity and flux in low-gradient river systems and implications for regional carbon budgets. *Journal of Geophysical Research*, 116(G1), G01009. <https://doi.org/10.1029/2010JG001398>
- Amorocho, J. & DeVries, J.J. (1980). A new evaluation of the wind stress coefficient over water surfaces. *Journal of Geophysical Research*, 85(C1), 433-442. <https://doi.org/10.1029/JC085iC01p00433>
- Barros, N., Cole, J.J., Tranvik, L.J., Prairie, Y.T., Bastviken, D., Huszar, V.L.M., del Giorgio, P., Roland, F. (2011). Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience*, 4(9), 593-596. <https://doi.org/10.1038/ngeo1211>
- Bastviken, D., Cole, J.J., Pace, M.L., Van de-Bogert, M.C. (2008). Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH₄ emissions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(2), 1-13. <https://doi.org/10.1029/2007JG000608>
- Bastviken, D., Cole, J., Pace, M., Tranvik, L. (2004). Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*, 18(4), 1-12. <https://doi.org/10.1029/2004GB002238>
- Beaulieu, J. J., Shuster, W. D., Rebolz, J. A. (2012). Controls on gas transfer velocities in a large river. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 117(G2), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2011JG001794>
- Bohórquez-Bedoya, E. (2023). Physical processes influence on the dynamics of the main greenhouse gases in mountain tropical reservoirs [Ph.D. thesis]. Universidad Nacional de Colombia and University of Kaiserslautern-Landau. DOI: 10.26204/KLUEDO/7341
- Borges, A.V., Delille, B., Schiettecatte, L.S., Gazeau, F., Abril, G., & Frankignoulle, M. (2004 a). Gas transfer velocities of CO₂ in three European estuaries (Randers Fjord, Scheldt, and Thames). *Limnology and Oceanography*, 49(5), 1630-1641. <https://doi.org/10.4319/lo.2004.49.5.1630>

- Borges, A.V., Vanderborght, J.P., Schiettecatte, L. S., Gazeau, F., Ferrón-Smith, S., Delille, B., Frankignoulle, M.** (2004 b). Variability of the gas transfer velocity of CO₂ in a macrotidal estuary (the Scheldt). *Estuaries*, 27(4), 593-603. <https://doi.org/10.1007/BF02907647>
- Cole, J. & Caraco, N. F.** (1998). Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic the addition of SF₆. *Limnology and Oceanography*, 43(4), 647-656.
- Crusius, J. & Wanninkhof, R.** (2003). Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake. *Limnology and Oceanography*, 48(3), 1010-1017.
- Deacon, E. L.** (1977). Gas transfer to and across an air-water interface. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 29(4), 363. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v29i4.11368>
- Deemer, B. R., Harrison, J. A., Li, S., Beaulieu, J. J., Delsontro, T., Barros, N., Bezerra-Neto, J. F., Powers, S. M., Santos, M. A. D. O. S., Vonk, J. A., Dos Santos, M. A., Vonk, J. A.** (2016). Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis. *BioScience*, 66(11), 949-964. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>
- Donis, D., Flury, S., Spangenberg, J. E.** (2017). Full-scale evaluation of methane production under oxic conditions in a mesotrophic lake. *Nature Communications*, 8(1661), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01648-4>
- Guérin, F., Abril, G., Serça, D., Delon, C., Richard, S., Delmas, R., Tremblay, A., Varfalvy, L.** (2007). Gas transfer velocities of CO₂ and CH₄ in a tropical reservoir and its river downstream. *Journal of Marine Systems*, 66(1-4), 161-172. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2006.03.019>
- Guérin, F. & León, J. G.** (2015). *Greenhouse gas (CO₂ and CH₄) emissions from a high altitude hydro-electric reservoir in the tropics (Riogrande II, Colombia)*. Geophysical Research Abstracts.
- Günthel, M., Donis, D., Kirillin, G., Ionescu, D., Bizic, M., McGinnis, D. F., Grossart, H. P., Tang, K. W.** (2019). Contribution of oxic methane production to surface methane emission in lakes and its global importance. *Nature Communications*, 10(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13320-0>
- Klaus, M. & Vachon, D.** (2020). Challenges of predicting gas transfer velocity from wind measurements over global lakes. *Aquatic Sciences*, 82(3), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00027-020-00729-9>
- León, J.G.** (2020). *Cuantificación de emisiones de GEI en un embalse de montaña recientemente inundado: Caso de El Quimbo - GEIMBO*. Quinto informe de avance.
- León, J. G., Rojas, M., Ambiental, Á.** (2020). Estimación de Flujos Difusivos de CO₂ en Embalses Tropicales Mediante El Uso Conjunto De La Teledetección, La Modelación De Concentraciones Superficiales Del Gas y K600. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 11(2), 179-196. <https://doi.org/10.22490/21456453.3587>
- Liss, P.S. & Merlivat, L.** (1986). Air-Sea Gas Exchange Rates: Introduction and Synthesis. In *The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling*. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4738-2_5
- MacIntyre, S.** (1995). Trace gas exchange in freshwater and coastal marine systems. *Methods in Ecology*, en: Matson PA, Harriss RC (eds) Biogenic trace gases: measuring emissions from soil and water. Wiley, New York, pp 52-97.
- MacIntyre, S., Amaral, J.H.F., Melack, J.M.** (2021). Enhanced Turbulence in the Upper Mixed Layer Under Light Winds and Heating: Implications for Gas Fluxes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(12), 1-36. <https://doi.org/10.1029/2020JC017026>
- MacIntyre, S., Eugster, W., Kling, G.W.** (2001). *The critical importance of buoyancy flux for gas flux across the air-water interface*. In: *Gas Transfer at Water Surfaces*, edited by M.A. Donelan, W.M. Drennan, E.S. Saltzman, and R. Wanninkhof. AGU.
- MacIntyre, S., Jonsson, A., Jansson, M., Aberg, J., Turney, D. E., Miller, S.D.** (2010). Buoyancy flux, turbulence, and the gas transfer coefficient in a stratified lake. *Geophysical Research Letters*, 37(24), 2-6. <https://doi.org/10.1029/2010GL044164>
- McGinnis, D. F., Kirillin, G., Tang, K. W., Flury, S., Bodmer, P., Engelhardt, C., Casper, P., Grossart, H.** (2015). Enhancing Surface Methane Fluxes from an Oligotrophic Lake: Exploring the Microbubble Hypothesis. *Environmental Science and Technology*, 49, 873-880. <https://doi.org/10.1021/es503385d>
- Ordóñez, C., DelSontro, T., Langenegger, T., Donis, D., Suárez, E. L., McGinnis, D. F.** (2023). Evaluation of the methane paradox in four adjacent pre-alpine lakes across a trophic gradient. *Nature Communications*, 14(1), 2165. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37861-7>
- Paranaíba, J. R., Barros, N., Mendonça, R., Linkhorst, A., Isidorova, A., Roland, F., Almeida, R.M., Sobek, S.** (2018). Spatially Resolved Measurements of CO₂ and CH₄ Concentration and Gas-Exchange Velocity Highly Influence Carbon-Emission Estimates of Reservoirs. *Environmental Science and Technology*, 52(2), 607-615. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05138>

- Peeters, F., Encinas-Fernández, J., Hofmann, H.** (2019). Sediment fluxes rather than oxic methanogenesis explain diffusive CH₄ emissions from lakes and reservoirs. *Scientific Reports*, 9(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36530-w>
- Pernica, P., Wells, M. G., MacIntyre, S.** (2014). Persistent weak thermal stratification inhibits mixing in the epilimnion of north-temperate Lake Opeongo, Canada. *Aquatic Sciences*, 76(2), 187-201. <https://doi.org/10.1007/s00027-013-0328-1>
- Poindexter, C. M., Baldocchi, D. D., Matthes, J. H., Knox, S. H., Variano, E. A.** (2016). The contribution of an overlooked transport process to a wetland's methane emissions. *Geophysical Research Letters*, 43(12), 6276-6284. <https://doi.org/10.1002/2016GL068782>
- Prairie, Y. T. & Giorgio, P. A.** (2013). A new pathway of freshwater methane emissions and the putative importance of microbubbles. *Inland Waters*, 3(January), 311-320. <https://doi.org/10.5268/IW-3.3.542>
- Read, J. S., Hamilton, D. P., Desai, A. R., Rose, K. C., Macintyre, S., Lenters, J. D., Smyth, R. L., Hanson, P. C., Cole, J. J., Staehr, P. A., Rusak, J. A., Pierson, D. C., Brookes, J. D., Laas, A., Wu, C. H.** (2012). Lake-size dependency of wind shear and convection as controls on gas exchange. *Geophysical Research Letters*, 39, 1-5. <https://doi.org/10.1029/2012GL051886>
- Rodríguez, D.C. & Peñuela, G.A.** (2022). Estimation of greenhouse gas emissions of a tropical reservoir in Colombia. *Journal of Water and Climate Change*, 13(2), 872-888. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.330>
- Rudd, J.W.M.** (1993). Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases. *Ambio*, 22(4), 246-248.
- Schober, P. & Schwarte, L.A.** (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia and Analgesia*, 126(5), 1763-1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- St. Louis, V.L., Kelly, C.A., Duchemin, É., Rudd, J.W.M., Rosenberg, D.M.** (2000). Reservoir Surfaces as Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: A Global Estimate. *BioScience*, 50(9), 766. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0766:RSASOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0766:RSASOG]2.0.CO;2)
- Vachon, D., Langenegger, T., Donis, D., McGinnis, D. F.** (2019). Influence of water column stratification and mixing patterns on the fate of methane produced in deep sediments of a small eutrophic lake. *Limnology and Oceanography*, 64(5), 2114-2128. <https://doi.org/10.1002/lno.11172>
- Vachon, D., Prairie, Y.T., Cole, J.J.** (2010). The relationship between near-surface turbulence and gas transfer velocity in freshwater systems and its implications for floating chamber measurements of gas exchange. *Limnology and Oceanography*, 55(4), 1723-1732. <https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.4.1723>
- Wanninkhof, R.** (2014). Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited. *Limnology and Oceanography: Methods*, 12, 351-362. <https://doi.org/10.4319/lom.2014.12.351>
- Wanninkhof, R., Ledwell, J.R., Broecker, W.S.** (1985). Gas Exchange-Wind Speed Relation Measured with Sulfur Hexafluoride on a Lake. *Science*, 227(4691), 1224-1226. <https://doi.org/10.1126/science.227.4691.1224>
- Wanninkhof, R., Ledwell, J. R., Broecker, W. S., Hamilton, M.** (1987). Gas exchange on Mono Lake and Crowley Lake, California. *Journal of Geophysical Research*, 92(C13), 14567. <https://doi.org/10.1029/JC092iC13p14567>
- Yang, L., Lu, F., Zhou, X., Wang, X., Duan, X., Sun, B.** (2014). Progress in the studies on the greenhouse gas emissions from reservoirs. *Acta Ecologica Sinica*, 34(4), 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2013.05.011>

Artículo original

Evaluación del impacto de la acidificación en la calidad del agua de la quebrada Quilcayhuanca, Ancash, Perú

Evaluation of the impact of acidification on the water quality of Quebrada Quilcayhuanca, Ancash, Perú

✉ Nestor Crisanto-Rojas¹, ✉ José Iannacone^{1,2,3,*}

¹ Laboratorio de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería ambiental, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

² Grupo de Investigación "One Health", Laboratorio de Zoología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú

³ Grupo de Investigación de Sostenibilidad Ambiental - GISA, Laboratorio de Ecología y Biodiversidad Animal (LEBA), Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú

Resumen

El retroceso glaciar expone rocas sulfuradas y promueve la meteorización *in situ*, por lo que pueden presentarse condiciones de pH ácido y altas concentraciones de metales en el agua, los sedimentos y el suelo. El objetivo de este estudio fue evaluar el impacto de la acidificación debida al retroceso glaciar en la calidad del agua de la quebrada Quilcayhuanca en Ancash, Perú, utilizando la planta *Lemna minor* y el cladóceros *Daphnia magna* en ensayos de ecotoxicidad. Se determinaron en siete puntos de muestreo los parámetros físico-químicos y la toxicidad del agua superficial (AS) y del elutriado del sedimento (ES) mediante bioensayos con *L. minor* y *D. magna*. En los análisis físico-químicos se obtuvo un pH ≤ 4 , una conductividad eléctrica (CE) de 380 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una turbidez de 113 UNT. Las concentraciones de cadmio (Cd), plomo (Pb), Níquel (Ni) y zinc (Zn) superaron el estándar de calidad ambiental (ECA) para agua de Perú, en tanto que las de As, Cd, cobre (Cu), Pb y Zn superaron la normativa canadiense de sedimentos, y la de Cd y As, el ECA para suelo de Perú. Se determinaron para el AS y ES, los valores de la concentración en los que no se observan efecto por exposición del contaminante (NOEC), los que fueron $\leq 6,25\%$ y $12,5\%$ para la clorosis, formación de hojas nuevas y número total de frondas de *L. minor* para los siete puntos de muestreo; y para el peso seco de *L. minor* solo en uno de los puntos. En el ensayo con *D. magna* se determinó una concentración efectiva media para la inmovilidad (CE_{50-48h}) de 43,55 % a 51,14%, y una concentración letal media (CL_{50-48h}) de 50 % a 57,66 % en los ensayos con ES y AS. La ecotoxicidad en el AS y el ES debida al retroceso glaciar de la quebrada Quilcayhuanca se asoció con el pH y la presencia de metales pesados.

Palabras clave: Bioensayo ecotoxicológico; *Daphnia magna*; Elutriado de sedimento; *Lemna minor*.

Abstract

Glacial retreat exposes sulfide rocks and drives *in situ* weathering; consequently, acidic pH conditions and high concentrations of metals can occur in water, sediment, and soil. The objective of this study was to evaluate the impact of acidification due to glacial retreat on the water quality of Quebrada Quilcayhuanca in Ancash, Perú, using the plant *Lemna minor* and the cladoceran *Daphnia magna* in ecotoxicity tests. The physical-chemical parameters and the surface water (SA) toxicity and sediment elutriate (SE) were determined at seven sampling points through bioassays with *L. minor* and *D. magna*. In the physical-chemical analyses, the pH was ≤ 4 , the electrical conductivity (EC) was 380 $\mu\text{S}/\text{cm}$, and the turbidity was 113 UNT. Cd, Pb, Ni, and Zn concentrations exceeded the Environmental Quality Standard (EQS) for water in Perú. In contrast, those of As, Cd, Cu, Pb, and Zn exceeded the Canadian sediment regulations, and those of Cd and As, the ECA for soil in Perú. The concentration values at which no effect from exposure to the pollutant (NOEC) was observed in SA and SE were $\leq 6.25\%$ and 12.5% for chlorosis; we registered the formation of new leaves and the total number of *L. minor* fronds for the seven points, and its dry weight only in one of the points. In the test with *D. magna*, the mean effective concentration for immobility (EC_{50-48h}) fluctuated between

Citación: Crisanto-Rojas N, Iannacone J. Evaluación del impacto de la acidificación en la calidad del agua de la quebrada Quilcayhuanca, Ancash, Perú. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185):849-867, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1950>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

José Iannacone;
joseiannacone@gmail.com

Recibido: 10 de julio de 2023

Aceptado: 23 de octubre de 2023

Publicado en línea: 8 de noviembre de 2023



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

43.55% and 51.14%, and the mean lethal concentration (LC₅₀-48h) between 50% and 57.66% in the trials for SE and SA. The ecotoxicity of SA and SE due to Quebrada Quilcayhuanca's glacier retreat was associated with the pH and the presence of heavy metals.

Keywords: Ecotoxicological bioassays; *Daphnia magna*; Sediment elutriate; *Lemna minor*.

Introducción

Los glaciares tropicales andinos constituyen importantes reservas de agua dulce de la Tierra y son considerados indicadores visibles del impacto del cambio climático (Vuille *et al.*, 2018). Los glaciares tropicales suramericanos representan más del 99 % de las reservas de agua dulce del planeta, y alrededor del 70 % de ellas se encuentran en Perú (Veettil & Kamp, 2019). El país cuenta actualmente con 18 cordilleras glaciares con cobertura y dos cordilleras glaciares extintas (INAIGEM, 2018). La más importante es la cordillera Blanca, que alberga el 25 % de los glaciares tropicales de la Tierra (INAIGEM, 2018; Magnússon *et al.*, 2020).

Perú ha perdido aproximadamente el 53 % de la superficie de su masa glaciar en cinco décadas (1962 - 2016) (INAIGEM, 2018). En cuanto a la cordillera Blanca, esta ha registrado una pérdida de masa glaciar del 30 % entre 1930 y 2014 (Schauwecker *et al.*, 2014), y un 40 % entre 1962 y 2016 (INAIGEM, 2018). La acelerada recesión de los glaciares de los Andes peruanos es un indicador de los efectos del cambio climático global en el ciclo hidrológico, ya que estos actúan como reservorios temporales que regulan la escorrentía estacional (Vuille *et al.*, 2018).

El retroceso de los glaciares de montaña tiene impacto directo en la disponibilidad actual y futura de los recursos hídricos durante los periodos de aguas bajas (Baraer *et al.*, 2012). La recesión glaciar puede afectar no solo la cantidad, sino también la calidad del agua en las regiones montañosas sujetas a desglaciación, afectando la dinámica de los ecosistemas (López-Moreno *et al.*, 2017; Vuille *et al.*, 2018; Veettil & Kamp, 2019).

El agua de deshielo glacial de la cordillera Blanca proporciona entre el 35 % y el 50 % de la descarga de agua en la cuenca del río Santa (Mark *et al.*, 2005). A medida que los glaciares de la cordillera Blanca retroceden quedan expuestos afloramientos de rocas ricas en sulfuros que entran en contacto con el aire y el agua (Fortner *et al.*, 2011; López-Moreno *et al.*, 2017). El proceso es preocupante cuando hay presencia de sulfuros en forma de piritita (FeS₂) en formaciones de rocas ígneas y depósitos sedimentarios (Valverde *et al.*, 2018). La meteorización dominante en la cordillera Blanca es de sulfuros, lo que afecta la calidad de las aguas de deshielo de la zona, generando la acidificación de estas fuentes de agua, con un pH <4, y la lixiviación de los metales (Fortner *et al.*, 2011; Gordon *et al.*, 2015; Valverde *et al.*, 2018; Grande *et al.*, 2019), lo que también se denomina drenaje ácido de rocas (DAR). Los análisis geoquímicos confirman mayores cargas de metales pesados, metaloides y metales traza en el drenaje ácido de roca (Santofimia *et al.*, 2017).

Por el otro lado, el aporte de la carga de sedimentos suspendidos de origen glaciar puede ser de alrededor del 60 % (Leggat *et al.*, 2015). Los arroyos alimentados por glaciares son una fuente importante de altas concentraciones de sedimentos (Leggat *et al.*, 2015), y la composición química de los sedimentos glaciares está estrechamente relacionada con la geología del área (Magnússon *et al.*, 2020). Los Andes peruanos tienen algunos suelos contaminados de forma natural por asociación con la geología emergente debida al drenaje ácido y a la liberación de los metales de las rocas sedimentarias expuestas por el retroceso glaciar (Schauwecker *et al.*, 2014; Grande *et al.*, 2019).

El retroceso glaciar es una amenaza potencial para la biodiversidad acuática (Cauvy-Fraunié *et al.*, 2015). El cambio en las características hidrológicas y geoquímicas del agua genera un impacto en la comunidad de macroinvertebrados bentónicos (Brighenti *et al.*, 2019).

La biota se usa ampliamente como indicador para detectar y evaluar impactos en el ecosistema de agua dulce (Jaiswal *et al.*, 2018). Uno de los bioindicadores usados para determinar la calidad del agua es la "lenteja de agua", *Lemna minor* (Caja-Molina &

Iannacone, 2021); esta especie de planta vascular macrófita flotante de agua dulce se usa en los bioensayos de toxicidad debido a su pequeño tamaño, reproducción asexual, amplia distribución en diferentes regiones geográficas y su sensibilidad a una gran variedad de contaminantes (Ziegler *et al.*, 2018). Por otro parte, la “pulga de agua”, *Daphnia magna*, es un microcrustáceo zooplanctónico bioindicador de agua dulce y consumidor primario, recomendado en los bioensayos de ecotoxicología porque es clave en los cuerpos de agua dada su sensibilidad a la contaminación, su posición en la cadena alimenticia acuática (Caja-Molina & Iannacone, 2021), su fácil mantenimiento en el laboratorio, ciclo de vida corta, alta reproducción y sensibilidad a varios químicos (Salesa *et al.*, 2022).

En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el impacto de la acidificación por el retroceso glaciar en la calidad del agua de la quebrada Quilcayhuanca en Áncash, Perú, mediante el uso de *L. minor* y *D. magna* en ensayos de ecotoxicidad.

Materiales y métodos

Área de estudio

La quebrada de Quilcayhuanca está ubicada en la cuenca hidrográfica del Santa, subcuenca de Quilcay, microcuenca de Quilcayhuanca, y es alimentada por las lagunas Tulparaju y Cuchillacocha y la quebrada Cayesh (Valverde *et al.*, 2018). La cuenca de Quilcayhuanca está a una altitud aproximada de 3.800 a 4.800 m s.n.m. (Fortner *et al.*, 2011). La cordillera Blanca es drenada por los arroyos proglaciares Quillcay y Cayesh y la zona de estudio en estas inmediaciones abarca aproximadamente 12 km desde la bocatoma de la laguna de Tulparaju y el nacimiento de la quebrada Cayesh hasta la estación de control del Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP), ubicada en el límite de los distritos de Independencia y Huaraz, provincia de Huaraz, Ancash, Perú (Figura 1).

Muestreo ambiental

Las muestras para el análisis de metales se recolectaron en siete puntos de muestreo (01 a 07) (Tabla 1, Figura 1), entre el 23 y el 24 de agosto del 2021, durante la temporada de aguas bajas cuando presentaba las características de la época hidroclimatológica de un valle glaciar de alta montaña. Se recolectaron muestras de agua superficial (AS-01 a

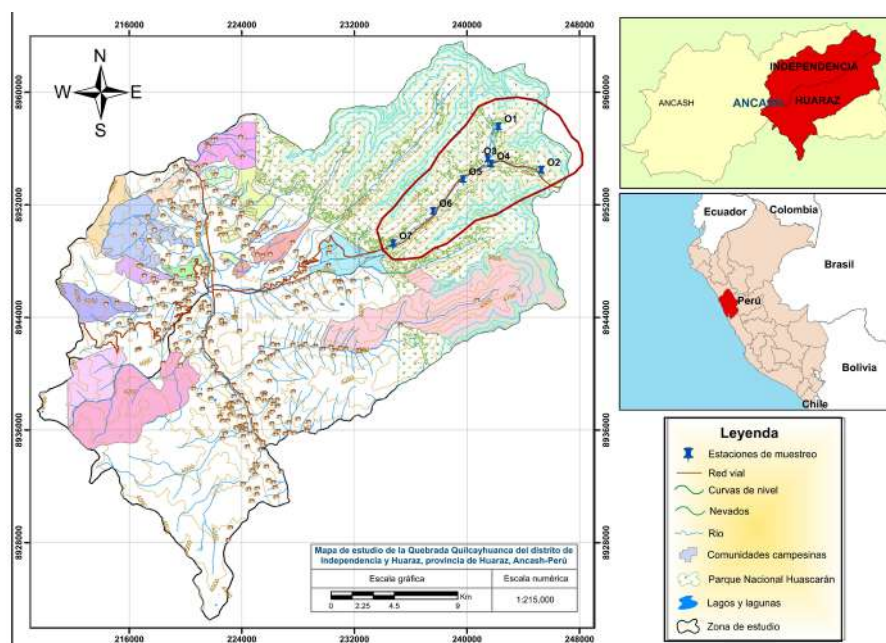


Figura 1. Zona de estudio en la quebrada Quilcayhuanca, Ancash, Perú. 01 a 07 = puntos de muestreo

Tabla 1. Puntos de muestreo en la quebrada Quilcayhuanca, Huaraz, Ancash, Perú

Puntos de muestreo				
Código	Coordenada (E)	Coordenada (S)	Altitud (m)	Descripción
01	242236	8957457	4287	Bocatoma de la laguna Tulparaju
02	245281	8954364	4364	Naciente de la quebrada Cayesh
03	241485	8955164	4072	Quebrada Quilcay; aguas abajo de la confluencia de la laguna Tulparaju y Cuchillacocha
04	241706	8954804	4110	Quebrada Cayesh, aguas arriba antes de la confluencia con la quebrada Quilcay
05	239714	8953706	3983	Quebrada Quilcayhuanca después de la confluencia de las quebradas Quilcay y Cayesh
06	237605	8951446	3884	Zona de pastoreo y bebida de animales
07	234763	8949144	3833	Estación de control de guardaparques SERNANP del Parque Nacional de Huascarán

AS-07) de 300 mL, 1.000 g de suelo (SU-01 a SU-07) y 1.000 g de sedimento (ES-01 a ES-07). Las muestras de agua (AS) se recolectaron en envases de PVC, a los cuales se les agregó ácido nítrico (HNO_3) para la conservación de cada muestra y se las transportó en una nevera enfriadora a 4 °C. Las muestras de sedimento se recolectaron en los mismos puntos de AS y se colocaron en bolsas con cierre reutilizable. Para la toma de muestras de suelo los puntos de muestreo se ubicaron a 1,5 m de la ribera de la quebrada donde se habían tomado las muestras de AS; se utilizó el método de calicatas de 10 cm y las muestras se colocaron en bolsas de cierre reutilizable conservadas y trasladadas en nevera enfriadora.

Análisis de metales

Los metales se detectaron por espectrometría de masa con plasma acoplado (ICP-MS) (US Environmental Protection Agency-EPA, 1994a); los sedimentos por digestión ácida de sedimentos, lodos y suelo y espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado (ICP-OES) (EPA, 1996; EPA, 2018), y los suelos empleando la metodología EPA (1996) y la espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado (ICP-AES) (EPA, 1994b). Todos los análisis de metales se realizaron en un laboratorio con acreditación nacional e internacional (ISO 17025) del International Accreditation Service (IAS), del Instituto Nacional de Calidad del Perú (INACAL), del Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA) y de la certificación Trinorma (normas ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001) otorgada por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

Agua superficial (AS)

Las muestras de AS-01 a AS-07 se recolectaron en siete puntos de la quebrada de Quilcayhuanca (Tabla 1). La cantidad de cada muestra recolectada por punto fue de 1.000 mL. Los parámetros registrados *in situ* fueron el pH, la conductividad eléctrica (CE), la turbidez y la temperatura (°C), utilizando un potenciómetro HANNA, un medidor de conductividad HI 8633 (HANNA), un turbidímetro HACH 2100Q y un termómetro HANNA, respectivamente. La recolección se hizo en botellas de plástico que se conservaron a 4 °C y se transportaron en nevera refrigerante.

Elutriado de sedimento (ES)

En la preparación de cada ES (ES-01 a ES-07) se mezclaron en proporción de 1:4 el sedimento con agua mineral (200 g/800 mL) durante 1 h en un agitador magnético y luego

se decantaron durante 20 h a 4 °C para separar la fase líquida del sólido. El agua mineral tenía un pH de 7,40 a 7,80; 600 a 700 mg/L de sólidos totales disueltos (STD), y 8,10 a 8,90 mg/L de oxígeno disuelto (OD).

Diseño experimental

Los bioensayos se hicieron según las guías de ensayo para *L. minor* (**Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico - OCDE, 2006**) y *D. magna* (**OCDE, 2004**) con las muestras ambientales de AS y ES. Se midieron las variables físico-químicas al inicio y al final del bioensayo y se analizaron los parámetros de STD, OD y pH con un equipo multiparámetro (SI Analytics®).

Lemna minor

Las lentejas de agua (*L. minor*) se adquirieron en un acuario debidamente registrado de Lima. Se las aclimató en recipientes de plástico con agua mineral que contenía 90 mg/L de calcio, 11 mg/L de magnesio, 32 mg/L de sodio y 6 mg/L de potasio, y se agregó “Plant Gro” Nutrafin®, el cual contiene nutrientes esenciales como nitrógeno, boro, cobre, hierro, manganeso, molibdeno y zinc (**Caja-Molina & Iannacone, 2021**), manteniéndolas bajo iluminación constante durante 15 días antes del bioensayo (**OCDE, 2006**). El bioensayo consistió en agregar 10 colonias de *L. minor*, formadas cada una por dos hojas del mismo tamaño, a los envases de plástico de 100 mL que contenían 50 mL de la muestra (**Caja-Molina & Iannacone, 2021**). El ensayo se hizo con cuatro réplicas, cinco concentraciones y un control con agua mineral usada en la preparación de los ES: 0, 6,25, 12,5, 25, 50 y 100 % (**Žaltauskaitė & Vaitonytė, 2016**); la temperatura se mantuvo a 22 °C y se empleó iluminación continua. El periodo de ensayo fue de 168 h y los parámetros finales de lectura incluyeron la formación de hojas nuevas, el número total de frondas, el peso seco, el húmedo, el porcentaje de la clorosis (50 % de pérdida de pigmento) y la ruptura de colonias (**Caja-Molina & Iannacone, 2021**).

Daphnia magna

Los cladóceros se obtuvieron en un acuario de Lima debidamente registrado. Los organismos se aclimataron durante 15 días en recipientes de plástico con agua mineral de las mismas características usadas para *L. minor*; asimismo, se les suministró diariamente la levadura *Saccharomyces cerevisiae* y la microalga *Chlorella vulgaris*. El medio de cultivo se renovó dos veces por semana para asegurar una adecuada disponibilidad de los nutrientes y eliminar los productos de excreción de los cladóceros; la temperatura se mantuvo a 22 °C con un pH promedio de 7,56, aireación constante con OD de 9,5 mg/L, fotoperiodo de 12 h de luz y 12 h de oscuridad.

Para el bioensayo se adicionaron 10 ejemplares neonatos (<24 h de nacidos) a cada envase de 30 mL que contenía 25 mL de cada concentración de prueba, en tanto que el control contenía únicamente agua mineral (**Salesa et al., 2022**). Se hicieron cuatro réplicas de los ensayos con seis concentraciones de 0, 6,25, 12,5, 25, 50 y 100 % (**Žaltauskaitė & Vaitonytė, 2016**). Los organismos no recibieron alimento durante el ensayo y la prueba se consideró válida al comprobar que el recipiente de control registraba una mortalidad menor al 10 %; los parámetros de lectura de la mortalidad e inmovilización se fijaron a las 24 h y 48 h de exposición (**OCDE, 2004**). Para la lectura de los variables se agitaron previamente los envases, con el fin de reactivar el movimiento de los organismos; el criterio de inmovilidad fue la ausencia de movimiento durante 15 s y el de la mortalidad, la ausencia de ritmo cardíaco a los 15 s verificada con el microscopio estereoscópico (**Caja-Molina & Iannacone, 2021**).

Análisis estadístico

Los resultados de los metales pesados en AS se expresaron en mg/L, y los de los sedimentos y suelos fueron en mg/kg. Las pruebas de toxicidad del AS y del ES en los dos organismos acuáticos se ajustaron a un diseño experimental de bloque completo al azar (DBCA) de 6 x 4; cada parámetro se analizó con las pruebas de normalidad y homogeneidad de

varianza utilizando las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Utilizando los datos que cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad, se evaluó la eficacia de los tratamientos mediante un análisis de varianza (ANOVA); en el caso contrario, se sometieron a la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis (K-W); cuando ambas pruebas mostraron diferencias significativas se aplicó la prueba de Turkey ($p=0,05$) para determinar la concentración más baja en la que se observaba el efecto por exposición del contaminante (LOEC) y aquella en que no se observaba el efecto por exposición del contaminante (NOEC). Para determinar la asociación entre los cuatro parámetros fisicoquímicos *in situ*, se determinaron los metales pesados que superaron los estándares de comparación en AS y ES, el LOEC de los dos efectos subletales más sensibles de *L. minor* en AS y ES, y, por último, para la concentración efectiva media (CE_{50}) y la concentración letal media (CL_{50}) de *D. magna* en AS y ES a las 48 h de exposición, se hizo un análisis de correlación de Pearson (r). Todos los datos se analizaron con el programa estadístico de cómputo SPSS, versión 24, de IBM para Windows. La CL_{50} y la CE_{50} se obtuvieron a partir de una hoja de cálculo del programa de cómputo Excel®, Probit 2ª Edición (Caja-Molina & Iannacone, 2021).

Aspectos éticos

Esta investigación fue aprobada por el comité de ética de la Universidad Científica del Sur (120-2019-PRE11). La resolución de la jefatura del Parque Nacional Huascarán (N° 008 - 2021-SERNANP-JEF) concedió el ingreso al Parque Nacional Huascarán, Ancash, Perú.

Resultados

Parámetros *in situ*

Las muestras de AS presentaron acidez (pH de 3,53 – 4,17); la CE más alta fue de 379,83 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en tanto que la turbidez fue mayor en el punto AS-02, con 113 UNT (Figuras 2 y 3). Se observó una asociación negativa entre el pH y la turbidez del agua ($r= -0,78$, $p<0,05$), y entre el pH y la CE ($r= -0,96$, $p<0,05$). El resto de parámetros *in situ* no registró correlaciones significativas ($p>0,05$).

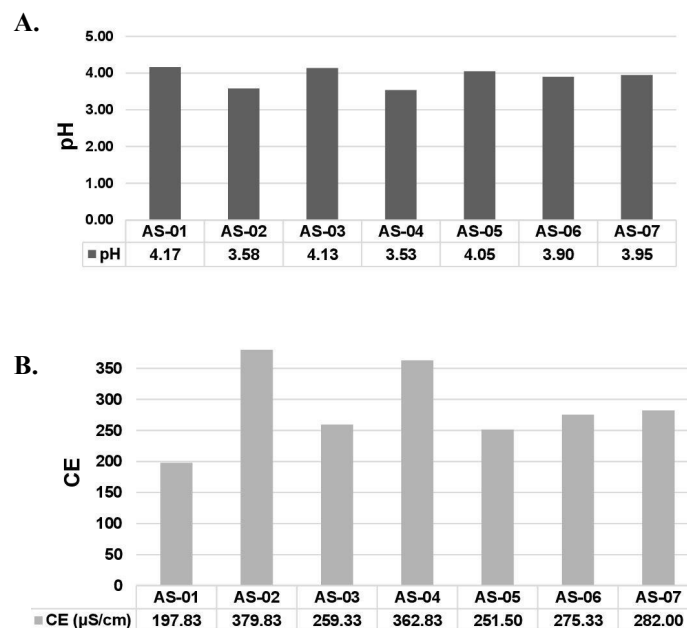


Figura 2. Parámetros *in situ* de agua superficial (AS) en siete puntos de muestreo en la quebrada Quilcayhuanca, Huaraz, Ancash-Perú. **A.** pH. **B.** CE: conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$: microsiemens por centímetro.

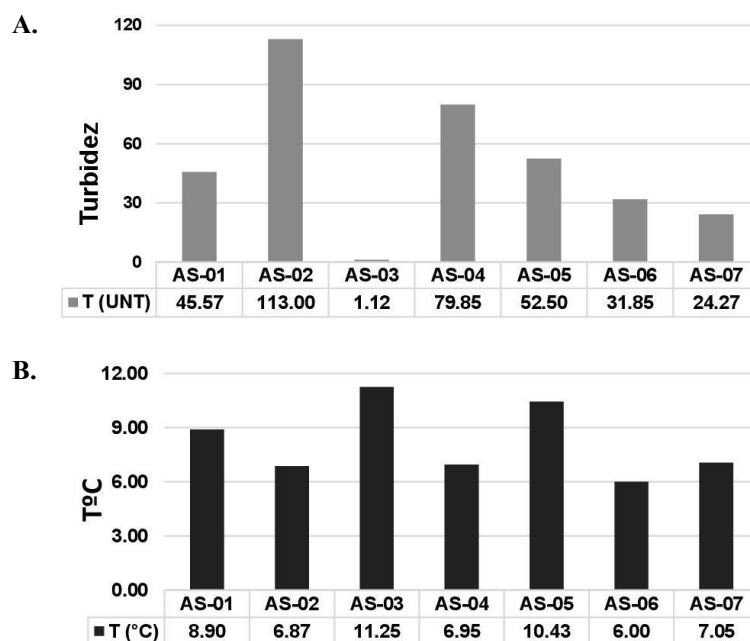


Figura 3. Parámetros *in situ* de agua superficial (AS) en siete puntos de muestreo en la quebrada Quilcayhuanca, Huaraz, Ancash-Perú. **A.** Turbidez: UNT: unidad nefelométrica de turbidez, **B.** Temperatura en grados Celsius.

Metales

Los metales totales en AS se compararon con la categoría de conservación del ambiente acuático de ríos en la costa y sierra establecida en el estándar de calidad ambiental (ECA) del agua del Perú (ECA, 2017). Se observó que el Cd, el Pb y el Zn superaron este estándar en todos los puntos y el Ni en tres puntos (Figura 4). Asimismo, las concentraciones totales de aluminio (Al), As, Cd, cerio (Ce), cobalto (Co), hierro (Fe), Ni, Pb y Zn fueron mayores en el punto AS-02; el punto AS-01 presentó mayor concentración de Ag y Cu; el punto AS-07 de B y el AS-05 de Ba (Tabla 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1950/3599>). El Ni, el Zn y el Cd en AS mostraron asociaciones significativas con el pH ($r=-0,86$ a $-0,96$; $p<0,05$), con la CE ($r=0,83$ a $0,91$; $p<0,05$) y con la turbidez ($r=0,88$ a $0,91$; $p<0,05$). Solamente el Pb evidenció una correlación positiva con la turbidez ($r=0,89$; $p<0,05$), en tanto que el Ni, el Zn y el Cd se asociaron positivamente entre sí ($r=0,78$ a $0,98$; $p<0,05$).

Los metales en los ES se compararon con la normativa para calidad de sedimentos del **Canadian Council of Ministers of the Environment - CCME** (1999). Las concentraciones de As y Cd superaron en todos los puntos el efecto probable (ISQC) y los efectos biológicos adversos (FEL), en tanto que el Pb, el Cu y el Zn superaron el ISQC en cuatro, tres y uno de los siete puntos evaluados, respectivamente (Figura 5). El punto ES-01 presentó una mayor concentración de Al, antimonio (Sb), As, bario (Ba), Cd, Cu, cromo (Cr), Ni, Pb, vanadio (V) y Zn; el punto ES-04 de Co, y el punto SE-05 de molibdeno (Mo) (Tabla 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1950/3599>). Solamente el Cu en el ES evidenció correlación negativa con la CE ($r=-0,78$; $p<0,05$). El resto de parámetros *in situ* no registró correlaciones significativas con los otros metales ($p>0,05$). En el sedimento se encontraron asociados el As y el Pb ($r=0,91$; $p<0,05$), el Pb y el Zn ($r=0,79$; $p<0,05$), y el Cu y el Cd ($r=0,74$; $p<0,05$).

Los parámetros químicos del suelo se compararon con la categoría agrícola para suelos del ECA de Perú (ECA, 2017b). Según este estándar, el Cd superó en todos los puntos el ECA, y el As en el punto SU-07 (Figura 6). El punto SU-03 presentó una mayor

concentración de Al, Cd, Cr, Li, Mo, Ni, V y Zn, en tanto que las concentraciones de Ba, Cu y Fe fueron mayores en el SU-01, las de As en el SU-07, y las de Pb en el SU-02 (Tabla 3S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1950/3599>).

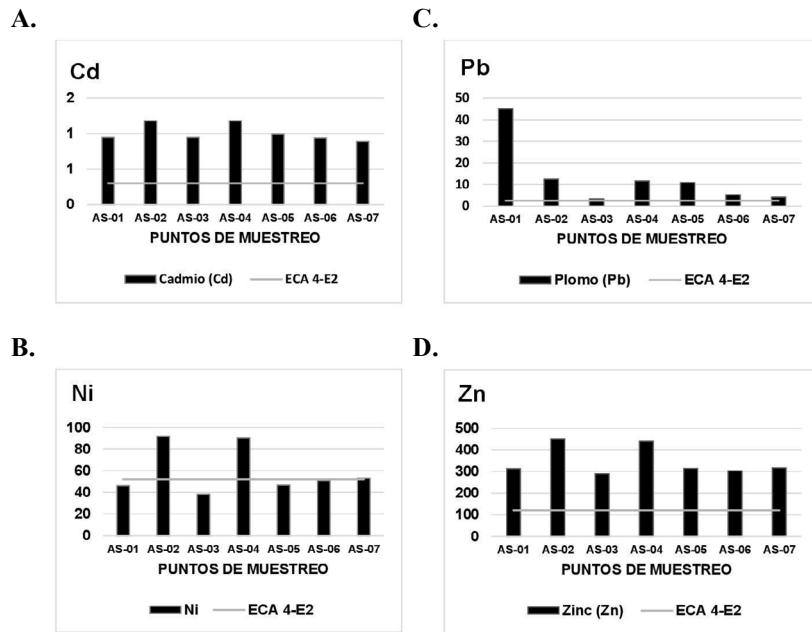


Figura 4. Metales totales (ug/L) que superaron el ECA 4-E2 de agua superficial (AS) (línea gris) en siete puntos de muestreo de la quebrada Quilcayhuanca, Huaraz, Ancash-Perú. **A.** Cadmio (Cd), **B.** Niquel (Ni), **C.** Plomo (Pb), y **D.** Zinc (Zn). C4-E2: categoría 4 y subcategoría 2, ríos, del Estándar de Calidad Ambiental de agua DS 004-2017-Ministerio de Ambiente

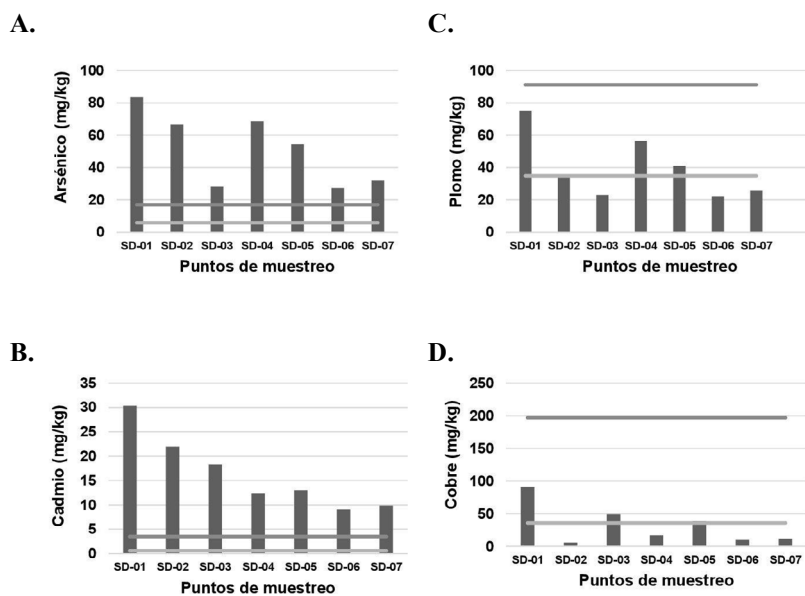


Figura 5. Metales totales (mg/kg) que superaron el ISQC (nivel de efecto probable, línea horizontal roja) y el FEL (efectos biológicos adversos, línea horizontal amarilla) de sedimento (SE) en siete puntos de muestreo de la quebrada Quilcayhuanca, Huaraz, Ancash-Perú. **A.** Arsénico (As), **B.** Cadmio (Cd), **C.** Plomo (Pd), **D.** Cobre (Cu), **E.** Zinc (Zn)

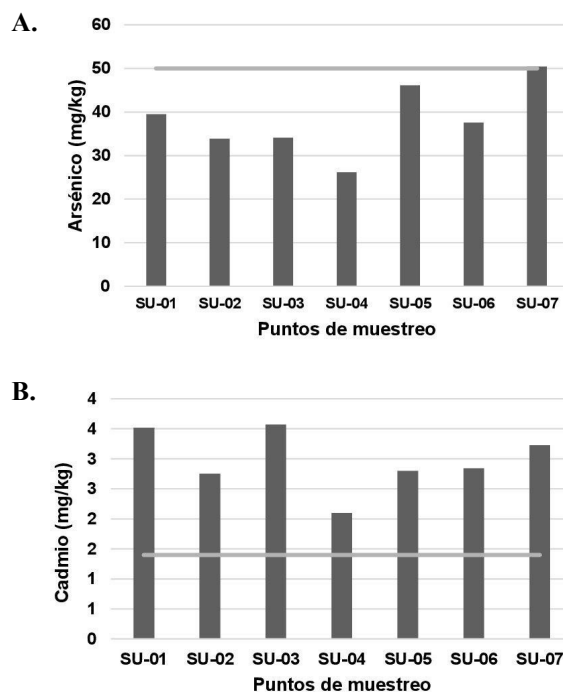


Figura 6. Metales totales (mg/kg) que superaron la categoría de uso agrícola de suelo (ECA), línea horizontal roja (SU) en siete puntos de muestreo de la quebrada Quilcayhuanca, Huaraz, Ancash-Perú. **A.** Arsénico (As). **B.** Cadmio (Cd)

Lemna minor

Las variables analizadas en el ensayo de exposición a AS y ES mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones y el control con agua mineral. Además, se determinó una CI_{50} mayor al 100 % para la ruptura de colonias. *Lemna minor* fue más sensible a la toxicidad de las muestras de los puntos AS-02 y ES-01 (Tablas 4S a 17S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1950/3599>). Por el otro lado, en los ensayos con las lentejas de agua en AS y ES los valores de LOEC a las 168 h de exposición evidenciaron una mayor toxicidad en el porcentaje de clorosis, la formación de hojas nuevas y el número total de frondas; sin embargo, el efecto en el peso seco de *L. minor*, solo se observó en el punto ES-01 (Figura 7). Al comparar las variables fisicoquímicas al inicio del bioensayo versus las 168 h de exposición, se observó un incremento del pH en todas las concentraciones, por el contrario, en los ensayos ES-01 y ES-02, estas disminuyeron a una exposición de 100% de la muestra de ES. Los resultados de STD y OD disminuyeron en todas las concentraciones en el ensayo de AS, en tanto que en el ensayo de ES, los STD disminuyeron en en las concentraciones de 0,0, 6,25, 12,5 y 25% y un incremento en las de 50 y 100 %. En los valores de OD no se observó una variación significativa (Tablas 18S - 23S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1950/3599>). El LOEC en el porcentaje de clorosis, la formación de hojas nuevas y el número total de frondas de *L. minor* no se asoció con los cuatro parámetros fisicoquímicos *in situ* ni con los metales pesados que superaron los estándares de comparación en AS y ES ($p > 0,05$).

Daphnia magna

Se observó un efecto tóxico agudo en los neonatos de *D. magna* en AS y ES a las 24 h y 48 h de exposición; en ES hubo un mayor efecto en el porcentaje de inmovilidad y de mortalidad (Tablas 24S - 37S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/>

view/1950/3599). Los valores de $CE(L)_{50}$ evidenciaron mayor toxicidad en AS-02 y en ES-01 (**Figura 8**). En cuanto al pH y los STD, se observó un incremento en los valores finales, pero en el OD no se observó un patrón significativo (**Tabla 38S al 43S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/articulo/view/1950/3599>). El Cu y Cd en el

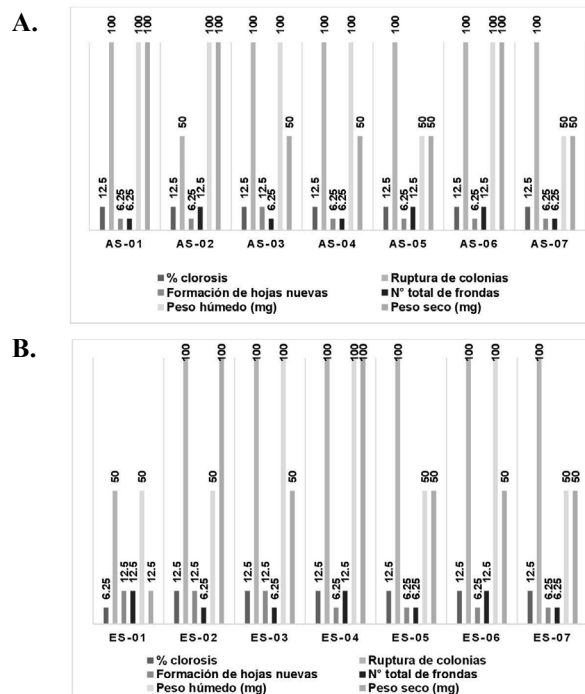


Figura 7. Efectos subletales con base en el LOEC (concentración más baja en la que se observa efecto) evaluados en el bioensayo con *Lemna minor* expuesta a: **A.** AS y **B.** ES expresado en mg/L a las 168 h de exposición

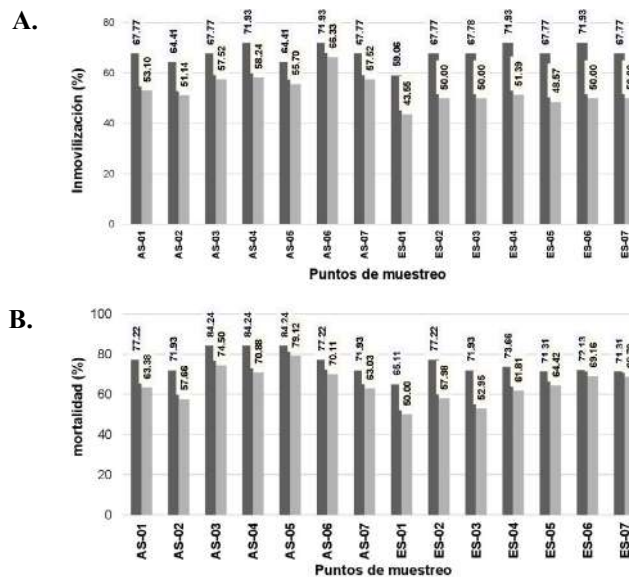


Figura 8. Efecto tóxico evaluado en el bioensayo con *Daphnia magna* expuesta a AS y ES expresado en mg/L a las 24 y 48 h de exposición. **A.** Subletal. **B.** Letal CE_{50} : concentración efectiva media. CL_{50} : concentración letal media. Barra azul: a 24 h de exposición; barra naranja: a 48 h de exposición

ES evidenciaron una correlación negativa con la CE_{50} de ES para *D. magna* a las 48 h de exposición ($r=-0,87$; $p<0,05$ y $r=-0,77$; $p<0,05$, respectivamente). Asimismo, el Cd en el ES mostró una correlación negativa con la CL_{50} de ES para *D. magna* a las 48 h de exposición ($r=-0,91$; $p<0,05$). Los demás valores de CE_{50} y CL_{50} para *D. magna* en AS y ES a las 48 h de exposición no se relacionaron significativamente con los cuatro parámetros fisicoquímicos *in situ*, ni con la presencia de metales pesados que superaran los estándares de comparación en AS y ES ($p>0,05$).

Discusión

La geología química expuesta por el retroceso glaciar de la microcuenca de Quilcayhuanca está compuesta por una formación de batolito, por la formación de Chicama y por stock andesítico. Su composición mineral incluye pirita (FeS_2), calcopirita ($CuFeS_2$) y esfalerita (ZnS) (Valverde *et al.*, 2018). La cabecera de la microcuenca de Quilcayhuanca evaluada está glaciada y el lecho rocoso está expuesto en un 17 %; se caracteriza por las formaciones de Chicama, las cuales son ricas en sulfuros, lo que conduce a la meteorización del sulfuro (Fortner *et al.*, 2011; Gordon *et al.*, 2015).

El pH ácido registrado responde a la meteorización *in situ*, y el predominio de la meteorización de sulfuros provoca la generación de sulfatos, lo que explica la liberación de iones de hidrógeno y las condiciones de acidificación extrema (Gordon *et al.*, 2015; Grande *et al.*, 2019). Fortner *et al.* (2011) y Valverde *et al.* (2018) obtuvieron resultados similares y registraron valores de pH de <4 y <3 en la quebrada Quilcayhuanca. Asimismo, en los estudios realizados en el río Negro se registraron valores de pH <4 (Grande *et al.*, 2019) y en el relativo al retroceso glaciar del nevado de Pastoruri, los manantiales y lagunas registraron valores de pH de 2,55 a 6,42 (Santofimia *et al.*, 2017). Es por ello que Magnússon *et al.* (2020) han planteado que los pH ácidos están relacionados con la alta concentración de Al, SO_4^{2-} y Fe, similar a lo observado en el análisis químico del agua.

En los puntos AS-02 y AS-04 la mayoría de los metales presentaron concentraciones altas, y en las AS, un pH ácido y una elevada conductividad eléctrica. Por ellos se sugiere que cuanto mayor sea la acidez, mayor será la concentración de metales, lo que se evidencia en los resultados del Ni, Zn y Cd en el AS, con asociaciones negativas con el pH significativas en los puntos de muestreo (Santofimia *et al.*, 2017; Grande *et al.*, 2019). La mayor solubilidad y biodisponibilidad de cationes de metales como el Ni, el Zn y el Cd depende del pH, siendo mayor cuando este es ácido (Krol *et al.*, 2020), como se observó *in situ* en la microcuenca de Quilcayhuanca. En el caso del Fe, según Valverde *et al.* (2018) las rocas expuestas por el retroceso glaciar en la zona de la naciente de la quebrada Cayesh presentan una alta concentración de óxido de hierro, lo que originaría una elevada concentración de este metal. La química del agua de deshielo está controlada por la meteorización de las rocas sulfuradas. Los análisis geoquímicos sugieren una mayor carga de metales pesados, metales traza y metaloides exportados río abajo, por lo que se puede afirmar que el drenaje ácido de rocas genera un alto grado de mineralización (Santofimia *et al.*, 2017; López-Moreno *et al.*, 2017).

Los registros, especialmente de As, Cu, Pb, Zn y Cd, en los sedimentos superaron en algunos puntos los valores de ISQC y de FEL, dos parámetros de calidad en los sedimentos que sugieren los efectos negativos de estos metales en la biota acuática de la quebrada Quilcayhuanca. Las concentraciones de metales en los sedimentos dependen de la entrada de minerales al agua, el pH y la condición redox en la interfase agua-sedimento (López-Moreno *et al.*, 2017). La cabecera de las quebradas Quilcayhuanca y Cayesh presenta una geología compuesta por arcillitas y areniscas asociada a stocks o pórfidos andesíticos compuestos por pirita, calcopirita, esfalerita y óxidos de hierro, que debido a la intensificación del cambio climático han quedado expuestas a la erosión en extensas áreas (Valverde *et al.*, 2018). Por ello, la mayoría de los metales de los sedimentos se concentran en la parte alta y reflejan la litología de los afloramientos (Navas *et al.*, 2020). Las altas concentraciones de Mg en sedimentos se relaciona con la meteorización de Chicama (Magnússon *et al.*, (2020). La literatura científica también señala el efecto

del pH sobre la liberación, biodisponibilidad y especiación de los metales a partir de sedimentos contaminados; se ha observado que, en condiciones ácidas, es más probable que se liberen por desorción los metales del sedimento al agua superpuesta, haciéndose, así, más biodisponibles (Zhang *et al.*, 2018). Con valores de pH de 3,0 a 5,0 se ha observado biodisponibilidad de residuos de Cd y Cu superiores al 50 % en el sedimento (Zhang *et al.*, 2018). En la quebrada Quilcayhuanca se infirió que hay especiación geoquímica de los metales, presentándose la fracción residual como la dominante cuando el pH estaba entre 3 y 5 comparada con las otras cuatro fracciones (intercambiable, carbonato, óxidos de Fe-Mn, y orgánicos/sulfuros) mediante el procedimiento de extracción secuencial propuesto en el método de Tessier (Zhang *et al.*, 2018; Nasnodkar & Nayak, 2019), el cual es un enfoque útil para revelar información detallada sobre la fuente, la movilización, la biodisponibilidad y la toxicidad de los metales en agua, sedimento y suelo (Nasnodkar & Nayak, 2019).

El Cd y el As superaron el ECA de suelo, categoría agrícola, aunque el AS sólo se registró en el punto SU-07. Las concentraciones de Al, Cd, Cr, (litio) Li, Mo, Ni, V y Zn fueron mayores en el punto SU-03, en tanto que las de Ba, Cu y Fe lo fueron en el SU-01 y, por último, el As fue mayor en el SU-07 y el Pb en el SU-02. Según Reyes-Nolasco (2018), la fuente de contaminación del suelo de la planicie adyacente a la quebrada Quilcayhuanca sería la meteorización de rocas expuestas por el retroceso glaciar y por el drenaje ácido de rocas.

La retención de metales en el suelo varía dependiendo de la capacidad de sorción, la que, a su vez, está relacionada con la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y pH. El Pb se concentra en el suelo en grandes cantidades; lo mismo ocurre con el Cu, el Zn, el Cd y el Ni, aunque en menores cantidades, sobre todo en los tres últimos metales (Elbana *et al.*, 2018). La presencia de metales en el suelo implica un riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Lin & Xu (2020) determinaron una mayor movilización de Cd y Zn hacia el agua subterránea, y una menor proporción de Cu cuando tales metales coexisten en el suelo.

Los metales vertidos en el sistema acuático a partir de fuentes naturales o antropogénicas se distribuyen al transportarse en fase acuosa y sedimentos debido a la adsorción, la hidrólisis y la coprecipitación, por lo que solo una pequeña parte de los iones metálicos quedan disueltos en el agua y una gran cantidad de ellos se depositan en el sedimento. Por ello, la presencia de metales pesados es mayor en los sedimentos superficiales que en el agua superficial (Outa *et al.*, 2020), tal como se observó en los valores de los metales Al, uranio (U), Zn, Cu, As, Pb, Cd, V, Ba, Cr, Ni, Co y Sb, los cuales presentaron altas concentraciones en el sedimento. En este sentido, Miranda *et al.* (2022) determinaron que aproximadamente 90 % de los metales pesados se adhieren a los sedimentos, por lo que las características físico-químicas del agua y el sedimento son fundamentales para determinar la cantidad de metales absorbidos, aunque la selectividad está determinada por las características iónicas de los metales. Akindele *et al.* (2020) también observaron que existe una relación significativa entre la concentración de ciertos metales como el Cu, el As y el Pb en la columna de agua superficial y el sedimento.

La presencia de nutrientes como el nitrógeno (N) y el fósforo (P) pueden incrementar la biodisponibilidad de los metales pesados en los sedimentos debido a la reacción de agentes quelantes, particularmente de Cu y Cr, y al mecanismo de ligandos con Zn, Pb y Ni. Las altas concentraciones de P pueden ser fuente secundaria de metales pesados que en presencia de pH ácido pueden ser liberados en forma biodisponible en la columna de agua (Miranda, *et al.*, 2021). Metales como el Co, Cu, Mn, Ni, Pb y Zn, y en menor proporción la plata (Ag), el As, el calcio (Ca), el Cd y el mercurio (Hg) son más móviles en condiciones ácidas y están presentes en fracciones intercambiables y fácilmente disponibles en estado soluble en agua, por lo que podrían ser biodisponibles para ser absorbidos por las especies acuáticas (Duodu *et al.*, 2017). A mayor concentración de iones H⁺ (pH bajo), existe una mayor concentración de P y de metales disueltos disponibles para la absorción biológica (Miranda *et al.*, 2022); es decir, con un pH < 4 la presencia de fosfatos se encuentra como

H₃PO₄ no ionizado y su capacidad de adsorción es baja (**Loganathan et al.**, 2014). La presencia de estos elementos potencialmente tóxicos, como los metales Ni, Pb, Zn y Cd, que superaron los estándares CA-E2 en el agua de la quebrada Quilcayhuanca, podría afectar inclusive los puntos de muestreo cuenca abajo, por ejemplo, el 06, que es una zona de pastoreo y de bebida para los animales, y el 07, estación de control de los guardaparques en el área natural protegida del Parque Nacional Huascarán, donde abunda el cóndor andino (*Vultur gryphus*). Existen tres centros poblados, Nueva Florida, Unchus y Chupa, con 154, 460 y 7 habitantes, respectivamente, que están muy cercanos a la quebrada Quilcayhuanca y podrían verse afectados por el consumo de agua con estos metales. Por ello, un aumento en la acidificación de estos cuerpos de agua favorecería la disponibilidad y solubilidad de los metales presentes en el sedimento y el suelo de la quebrada.

El porcentaje de clorosis en *L. minor* fue significativo después de 168 h de exposición al 100 % en AS y ES. El Cd produce una deficiencia de macronutrientes y micronutrientes como el Fe, el magnesio (Mg), el Ca, el boro (B) y el molibdeno (Mo), siendo el Mg y el Fe elementos clave en la síntesis de la clorofila; la absorción de Cd genera estrés oxidativo, por lo que las plantas producen antioxidantes como mecanismo de defensa para reducir efectos como la muerte celular (**Lu et al.**, 2018). En los resultados obtenidos se notó que las concentraciones mayores al 50 % después de 168 h de exposición producían clorosis en las frondas; **Sackey et al.** (2021) obtuvieron un resultado similar, registrando clorosis en tratamientos con muestras expuestas a concentraciones de 67 y 100 % de metales pesados.

La formación de hojas nuevas y el número total de frondas fue menor en *L. minor* a las 168 h de exposición a altas concentraciones en AS y ES. Los metales pesados como el Cd, el Pb, el Cu, el Cr y el Zn en concentraciones que superaban el LDM (Limite de detección media) habrían contribuido a la marcada inhibición del crecimiento de las frondas, pues el metabolismo celular se ve afectado; en bajas concentraciones de exposición, en cambio, la macrófita tuvo un desarrollo igual o mayor que el control debido a la presencia de oligoelementos esenciales que impulsan su crecimiento y desarrollo (**Sackey et al.**, 2021). En estudios análogos se determinó que la tasa de crecimiento de *L. minor* se vio afectada por la presencia de metales pesados (Cu, Pb, Cd, Ni) (**Žaltauskaitė & Vaitonytė**, 2016). Por ello, es posible sugerir que las concentraciones extremas de metales pesados y metaloides en condiciones de pH ácido pueden reducir el desarrollo de las hojas y las frondas de *L. minor*; como se observó en medios con pH en niveles de 4 y 5,5, los cuales redujeron el crecimiento y el metabolismo de la planta (**Zicari et al.**, 2018).

La ruptura de colonias, el peso húmedo y el seco mostraron diferencias significativas a mayor exposición en AS y ES después de 168 h de exposición. En su estudio **Žaltauskaitė & Vaitonytė** (2016) determinaron que las concentraciones superiores a 12,5 % de Pb, Ni, Cu, Cd y amoníaco produjeron una mortalidad del 100 % de *L. minor*. En concentraciones bajas de exposición, sin embargo, el peso seco fue mayor que el del control, lo que se explicaría por la presencia de nutrientes que actuarían como impulsores de la biomasa cuando hay bajas concentraciones de tóxicos. La ruptura de colonias en el presente estudio fue mayor en AS-02 y ES-01, aproximadamente de 50 % en una exposición del 100 % de la muestra de ensayo; los análisis en AS y ES denotaron la presencia de metales pesados y metaloides en altas concentraciones, similar a lo hallado por **Žaltauskaitė & Vaitonytė** (2016), así como una mayor CE y un pH ácido.

Los metales que no participan en el mantenimiento de los organismos (V, Ni, As, Cd y Pb) son peligrosos en bajas concentraciones, en tanto que los metales esenciales (Cr, Mn, Co, Cu y Zn), que cumplen un papel importante para los organismos, pueden ser tóxicos en altas concentraciones o tiempos prolongados de exposición (**Mesquita et al.**, 2022). La diferencia en la toxicidad presente en *L. minor* a las 168 h de exposición estaría asociada al porcentaje de los metales tóxicos y el pH del medio: las condiciones ácidas favorecen la biodisponibilidad de metales pesados, los cuales representan un mayor riesgo para la vida acuática (**Lee et al.**, 2015). A diferencia del Hg, las concentraciones de metales en agua superficial, sedimento y suelo evaluadas en el presente estudio superaron los LDM, lo que combinado con la condición ácida del medio y la intensificación del cambio climático,

representa un riesgo potencial para el ecosistema acuático. Sin embargo, los valores de LOEC en el porcentaje de clorosis, la formación de hojas nuevas y el número total de frondas de *L. minor* no se asociaron con el pH *in situ*, ni con metales pesados individuales como el Pb, el Zn y el Cd en AS y ES.

Daphnia magna mostró inhibición de la movilización con la exposición en AS y ES, la cual resultó en un 100 % de mortalidad e inmovilización a las 24 h y se incrementó a las 48 h de exposición con la concentración del 100 % en el ensayo; los impactos significativos se observaron en condiciones ácidas (pH<4). El impacto tóxico fue mayor en los puntos AS-02 y ES-01 en comparación con todos los ensayos realizados en AS y ES. Asimismo, se observaron efectos significativos en los ensayos de exposición al 50 %, lo que se incrementó con los tiempos de exposición de 24 h a 48 h. El parámetro de inmovilización de *D. magna* fue mayor que el de la mortalidad, resultados similares a los reportados por **Sackey et al.** (2020); además, las altas concentraciones de exposición (de 50 y 100 %) a los lixiviados con concentraciones de metales pesados como Pb, Ni, Zn y otros, inhibieron el desarrollo de *D. magna*. En nuestro estudio solamente el Cd mostró una correlación negativa con la CL₅₀ en ES para *D. magna* a las 48 h de exposición. Tampoco el pH, la CE, la turbidez *in situ* u otros metales pesados individuales se correlacionaron con respuestas letales o subletales en *D. magna*. Los resultados sugieren que el efecto tóxico observado podría deberse al efecto combinado de las variables físico-químicas y a la sinergia y antagonismo de los metales pesados.

El pH extremo, por debajo de 5,5 o mayor de 9,0, produjo mortalidad y una turbidez mayor a 10 UNT con impactos negativos en la movilidad de *D. magna* (**Chen et al.**, 2012); asimismo, el pH ácido, los altos niveles de CE y TDS, y las concentraciones de metales pesados fueron factores determinantes de la toxicidad en *D. magna* (**Lee et al.**, 2015). Este crustáceo de agua dulce es sensible a las condiciones ácidas, la presencia de metales pesados y de micronutrientes en altas concentraciones, como se ha visto corroborado por los efectos letales que la toxicidad del agua, el pH ácido (3,3) y las altas concentraciones de sulfatos y metales pesados tienen en *D. magna* (**Lee et al.**, 2015).

El impacto de los metales pesados y oligoelementos depende del medio acuoso de exposición, como se ha observado en los estudios de la toxicidad aguda con plomo y su efecto en *D. magna* (CL₅₀), la cual aumentó de 0,784 a 9,473 mg/L con la variación de pH de 5 a 9, al igual que la proporción del ion libre (Pb²⁺), la cual disminuyó con el incremento del pH; ello permite concluir que la toxicidad del Pb²⁺ fue menor en ambiente alcalino que en condiciones ácidas (**Qin et al.**, 2014). La presencia de varios metales puede tener un efecto combinado, sinérgico o antagónico, en la toxicidad del crustáceo de agua dulce; tal es el caso del Ni, que en concentraciones menores a 80 µg/L, redujo la toxicidad del Cd. Sin embargo, la concentración de Cd a 1,5 µg/L fue altamente tóxica, en tanto que con concentraciones de Ni ≥ 80 µg/L la toxicidad afectó la supervivencia, la reproducción y el crecimiento de *D. magna* (**Pérez & Hoang**, 2018). Asimismo, el Zn en concentraciones mayores a 160 µg/L puede generar toxicidad en el crustáceo de agua dulce en un breve periodo de exposición (**Pérez & Hoang**, 2017).

Otro factor importante es el periodo de exposición, pues la toxicidad de algunos metales aumenta con el tiempo; tal es el caso del ensayo en que el Al produjo inmovilidad del 100 % a las 72 h de exposición en concentraciones de 0,15 a 0,20 mg/L (**Rodrigues et al.**, 2020). Asimismo, en otros estudios se determinó la toxicidad del Pb, el Ni, el Cu y el Cd a las 24 h con base en la CL₅₀ y se encontró que fue mayor con el tiempo de exposición en los bioensayos agudos (**Zaltauskaitė & Vaitonytė**, 2016). **Rodrigues et al.** (2020) observaron que los tratamientos con exposición a metales como el Mn, el Al, el Fe y el Pb produjeron alteraciones en la tasa de reproducción: el Pb (0,02 mg/L) a los 14 días de exposición, y el Mn y el Al en concentraciones de 4,0 y 0,5 mg/L a los 21 días, en tanto que los organismos expuestos a Al y Fe en concentraciones de 0,05 y 0,27 mg/L mostraron una reducción del cuerpo, con lo que se confirmó que la contaminación por metales pesados u oligoelementos puede reducir la capacidad de los organismos de mantenerse en el ecosistema.

Por último, se determinó que el pH modifica la biodisponibilidad de los metales y metaloides, causando variaciones en la toxicidad en *L. minor* y en *D. magna*. Sackey *et al.* (2020) hallaron que el pH, la conductividad y los metales pesados fueron los principales causantes de la toxicidad por lixiviados de los vertederos en *L. minor* y *D. magna*. Un comportamiento similar se observó con el sedimento elutriado en un ensayo ecotoxicológico en *L. minor* y *D. magna*, lo que podría explicarse por la presencia de metales como el B, el Al, el Cr, el Cu, el Zn, el Co, el Ni, el As y el estroncio (Sr) (Vidal *et al.*, 2012). Otros trabajos mostraron que la pulga de agua es más sensible que las macrófitas acuáticas en muestras de agua con presencia de Cu, Pb, Cd y Ni (Žaltauskaitė & Vaitonytė, 2016).

Las plantas acuáticas son eficientes en la reducción de metales como el Zn, el Pb, el Fe, el Cu y el Ni a un pH de 4,5 a 7,5 (Daud *et al.*, 2018). Asimismo, en concentraciones menores el efecto tóxico de los metales puede reducirse porque las altas concentraciones de nutrientes estimulan el crecimiento de las plantas acuáticas (Žaltauskaitė & Vaitonytė, 2016). En concentraciones altas, los metales tienen efectos fisiológicos, morfológicos y bioquímicos en las plantas acuáticas (Jaiswal *et al.*, 2018). En este sentido, Akindele *et al.* (2020) determinaron que los STD son un factor que debe considerarse en las concentraciones de metales en el agua superficial (Cd, Cu, Zn, As y Pb), pues los metales estarían presentes en forma disuelta.

En condiciones extremas de pH (alrededor de 3) las concentraciones de metales se incrementan tal como se evidenció en el presente estudio: las muestras de AS, ES y SU en la cabecera de la quebrada Quilcayhuanca presentaron una mayor concentración de metales y metaloides como consecuencia del predominio de la meteorización de sulfuros expuestos por el retroceso glaciar. En condiciones de pH ácidos (3 a 5), Lee *et al.* (2015) hallaron un aumento en la concentración de metales (Fe^{+2} , Ca, Mg, Al, Mn, Cd, Cu, Zn y SO_4^{2-}) y en otros estudios se ha reportado que los metales pesados como Ag^+ , As^{3+} , Cd^{2+} , Cr^{6+} , Cu^{2+} , Fe^{2+} , Hg^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} y Zn^{2+} en concentraciones de 83, 17, 222, 91, 474, 5, 26, 15, 17, 31 y 115 $\mu\text{g/L}$, respectivamente, presentaron una mayor toxicidad aguda en condiciones ácidas (Cui *et al.*, 2018). En nuestras evaluaciones no se registró la presencia de Hg, pero se evidenciaron altas concentraciones de metales como el Fe, el Mn, el Ni, el Pb y el Zn en AS. Así, los principales factores que afectaron la toxicidad en las lentejas de agua y en el crustáceo de agua dulce serían el pH ácido y la presencia de metales pesados. Sin embargo, en estudios futuros sería importante analizar el CO_3^{2-} , el HCO_3^- y el SO_4^{2-} , con el fin de determinar cuál de ellos impulsaría en mayor medida la acidificación. Asimismo, en los ensayos crónicos de toxicidad sería importante considerar un mayor tiempo de exposición para verificar el grado de toxicidad provocado por la contaminación de metales pesados y metales trazas en condiciones de pH extremo.

Conclusiones

La calidad del agua superficial de la quebrada Quilcayhuanca presentó valores elevados de acidez ($\text{pH} \leq 4$) y de metales pesados (Cd, Pb, Ni y Zn), que superaron el ECA para el agua de Perú. El As, el Cd, el Cu, el Pb y el Zn en los sedimentos superaron el estándar en varios puntos, y el Cd y el As superaron el ECA para el suelo de Perú. Los bioindicadores *L. minor* y *D. magna* mostraron una sensibilidad diferenciada en AS y en ES, como se pudo observar en los efectos letales y subletales. Según el NOEC, las variables más sensibles para *L. minor* fueron la clorosis y la formación de hojas y frondas a las 168 h de exposición. El peso seco de *L. minor* solo lo fue en uno de los puntos (ES-01). Las CL_{50} y CE_{50} a las 24h de exposición en *D. magna* mostraron una sensibilidad que incrementó a las 48 h. Los dos organismos evaluados fueron sensibles, especialmente en los puntos AS-02 y ES-01. Se determinó un orden de toxicidad considerando el LOEC según las variables más sensibles de cada indicador: mayor en *L. minor* (clorosis, formación de hojas y número de frondas a las 168 h) que en *D. magna* (inmovilidad a las 48 h). Por último, se concluyó que la ecotoxicidad del AS y el ES por el retroceso glaciar en la quebrada Quilcayhuanca (Ancash, Perú) estuvo asociada con el pH y los metales pesados presentes en el AS y el ES.

Información suplementaria

Ver información suplementaria en <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1950/3599>

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento económico de la Universidad Científica del Sur (Lima) y al Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (Huaraz, Ancash) por el permiso otorgado para la toma de muestras ambientales en la quebrada Quilcayhuanca (Parque Nacional de Huascarán).

Contribución de los autores

NCR: elaboración del proyecto de estudio, experimentos, evaluación de los resultados, redacción del borrador y aprobación de la versión final del documento. JI: participación en la elaboración del proyecto de estudio, experimentos, evaluación de resultados, redacción del borrador y aprobación de la versión final del documento.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Akindede, E. O., Omisakin, O. D., Oni, O. A., Aliu, O. O., Omoniyi, G. E., Akinpelu, O. T. (2020). Heavy metal toxicity in the water column and benthic sediments of a degraded tropical stream. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190, 110153. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110153>
- Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K. I., Portocarrero, C., Gómez, J., Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58 (207), 134-150. <https://doi.org/10.3189/2012JG11J186>
- Brighenti, S., Tolotti, M., Bruno, M. C., Wharton, G., Pusch, M. T., Bertoldi, W. (2019). Ecosystem shifts in Alpine streams under glacier retreat and rock glacier thaw: A review. *Science of the Total Environment*, 675, 542-559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.221>
- Caja-Molina, A. V. & Iannacone, J. (2021). Evaluación del riesgo ambiental por petróleo crudo en las especies acuáticas *Lemna minor*, *Daphnia magna* y *Danio rerio*. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45 (176), 777-794. <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1398>
- Cauvy-Fraunié, S., Espinosa, R., Andino, P., Jacobsen, D., Dangles, O. (2015). Estructura y dinámica de metacomunidades de invertebrados en una red de arroyos glaciares andinos frente al cambio climático. *PloS uno*, 10 (8), e0136793. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136793>
- Canadian Council of Ministers of the Environment - CCME (1999). Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Canadian environmental quality guidelines. <https://ccme.ca/en/resources#>
- Chen, L., Zhang, G., Zeng, Y., Ren, Z. (2012). Influences of temperature, pH and turbidity on the behavioral responses of *Daphnia magna* and Japanese Medaka (*Oryzias latipes*) in the biomonitor. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 80-86. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.007>
- Cui, R., Kwak, J. I., An, Y. J. (2018). Comparative study of the sensitivity of *Daphnia galeata* and *Daphnia magna* to heavy metals. *Ecotoxicology and environmental safety*, 162, 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.054>
- Daud, M. K., Ali, S., Abbas, Z., Zaheer, I. E., Riaz, M. A., Malik, A., Hussain, A., Rizwan, M., Zia-ur-Rehman, M., Zhu, S. J. (2018). Potential of duckweed (*Lemna minor*) for the phytoremediation of landfill leachate. *Journal of Chemistry*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3951540>
- Duodu, G. O., Goonetilleke, A., Ayoko, G. A. (2017). Potential bioavailability assessment, source apportionment and ecological risk of heavy metals in the sediment of Brisbane River estuary, Australia. *Marine Pollution Bulletin*, 117(1-2), 523-531. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.02.017>

- ECA (2017a). Estándares de Calidad Ambiental para Agua Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, Perú. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-agua-establecen-disposiciones>
- ECA (2017b). Estándares de Calidad Ambiental para Suelos Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM, Perú. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-suelo-0>
- Elbana, T. A., Selim, H. M., Akrami, N., Newman, A., Shaheen, S. M., Rinklebe, J. (2018). Freundlich sorption parameters for cadmium, copper, nickel, lead, and zinc for different soils: Influence of kinetics. *Geoderma*, 324, 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.019>
- Fortner, S. K., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Bury, J., Trierweiler, A., Baraer, M., Burns, P. J., Munk, L. (2011). Elevated stream trace and minor element concentrations in the foreland of receding tropical glaciers. *Applied Geochemistry*, 26(11), 1792-1801. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.06.003>
- Gordon, R. P., Lutz, L. K., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Chávez, D., Baraer, M. (2015). Sources and pathways of stream generation in tropical proglacial valleys of the Cordillera Blanca, Peru. *Journal of Hydrology*, 522, 628-644. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.013>
- Grande, J. A., Loayza-Muro, R., Alonso-Chaves, F. M., Fortes, J. C., Willems, B., Sarmiento, A. M., Dávila, J. M., de la Torre, M. L., Durães, N., Diaz-Curie, J., Luís, A. T. (2019). The Negro River (Ancash-Peru): A unique case of water pollution, three environmental scenarios and an unresolved issue. *Science of The Total Environment*, 648, 398-407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.068>
- INAIGEM - Instituto Nacional de Investigación de Glaciares y Ecosistema de Montaña (2018). Inventario Nacional de Glaciares Las Cordilleras Glaciares del Perú 2018. <https://repositorio.inaigem.gob.pe/handle/16072021/57>
- Jaiswal, A., Verma, A., Jaiswal, P. (2018). Detrimental effects of heavy metals in soil, plants, and aquatic ecosystems and in humans. *Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Oncology*, 37(3), 183-197. <https://doi.org/10.1615/JEnvironPatholToxicolOncol.2018025348>
- Król, A., Mizerna, K., Bożym, M. (2020). An assessment of pH-dependent release and mobility of heavy metals from metallurgical slag. *Journal of Hazardous Materials*, 384, 121502. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121502>
- Lee, S. H., Kim, I., Kim, K. W., Lee, B. T. (2015). Ecological assessment of coal mine and metal mine drainage in South Korea using *Daphnia magna* bioassay. *SpringerPlus*, 4(1), 1-13. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1311-1>
- Leggat, M. S., Owens, P. N., Stott, T. A., Forrester, B. J., Déry, S. J., Menounos, B. (2015). Hydro-meteorological drivers and sources of suspended sediment flux in the pro-glacial zone of the retreating Castle Creek Glacier, Cariboo Mountains, British Columbia, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(11), 1542-1559. <https://doi.org/10.1002/esp.3755>
- Lin, Q. & Xu, S. (2020). Co-transport of heavy metals in layered saturated soil: characteristics and simulation. *Environmental Pollution*, 261, 114072. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114072>
- Loganathan, P., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., Bolan, N. S. (2014). Removal and recovery of phosphate from water using sorption. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44 (8), 847-907. <https://doi.org/10.1080/10643389.2012.741311>
- López-Moreno, J. I., Valero-Garcés, B., Mark, B., Condom, T., Revuelto, J., Azorín-Molina, C., Bazo, J., Frugone, M., Vicente-Serrano, S. M., Alejo-Cochachin, J. (2017). Hydrological and depositional processes associated with recent glacier recession in Yanamarey catchment, Cordillera Blanca (Peru). *Science of the Total Environment*, 579, 272-282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.107>
- Lu, Q., Zhang, T., Zhang, W., Su, C., Yang, Y., Hu, D., Xu, Q. (2018). Alleviation of cadmium toxicity in *Lemna minor* by exogenous salicylic acid. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, 500-508. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.015>
- Magnússon, R., Cammeraat, E., Lücke, A., Jansen, B., Zimmer, A., Recharte, J. (2020). Influence of glacial sediments on the chemical quality of surface water in the Ulta valley, Cordillera Blanca, Peru. *Journal of hydrology*, 587, 125027. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125027>
- Mark, B. G., McKenzie, J. M., Gómez, J. (2005). Hydrochemical evaluation of changing glacier meltwater contribution to stream discharge: Callejon de Huaylas, Peru/Evaluation hydrochimique de la contribution évolutive de la fonte glaciaire à l'écoulement fluvial: Callejon de Huaylas, Pérou. *Hydrological Sciences Journal*, 50 (6), 975-987. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.975>

- Mesquita, A. F., Abrantes, N., Campos, I., Nunes, C., Coimbra, M. A., Gonçalves, F. J., Marques, J. C., Gonçalves, A. M.** (2022). Effects of wildfire ash on the growth and biochemical profiles of the aquatic macrophyte *Lemna minor*. *Aquatic Toxicology*, 250, 106245. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2022.106245>
- Miranda, L. S., Ayoko, G. A., Egodawatta, P., Goonetilleke, A.** (2022). Adsorption-desorption behavior of heavy metals in aquatic environments: Influence of sediment, water and metal ionic properties. *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126743. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126743>
- Miranda, L. S., Ayoko, G. A., Egodawatta, P., Hu, W. P., Ghidan, O., Goonetilleke, A.** (2021). Physico-chemical properties of sediments governing the bioavailability of heavy metals in urban waterways. *Science of The Total Environment*, 763, 142984. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142984>
- Nasnodkar, M.R. & Nayak, G.N.** (2019). Geochemical speciation of selected metals to understand source, bioavailability and toxicity in mudflat core sediments of a tropical (Vaghotan) estuary, India. *Regional Studies in Marine Science*, 31, 100803. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100803>
- Navas, A., Lizaga, I., Gaspar, L., Latorre, B., Dercon, G.** (2020). Unveiling the provenance of sediments in the moraine complex of Aldegonda Glacier (Svalbard) after glacial retreat using radionuclides and elemental fingerprints. *Geomorphology*, 367, 107304. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107304>
- OCDE.** (2004). Guideline for testing of chemicals. Test No. 202: *Daphnia* sp. Acute Immobilisation Test. <https://www.oecdilibrary.org/docserver/9789264069947-en.pdf?expires=1621114445&id=id&accname=guest&checksum=784CB027CAFE3363FE66D15BAAA3B9C6>
- OCDE.** (2006). Guideline for testing of Chemicals. Test No. 221: *Lemna* sp. Growth Inhibition Test <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264016194-en.pdf?expires=1621114790&id=id&accname=guest&checksum=9EAE42390B8516E21F87321CEB26DCCF>
- Outa, J. O., Kowenje, C. O., Plessl, C., Jirsa, F.** (2020). Distribution of arsenic, silver, cadmium, lead and other trace elements in water, sediment and macrophytes in the Kenyan part of Lake Victoria: spatial, temporal and bioindicative aspects. *Environmental Science and Pollution Research*, 27 (2), 1485-1498. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06525-9>
- Pérez, E. & Hoang, T. C.** (2017). Chronic toxicity of binary-metal mixtures of cadmium and zinc to *Daphnia magna*. *Environmental toxicology and chemistry*, 36 (10), 2739-2749. <https://doi.org/10.1002/etc.3830>
- Pérez, E. & Hoang, T. C.** (2018). Responses of *Daphnia magna* to chronic exposure of cadmium and nickel mixtures. *Chemosphere*, 208, 991-1001. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.063>
- Qin, L., Huang, Q., Wei, Z., Wang, L., Wang, Z.** (2014). The influence of hydroxyl-functionalized multi-walled carbon nanotubes and pH levels on the toxicity of lead to *Daphnia magna*. *Environmental toxicology and pharmacology*, 38 (1), 199-204. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2014.05.016>
- Reyes-Nolasco, A. W.** (2018). Contaminación por metales pesados de aguas y suelos en la microcuenca quilcayhuanca; su relación con la litología y el contexto del cambio climático; Huaraz Ancash Perú 2014-2015. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2381>
- Rodrigues, G. Z. P., Finkler, M., Garcia, A. L. H., Gehlen, G.** (2020). Evaluation of transgenerational effects caused by metals as environmental pollutants in *Daphnia magna*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192 (12), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08713-4>
- Sackey, L. N., Kočí, V., van Gestel, C. A.** (2020). Ecotoxicological effects on *Lemna minor* and *Daphnia magna* of leachates from differently aged landfills of Ghana. *Science of the Total Environment*, 698, 134295. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134295>
- Sackey, L. N., Mocová, K. A., Petrová, Š., Kočí, V.** (2021). Toxicity of wood leachate to algae *Desmodesmus subspicatus* and plant *Lemna minor*. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(47), 67150-67158. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15319-x>
- Salesa, B., Sancho, E., Ferrando-Rodrigo, M. D., Torres-Gavilá, J.** (2022). The prochloraz chronic exposure to *Daphnia magna* derived in biochemical alterations of F0 generation daphnids and malformed F1 progeny. *Chemosphere*, 307, 135848. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135848>
- Santofimia, E., López-Pamo, E., Palomino, E. J., González-Toril, E., Aguilera, Á.** (2017). Acid rock drainage in Nevado Pastoruri glacier area (Huascarán National Park, Perú): hydrochemical and mineralogical characterization and associated environmental implications. *Environmental Science and Pollution Research*, 24 (32), 25243-25259. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0093-0>

- Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., Giráldez, C., Gómez, J., Huggel, C., Jacques-Coper, M., Loarte, E., Salzmán, N., & Vuille, M.** (2014). Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global and Planetary Change*, 119, 85-97. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.005>
- United States Environmental Protection Agency- EPA.** (1994a). "Method 200.8: Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry," Revision 5.4. Cincinnati, OH. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-200.8.pdf>
- United States Environmental Protection Agency- EPA.** (1996). "Method 3050-B: Acid Digestion of sediments, sludges, and soil". Revisión 2. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>
- United States Environmental Protection Agency- EPA.** (1994b). "Method 200.7 Revision 4.4: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils / Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES)". https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/method_200-7_rev_4-4_1994.pdf
- United States Environmental Protection Agency- EPA.** (2018). "SW-846 Method 6010D. Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)". Revision 5. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/6010d.pdf>
- Valverde, G. M., Lázaro, J. C. T., Infantes, W. H. J.** (2018). Variación del pH en aguas superficiales debido a drenajes ácidos de roca en la Subcuenca Quillcay, Huaraz, Ancash. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 5, 12-12. <https://doi.org/10.36580/rgem.i5.57-68>
- Veettil, B. K. & Kamp, U.** (2019). Global disappearance of tropical mountain glaciers: observations, causes, and challenges. *Geosciences*, 9 (5), 196. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050196>
- Vidal, T., Pereira, J. L., Abrantes, N., Soares, A. M., Gonçalves, F.** (2012). Ecotoxicological assessment of contaminated river sites as a proxy for the water framework directive: an acid mine drainage case study. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(9), 6009-6023. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1335-x>
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Timm, O. E., Condom, T., Salzmán, N., Sicart, J. E.** (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes—Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-science Reviews*, 176, 195-213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>
- Žaltauskaitė, J. & Vaitonytė, I.** (2016). Toxicological assessment of closed municipal solid-waste landfill impact on the environment. [Toksikologinis uždaryto municipalinių atliekų sąvartyno poveikio aplinkai vertinimas] *Environmental Research, Engineering and Management*, 72(4), 8-16. <https://doi:10.5755/j01.irem.72.4.16555>
- Zicari, M. A., d'Aquino, L., Paradiso, A., Mastrolitti, S., Tommasi, F.** (2018). Effect of cerium on growth and antioxidant metabolism of *Lemna minor* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 163, 536-543. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.113>
- Zhang, Y., Zhang, H., Zhang, Z., Liu, Ch., Sun, C., Zhang, W., Marhaba, T.** (2018). pH effect on heavy metal release from a polluted sediment. *Journal of Chemistry*, 2018, 7597640. <https://doi.org/10.1155/2018/7597640>
- Ziegler, P., Sree, K. S., Appenroth, K. J.** (2018). Duckweed biomarkers for identifying toxic water contaminants? *Environmental Science and Pollution Research*, 26(15), 14797-14822. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3427-7>

Original article

Historical perspective and state of knowledge of the non-avian reptiles (Vertebrata: Sauropsida) of the Department of Caldas, Central Andes of Colombia

Perspectiva histórica y estado del conocimiento de los reptiles no aviares (Vertebrata: Sauropsida) en el departamento de Caldas, Andes centrales de Colombia

✉ Julián A. Rojas-Morales^{1,2,*}, ✉ Héctor F. Arias-Monsalve^{2,3,4},
✉ L. Santiago Caicedo-Martínez², ✉ José J. Henao-Osorio², ✉ Erika Alejandra Cardona-Galvis²,
✉ Héctor E. Ramírez-Chaves^{2,5}

¹ Doctorado en Ciencias, Departamento de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

² Integrative Zoological Biodiversity Discovery Laboratory, Centro de Museos, Museo de Historia Natural, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

³ Maestría en Ciencias, Departamento de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

⁴ Fundación Ecológica Cafetera, Manizales, Colombia

⁵ Departamento de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

Abstract

Studying non-avian reptiles in the Colombian Andean region has encompassed various spatial scales and historical times. The knowledge of non-avian reptile diversity in the Department of Caldas (Central Andes; 7,888 sq. km. area; intricate geomorphology) has grown significantly in recent decades, especially in the areas to the east of the department within the Magdalena Valley and near Manizales, the capital city. Here, we consolidate the data from biological collections, literature, and unpublished research in a historical synopsis of the studies conducted in Caldas with an updated account of non-avian reptile species recorded in them. We found that the records of non-avian reptiles in Caldas trace back to pre-Columbian and colonial times, with specimens in biological collections dating back over a century. This non-avian reptile richness comprises 126 species grouped in 69 genera, 25 families, and three orders. Three out of the 27 municipalities in Caldas (La Merced, Marulanda, and Marquetalia) lack validated specimens or records. Furthermore, there is limited information regarding protected areas such as Los Nevados and Selva de Florencia National Natural Parks, which demands further research to unravel the diversity patterns of this biological group within this specific segment of the Andes.

Keywords: Andes; Cauca River; History of knowledge; Magdalena River; New records.

Resumen

Los reptiles no aviares de la región andina de Colombia se han estudiado en diferentes escalas espaciales y épocas históricas. En el departamento de Caldas (Andes Centrales; un área de 7.888 km² y una geomorfología compleja), el conocimiento de la diversidad de los reptiles no aviares se ha incrementado en décadas recientes, especialmente en áreas del valle del Magdalena, al oriente del departamento, y en cercanías a su capital Manizales. Con el fin de consolidar la información disponible en algunas colecciones biológicas, en la literatura y en observaciones no publicadas, hicimos una sinopsis histórica de los estudios desarrollados en este departamento y una actualización de la riqueza de especies. Los resultados evidenciaron que hay registros anecdóticos de los reptiles no aviares desde épocas precolombinas y durante la colonia, y de especímenes en colecciones biológicas desde hace más de un siglo. Los reptiles no aviares que hoy se conocen comprenden 126 especies, agrupadas en 69 géneros, 25 familias y tres órdenes. En tres de los 27 municipios

Citation: Rojas-Morales JA, Arias-Monsalve HF, Caicedo-Martínez LS, *et al.* Historical perspective and state of knowledge of the non-avian reptiles (Vertebrata: Sauropsida) of the Department of Caldas, Central Andes of Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.* 47(185):868-881, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2007>

Editor: Martha Patricia Ramírez Pinilla

***Corresponding autor:**

Julián Andrés Rojas-Morales;
julian.rojas24788@ucaldas.edu.co

Received: September 10, 2023

Accepted: December 1, 2023

Published on line: December 13, 2023



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

de Caldas (La Merced, Marulanda y Marquetalia) aún no hay registros validados o especímenes. Además, hay información muy limitada sobre los Parques Nacionales Naturales Los Nevados y Selva de Florencia, por lo que se requieren estudios para comprender los patrones de diversidad de este grupo biológico en esa porción de los Andes.

Palabras clave: Andes; Historia del conocimiento; Nuevos registros; Rareza; Río Cauca; Río Magdalena.

Introduction

The Andean region of Colombia is part of one of the world's biodiversity hotspots, which is partly influenced by the high topographic complexity and the biogeographic history of multiple groups of species (Gentry, 1995; Lynch *et al.*, 1997; Myers *et al.*, 2000; Hazzi *et al.*, 2018). Besides this high biodiversity, there are several settlements and agricultural areas in the Colombian Andean cordilleras that have triggered transformation processes in their forests, which currently occupy less than 50% of their potential coverage (Armenteras & Rodríguez-Eraso, 2014; Llambí *et al.*, 2019). The repercussions of such transformations are well documented and frequently regarded as significant contributors to the ongoing loss of biodiversity and the fragmentation of these ecosystems (Newbold *et al.*, 2015).

The studies on non-avian reptiles in the Colombian Andean region are rich and varied, including comprehensive checklists and field guides (Rueda, 2000; Castro-Herrera & Vargas-Salinas, 2008; Rojas-Morales, 2012; Restrepo *et al.*, 2017; Román-Palacios *et al.*, 2017), taxonomic descriptions (Passos & Lynch, 2008), analyses of highway-related mortality (López-Herrera *et al.*, 2016; Zúñiga-Baos, 2023), studies on embryology and development (Hernández-Jaimes *et al.*, 2012), population ecology (Anaya-Rojas *et al.*, 2010), and distribution in urban areas (Rojas-Morales, 2012; Vanegas-Guerrero *et al.*, 2016), among others.

The central-western segment of this region stands out for its remarkable biodiversity, influenced by the transition between the ecosystems of the inter-Andean valleys and two of the three Andean cordilleras (Occidental and Central) that traverse the country (Kattan *et al.*, 2004). The Central Cordillera is considered the oldest and concentrates a high diversity of zoological groups such as amphibians (Lynch *et al.*, 1997; Kattan *et al.*, 2004) and endemic taxa of non-avian reptiles, including the genus *Magdalenasaura* Fang *et al.*, 2020.

On the other hand, regional checklists have been compiled for the Valle del Cauca department encompassing a substantial section of the Pacific region and the upper Cauca River basin between the Occidental and Central Cordilleras. In the Andean and inter-Andean zones of this department, more than 70 non-avian reptile species have been documented (Castro-Herrera & Vargas-Salinas, 2008; Cardona-Botero *et al.*, 2013). However, despite the evident richness of these vertebrates, historical and biological information about non-avian reptile species remains relatively limited in this part of the country (Arbeláez-Cortés, 2013).

There have been several endeavors to document the diversity of non-avian reptiles in Caldas (eastern flank of the Occidental Cordillera) and in both flanks of the Central Cordillera and the inter-Andean valleys formed by the Cauca and Magdalena rivers (Acosta-Galvis, 2009; Ramírez-Chaves *et al.*, 2022), but the focus has concentrated on the middle valley of the Magdalena River (Flórez-Jaramillo & Barona-Cortés, 2016; Rojas-Morales *et al.*, 2018), with relatively few contributions centered on localities of the Cauca River basin (Rojas-Morales, 2012; Rojas-Morales *et al.*, 2014), which is also the case with the northern and western portions in Caldas, particularly along the borders of the departments of Antioquia and Risaralda (Ramírez-Chaves *et al.*, 2022). While in recent years, the cords of non-avian reptiles of Caldas have increased, encompassing up to 112 species (Ramírez-Chaves *et al.*, 2021; 2022), there is still a need for updated and historical information on the local non-avian reptile fauna, which is relevant as a baseline for forthcoming diversity assessments and conservation plans. To contribute to the study

of non-avian reptiles in Caldas, we present a historical synopsis of the research on its local species, providing an updated checklist, highlighting noteworthy records, and identifying geographical areas with information gaps.

Methodology

Area description

The Department of Caldas ($4^{\circ}48' - 5^{\circ}46' \text{ N}$ and $74^{\circ}39' - 75^{\circ} 55' \text{ W}$) (**Figure 1**) has an area of 7888 km² corresponding to a relatively narrow segment of the Colombian Central and Occidental Cordilleras, which significantly influences the distribution of the streams and rivers that flow into its two primary basins: the Magdalena River in the east and the Cauca River in the west. The Magdalena River basin captures the waters from the Central Cordillera that flow along the eastern slope, while the Cauca River basin receives the rivers that drain the western slope of the Central Cordillera and the eastern slope of the Occidental Cordillera. The elevation gradient varies across the region, reaching a minimum of 170 meters a.s.l on the eastern slope in La Dorada municipality, which stretches towards the Magdalena River basin. On the western slope, in the Cauca River basin, the minimum elevation stands at 580 m a.s.l at the confluence of the Arma and Cauca rivers in Aguadas. The Department's highest point is the Nevado del Ruiz, which reaches 5,321 m a.s.l (**INGEOMINAS, 1993; Rueda-Almonacid, 2000; Acosta-Galvis, 2009; Ordoñez *et al.*, 2022**). According to **Morrone *et al.* (2022)**, Caldas has three distinct biogeographic provinces: the Cauca, Magdalena, and Paramo Provinces (**Figure 1**).

Historical synopsis and checklist of species

For a comprehensive historical synopsis of the documentation of non-avian reptile diversity, we highlight milestones in their study and observations in Caldas. The pre-Columbian depictions of non-avian reptiles are evident in the gold artifacts created by local cultures, and the chronicles of the Spanish conquest offer anecdotal observations of non-avian reptiles in Caldas. On the other hand, we acknowledged the efforts of museum and natural history collections in documenting this group from the beginning of the 20th century. Finally, we summarized the contributions made by national institutions to this endeavor and describe the processes underpinning the establishment of the different studies.

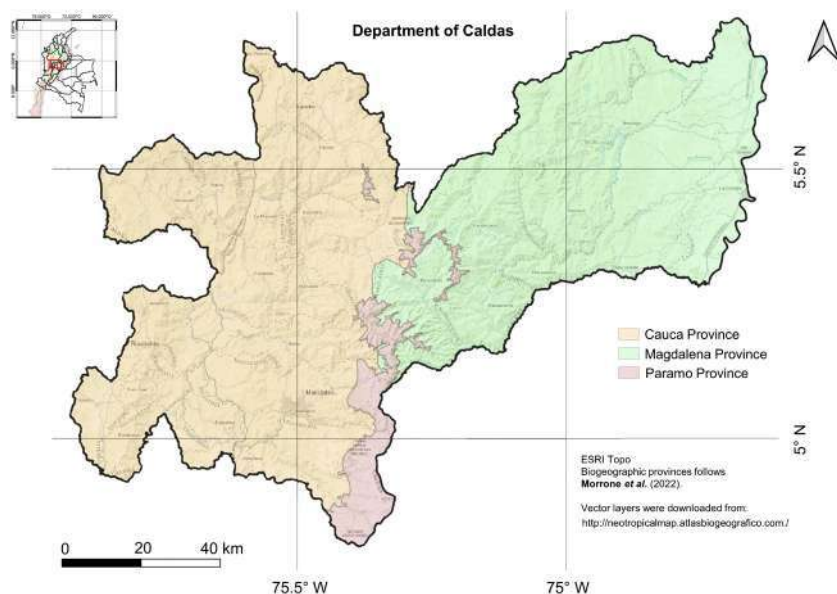


Figure 1. The Department of Caldas in the central part of Colombia. Biogeographic provinces (Cauca, Magdalena, and Páramo) *sensu* **Morrone *et al.* (2022)**.

To update the checklist of non-avian reptiles in Caldas, we compiled the records from various data sources (**Table 1**), including all the specimens deposited in the reptile collection at the Museo de Historia Natural, Universidad de Caldas (MHN-UCa-R) and the Corporación Universitaria de Santa Rosa de Cabal (CUS-R), which we revised. We also checked directly and from photographs sent by curators the specimens deposited in the reptile collection at the Instituto de Investigación en Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH-R) and herpetological collection at the Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia (ICN-HER-R). Finally, additional records were compiled from scientific papers published in indexed journals. Our literature search encompassed Scopus and Web of Science using a combination of keywords: “Squamata*"

Table 1. Genera and species of non-avian reptiles from the Department of Caldas, Colombia, by taxonomic families

Order/Family	Number of genera	Number of species	Number of species restricted to Colombia
Amphisbaenia			
Amphisbaenidae	1	1	
Crocodylia			
Alligatoridae	1	1	
Crocodylidae	1	1	
Squamata-Lacertilia			
Anolidae	1	13	7
Alopoglossidae	1	2	2
Corytophanidae	2	3	
Diploglossidae	1	1	
Gekkonidae	1	3	
Gymnophthalmidae	10	11	5
Iguanidae	1	1	
Phyllodactylidae	1	1	
Sphaerodactylidae	3	5	2
Teiidae	5	5	
Tropiduridae	1	1	1
Squamata-Serpentes			
Anomalepididae	2	21	2
Boidae	3	5	
Colubridae	24	54	10
Elapidae	1	2	
Leptotyphlopidae	1	2	1
Viperidae	4	5	
Testudines			
Chelydridae	1	1	
Emydidae	1	1	
Kinosternidae	1	2	
Podocnemididae	1	1	
Testudinidae	1	1	
Total	69	126	30

and Caldas”, “herpetofauna* and Caldas”, “snake* and Caldas”, and “lizard* and Caldas” with no temporal constraints. We also searched for information produced by the Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS) not found in conventional search engines corresponding to field observations supported with evidence, including photographs or voucher specimens. We included two records of uncollected specimens reported in *iNaturalist* platform for taxonomic validation (*Chelydra acutirostris* and *Tupinambis* sp.). Species lacking confirmation through either voucher specimens or published reports were excluded from the list.

We followed current taxonomic treatments for the taxonomic update (Uetz *et al.*, 2023). Specimens were identified with the assistance of specialized taxonomic keys and local field guides, including those of Rueda (2000), Acosta-Galvis (2009), and Rojas-Morales *et al.* (2016). We also consulted reviews of the genera *Alopoglossus* (Harris, 1994), *Atractus* (Passos *et al.*, 2009; Passos & Lynch, 2011), *Cnemidophorus* (Harvey *et al.*, 2012; McCranie & Hedges, 2013), *Liotyphlops* (Linares-Vargas *et al.*, 2021), *Pholidobolus* (Hurtado-Gómez *et al.*, 2018; Amézquita *et al.*, 2023); *Dipsas* (Harvey, 2008); *Echinosaura* (Vásquez-Restrepo *et al.*, 2020); *Erythrolamprus* (Hurtado-Gómez, 2016; Curcio *et al.*, 2009); *Magdalenasaura* (Fang *et al.*, 2022). To validate or correct the identification of some species, we sent photographs and meristic data of specimens of the genera *Alopoglossus*, *Dipsas*, and *Magdalenasaura* to expert researchers.

We confirmed that the taxonomy and systematics of some groups of non-avian reptiles from northern South America (e.g., *Cnemidophorus* and *Sibon*) have not been sufficiently evaluated and that trans-Andean specimens of these taxa lack published phylogenies, which limits their identification at the species level (Arteaga & Batista, 2023; McCranie & Hedges, 2013; Vásquez-Restrepo *et al.*, 2020; Amézquita *et al.*, 2023). We, therefore, assigned the populations from Caldas as *Cnemidophorus lemniscatus* (Linnaeus, 1758) *sensu lato*, *Sibon annulatus* (Günther, 1852) *sensu lato*, and *Sibon nebulatus* (Linnaeus, 1758) *sensu lato*.

Noteworthy records and information gaps

We included records obtained during field trips by some of the authors of this study of species not previously documented in Caldas, thereby extending their known distribution ranges. To identify areas with limited information, we generated a heatmap using Kernel density estimation (kernel estimator) and the QGIS (2023) software.

Results

Historical synopsis

We propose five historical moments in the knowledge of non-avian reptiles from Caldas (Figure 2):

1) *Pre-Hispanic manifestations*. The earliest recorded instances of non-avian reptiles in Caldas iconography or writings date back to the pre-Columbian representations of the Quimbaya cultures (between AD 850 and the 16th century). These cultures from the middle Cauca basin depicted zoomorphic figures associated with frogs and lizards (Friede, 1978; Osorio, 1990). The Quimbaya’s northern boundary lay in the Guacaica and Chinchiná rivers intersection in Caldas south-central region, probably richer in non-avian reptiles than today.

2) *The Spanish colony and Antioquia’s colonization period*. Between the 16th and 19th centuries, during the colonial and post-colonial eras, several records of non-avian reptiles were documented by chroniclers and travelers, particularly within the Magdalena River basin, which served as a primary entryway into the country. Crocodiles, snakes, and certain lizards were often imbued with a magical-religious significance influenced by a medieval animalistic perception of nature (Santa Gertrudis, 1956; Cabarcas-Antequera, 1994). In the late colonial period, the sociodemographic phenomenon of the so-called Antioquia’s colonization period substantially altered the landscapes and fauna of present-day Caldas (Parsons, 1961). During this period, primary bibliographic sources consisted of accounts

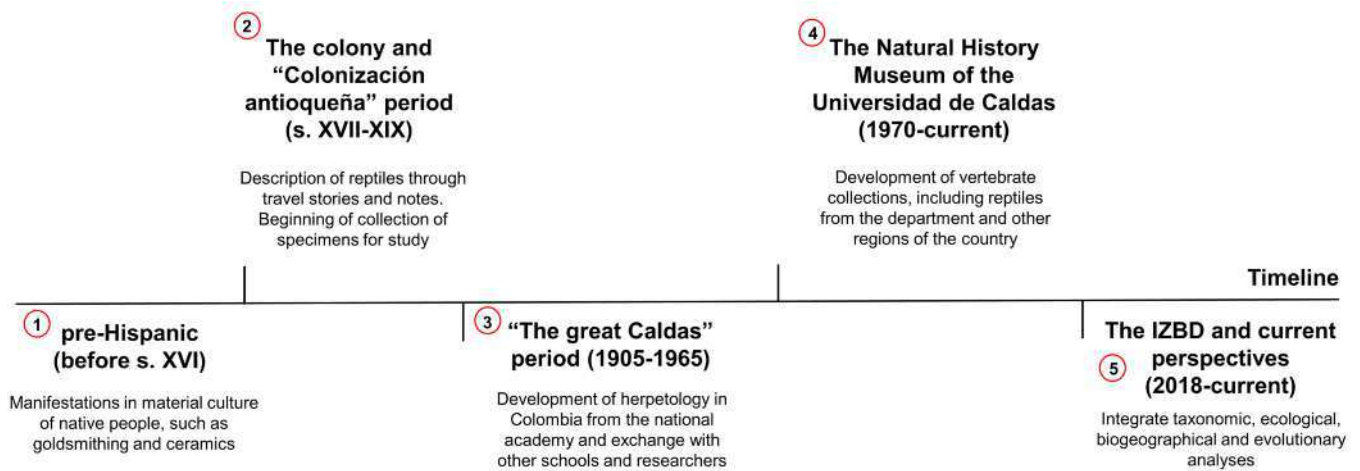


Figure 2. Temporal scheme highlighting key moments in the knowledge of the non-avian reptiles of the Department of Caldas, Colombia

from travelers and settlers, often mentioning snakes, alligators, and turtles, noting, for example, the presence of snakes inside the woodpiles along the banks of the Magdalena River (**Röthlisberger**, 1963). Between 1825 and 1830, the Boussingault expedition conducted activities in what is now Caldas, particularly in the western gold-rich regions of Marmato, Supía, and Riosucio (**Espinosa**, 1991), including the collection of zoological specimens by J. M. Goudot, who was affiliated with the Museum of Paris. In this context, non-avian reptiles were collected for study and eventual transport to Europe, but their precise location (Caldas or a nearby Department) is unknown (**Medem**, 1968).

(3) *The Great Caldas 1905-1965*. Scientific exploration of Caldas non-avian reptiles began in the early 20th century. In the 1920s-1940s, specimens were collected from the Central Cordillera by the Lasallista brothers Nicéforo María and Daniel. These specimens were key in the descriptions of certain snake species by Dr. Afranio do Amaral and Dr. Alcides Prado, affiliated with the Butantan Institute. Notable species named during this period included *Helminthophis praeocularis* (**Amaral**, 1924), *Atractus manizalesensis* (**Prado**, 1940), and *A. biseriatus* (**Prado**, 1941). North American herpetologist Dr. Emmett Reid Dunn contributed to understanding Colombian non-avian reptiles by reviewing extensively specimens from the Magdalena River Valley and the Central Cordillera (**Dunn**, 1944). From 1941 to 1961, the Colegio Pío XII in Salamina and the Colegio Nacional in Pensilvania housed biological specimens (**Martínez et al.**, 2011), but the current localization of those historical collections is unknown.

(4) *The Museo de Historia Natural at Universidad de Caldas*. In 1975, the naturalist Jesús H. Vélez Estrada established the Museo de Historia Natural of the Universidad de Caldas (MHN-UCa) to house and exhibit collections of both vertebrates and invertebrates to the public. Initially, most of the collection comprised taxidermized specimens of vertebrates, including non-avian reptiles (**Salazar**, 2004), but in the 1980s, the museum organized field expeditions to different localities in the Amazon, Chocó, and the Magdalena River valley humid forest, where some non-avian reptiles were collected (Salazar pers. comm.). The museum also includes material from Selva de Florencia, studied by **Rueda-Almonacid** (2000), who conducted the first study focused on the herpetofauna of a protected area in Caldas. The oldest non-avian reptile specimens from Caldas in the collection date back to 1985 and consist of three snakes: *Atractus* sp. (MHN-UCa-R-332), *Bothriechis schlegelii* (MHN-UCa-R-015), and *Erythrolamprus epinephelus* (MHN-UCa-R-334), all from Manizales. Today, the collection houses 806 specimens from Caldas and has grown continuously since 2001, with a notable increase in specimens from 2012 to 2023, reaching 117 species (**Figure 3**).

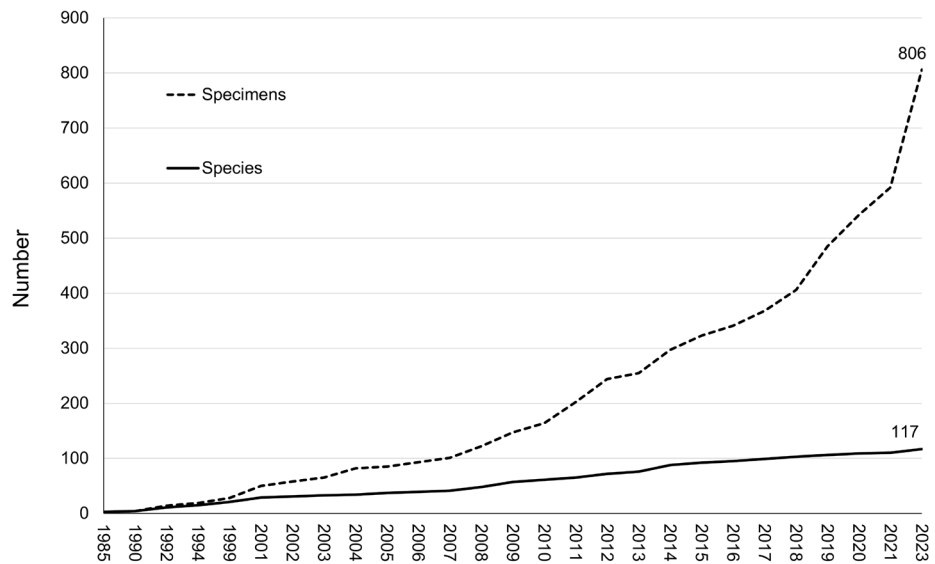


Figure 3. Growth trend of the non-avian reptile collection of specimens from the Department of Caldas deposited in the Natural History Museum at the University of Caldas (MHN-UCa-R), Manizales, Colombia

(5) *The Integrative Zoological Biodiversity Discovery lab (the IZBD)*. The IZBD at the Universidad de Caldas was established to contribute to the zoological knowledge of Caldas and Colombia. Its mission was to systematize and organize new and historical biological specimens deposited in the University's Museo de Historia Natural. Over the last five years, data on the non-avian reptiles in the MHN-UCa-R collection have been compiled and subsequently incorporated into the updated checklist of Caldas non-avian reptiles, and is now available to the general public (Ramírez-Chaves *et al.*, 2021, 2022).

Updated checklist of non-avian reptiles from Caldas. Through extensive data compilation, we found that the taxonomic diversity of the non-avian reptiles in Caldas encompasses 126 species belonging to 69 genera, 25 families, and three orders (Table 1, 1S, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2007/3491>). Crocodylia is the least represented order, with two species, while Testudines includes six species. In contrast, the order Squamata concentrates the highest richness (61 genera, 115 species) (Table 1). Colubridae has the most species with 54, followed by Anolidae and Gymnophthalmidae with 13 and 12, respectively. Thirty of these species have a restricted distribution in Colombia (Table 1, 1S, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2007/3491>). According to the IUCN (2023) classifications, *Stenocercus bolivarensis* is listed as Data Deficient (DD), while seven species are listed as threatened with extinction: two in the Critically Endangered (CR) category (*Dendrophidion boshelli*, *Podocnemis leuwiana*), two in the Endangered (EN) category (*Crocodylus acutus*, *Riama columbiana*), and three in the Vulnerable (VU) category (*Riama antioquiensis*, *Chelonoidis carbonarius*, and *Trachemys callirostris*) (Table 1S, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2007/3491>). All members of the Gekkonidae family in the region are introduced species (Henaó-Osorio *et al.*, 2021).

Noteworthy records and information gaps. We present noteworthy records of 15 non-avian reptile species that represent extensions of their known ranges, filling distribution gaps in the country (Figure 4) (Table 2S, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2007/3491>).

New record for Colombia: Alopoglossus kugleri (Roux, 1927): Norcasia (MHN-UCa-R-510), Samaná (MHN-UCa-R-608). Identification confirmed by Luis F. Esqueda.

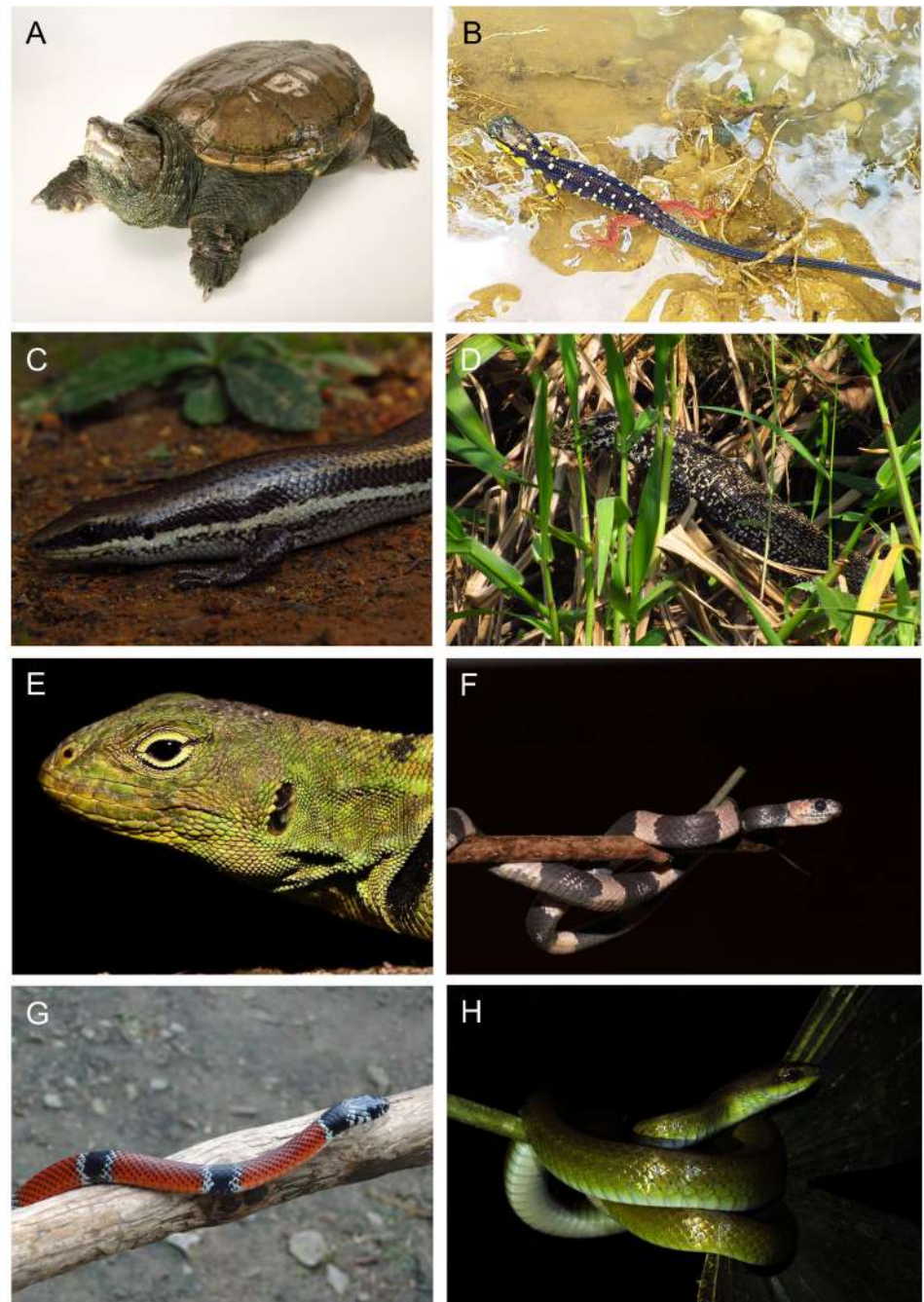


Figure 4. New records of non-avian reptile species in the Department of Caldas. (A) *Chelydra acutirostris*; (B) *Anadia antioquiensis*; (C) *Marisora* gr. *unimarginata*; (D) *Tupinambis* sp.; (E) *Stenocercus bolivarensis*; (F) *Dipsas gracilis*; (G) *Erythrolamprus pseudocorallus*; (H) *Mastigodryas danieli*. Photographs: Esteban Giraldo (A), Juan Camilo Gallego (B, G), Héctor F. Árias (F), Julián A. Rojas (C, D, E, H)

New records for the Department of Caldas: Alopoglossus vallensis (Harris, 1994): Anserma (CUS-R-0116). *Atractus lasallei* (Amaral, 1935): Aguadas (MHN-UCa-R-647). *Chelydra acutirostris* (Peters, 1862): Palestina (<https://www.inaturalist.org/observations/169608634>). *Dipsas gracilis* (Boulenger, 1902): Chinchiná (MHN-UCa-R-500, 927; identification confirmed by Michael. B. Harvey). *Erythrolamprus*

pseudocorallus (Roze, 1959): Norcasia (IAvH-R-6423), Victoria (IAvH-R-4158). *Hemidactylus angulatus* (Hallowell, 1854): Risaralda (MHN-UCa-R-935). *Liotyphlops bondensis* (Griffin, 1916): Samaná (MHN-UCa-R-359). *Magdalenasaura adercum* Fang, Vásquez-Restrepo & Daza, 2022: Samaná (MHN-UCa-R-331; Identification confirmed by José M. Fang). *Marisora* gr. *unimarginata*: Anserma (CUS-R-0112). *Mastigodryas danieli* (Amaral, 1935): Anserma (CUS-R-0049). *Pholidobolus odinsae* (Amézquita *et al.*, 2023): Manizales (MHN-UCa-R-851-857). *Riama antioquiensis* (Arredondo, 2013): Samaná (MHN-UCa-R-330). *Stenocercus bolivarensis* (Ayala & Castro, 1982): Manizales (Figure 4E). *Tupinambis* sp.: La Dorada (<https://www.inaturalist.org/observations/172778884>).

Records by municipality. We found no records of non-avian reptiles for La Merced, Marquetalia, and Marulanda. The majority of records supported by specimens are concentrated in the south-central and northeastern regions of the department (Figure 5) in areas corresponding to Manizales, Norcasia, and Samaná municipalities, respectively.

Protected areas in Caldas: The two national protected areas in Caldas are the Selva de Florencia Natural Park, with the highest number of records of non-avian reptiles and specimens (nine and seven, respectively), and Los Nevados Natural Park, with only one record of a species found outside its typical distribution range (Henaó-Osorio *et al.*, 2021).

Discussion

The richness of non-avian reptiles in Caldas is considerable (126 species), constituting 19% of the total species reported in Colombia, according to Uetz *et al.* (2023). A more in-depth analysis revealed significant disparities in species diversity across taxonomic groups, with Crocodylia exhibiting the lowest diversity, with two species (*C. crocodilus* and *C. acutus*), which are the only two inhabiting the inter-Andean valleys of Colombia (Morales-Betancourt *et al.*, 2015; Carvajal-Cogollo *et al.*, 2020). The six species of tortoises and turtles (order Testudines) represent 15.7% of the group in Colombia. Lizards

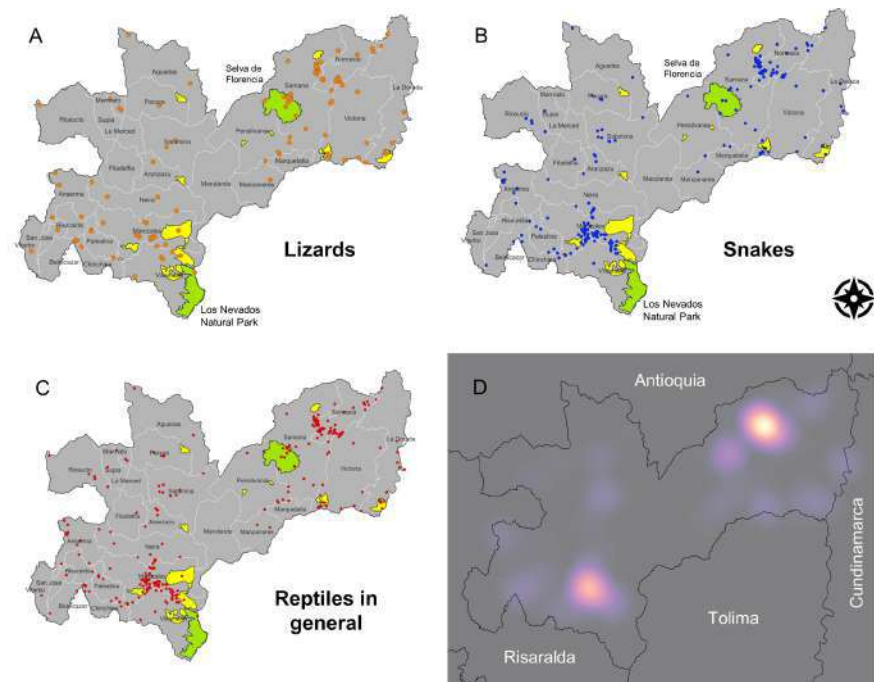


Figure 5. Distribution of records of non-avian reptiles in the Department of Caldas based on voucher specimens (Table 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2007/3491>). National natural parks are highlighted in green and other protected forest reserves and private areas in yellow.

and snakes (order Squamata) are the most diverse, with 17.1% and 20.9% of the specimens in Colombia, respectively (Uetz *et al.*, 2023). In terms of species richness, in its 7888 km², Caldas harbors a similar number of non-avian reptile species from that of the entire Colombian Orinoco region (128 species) (Trujillo, 2015) and is not far from the high diversity in the Caribbean region (171 species) (Carvajal-Cogollo *et al.*, 2020). The richness of non-avian reptiles in Caldas compared with other Andean areas, such as the Mérida Cordillera in Venezuela (108 species) (La Marca & Soriano, 2004; Rivas *et al.*, 2012) is higher, notwithstanding that Caldas represents 25% of the Mérida Cordillera area (La Marca & Soriano, 2004). This highlights the exceptional richness and biodiversity of non-avian reptiles in Caldas.

Our exhaustive examination of collected specimens from different collections and digital sources has yielded valuable findings: the first record of *Alopoglossus kugleri* in Colombia; the extension of the distribution range of endemic species such as *A. vallisensis*, *Atractus lasallei*, *Mastigodryas danieli*, and *Magdalenasaura adercum*, and a better understanding of the distribution of the threatened and endemic *Riama antioquiensis* (previously listed as *Anadia antioquiensis* in the Vulnerable category on the IUCN Red List) (Arredondo & Bolívar, 2017).

The new record of *A. kugleri* extends over 600 linear km from the nearest locality in the Cordillera de la Costa, Venezuela (Esqueda *et al.*, 2001). Furthermore, the record of *D. gracilis* in the Cauca River basin is equally noteworthy, as this snake species was previously recorded only in the humid forests of the biogeographic Chocó in Colombia and Ecuador (Harvey, 2008; Uetz *et al.*, 2023). Published records supported by voucher specimens in Colombia were from the departments of Chocó (Castaño-Mora *et al.*, 2004), Cesar (Moreno-Arias, 2010), and Boyacá (Carvajal-Cogollo *et al.*, 2022). The new record in Caldas is the first known occurrence in the Cauca River basin, extending its distribution by nearly 200 km to the nearest locality in La Cristalina, Puerto Boyacá, Department of Boyacá.

Magdalenasaura adercum was recently described for the northeastern Cordillera Central in Antioquia and placed in the *Magdalenasaura* genus, which is considered endemic to the Magdalena River basin (Fang *et al.*, 2022). The record in the Selva de Florencia Natural Park extends its distribution approximately 55 kilometers to the south of the nearest locality in the Cocorná River, Department of Antioquia (Fang *et al.*, 2022).

A considerable number of non-avian reptile records from Manizales, Norcasia, and Samaná resulted from the monitoring and characterization conducted in the framework of the La Miel I hydroelectric and the Manizales + Biodiversa projects (Toro-Restrepo & Ramírez-Castaño, 2016; Ramírez-Chaves *et al.*, 2022). These initiatives, involving monitoring programs at different time scales, have enhanced our knowledge at local and regional levels (Rojas-Morales *et al.*, 2016; Stephenson *et al.*, 2022). Future research should focus on understanding the diversity patterns of non-avian reptiles in municipalities with low or no recorded findings, particularly within reserves and protected areas like Los Nevados National Park and Selva de Florencia National Park. There is an urgent need to intensify sampling efforts in these protected areas and pristine zones, as they likely host poorly known and potentially undescribed species. For example, the record of *Drepanoides* sp. by Rueda-Almonacid (2000) in Selva de Florencia is noteworthy. This snake specimen (VR 4736) is believed to represent an undescribed taxon, but further research and the collection of more specimens are required to clarify its taxonomic status. The only recognized species of the genus *Drepanoides* is *D. anomalus* (Jan, 1863), which has distinct characteristics compared to the VR 4736 specimen: the absence of loreal scales, fewer ventral and subcaudal scales, and the absence of maxillary teeth (Guedes *et al.*, 2020). We have included this record with caution to emphasize the importance of sampling in pristine areas with high conservation value, like the mentioned parks, the Arma and Samaná rivers basins bordering Antioquia, and the forests at the Occidental Cordillera in limits with the Department of Risaralda.

Supplementary information

View the supplementary information in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2007/3491>

Acknowledgments

We thank the Centro de Museos at the Universidad de Caldas for maintaining the biological collections. The National Authority of Environmental Licenses (ANLA) granted the permits for specimen collection (Resolutions No. 1166 of 2014 and 00519 of 2022). The National Natural Parks of Colombia allowed access to different protected areas under its jurisdiction for field research. ISAGEN S.A. ESP funded biodiversity monitoring in the areas of influence in eastern Caldas. Special thanks to Vanessa Serna and John Harold Castaño (UNISARC), Martha Calderon (ICN), and Sandra Galeano (IAvH) for the photographs of specimens under their care; to Michael B. Harvey, José Fang, and Luis F. Esqueda for their clarifying comments for the identification of some specimens; to Sergio Escobar Lasso for sharing a photo we included in the supplementary material. HERC thanks Alexandra Cardona-Giraldo and her family for helping to obtain the record of *Hemidactylus angulatus* and the Visiting Scholar Fulbright Program (cohort 2023) for support. Finally, we thank CHEC Grupo EPM, Idea Wild, Save the Snakes, and Mohamed bin Zayed Species Conservation Fund for financial support. JARM received a doctoral fellowship (BPIN 2022000100055 – Becas V) from the Colombian Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.

Author contributions

JARM: Conceptualization, data curation, formal analysis, manuscript writing, revision, and editing; funding acquisition. HFAM: Data curation, funding acquisition, manuscript writing, revision, and editing. LSCM: Conceptualization, data curation, methodology, manuscript writing, review, and editing. JJHO: Data curation, investigation, methodology, manuscript writing, revision, and editing. EACG: Data curation, methodology, manuscript writing, revision, and editing. HERCh: Conceptualization, funding acquisition, investigation, project administration, manuscript writing, revision, and editing.

Conflicts of interest

The authors declare no personal, financial, or institutional conflicts of interest.

References

- Acosta-Galvis, A. R. (2009). *Estado del conocimiento de los anfibios y reptiles del departamento de Caldas: vacíos de información y las prioridades de conservación*. Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS).
- Amézquita, A., Mazariegos-H, L. A., Cañaverall, S., Orejuela, C., Barragán-Contreras, L. A., Daza, J. M. (2023). Species richness under a vertebral stripe: integrative taxonomy uncovers three additional species of *Pholidobolus* lizards (Sauria, Squamata, Gymnophthalmidae) from the north-western Colombian Andes. *Zookeys*, 1141, 119-148. <https://doi.org/10.3897/zookeys.1141.94774>
- Arbeláez-Cortés, E. (2013). Knowledge of Colombian biodiversity: published and indexed. *Biodiversity and Conservation*, 22(12), 2875-2906. <https://doi.org/10.1007/s10531-013-0560-y>
- Armenteras, D. & Rodríguez-Eraso, N. (2014). Dinámicas y causas de deforestación en bosques de Latino América: una revisión desde 1990. *Colombia Forestal*, 17(2), 233-246. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a07>
- Arredondo, J. C. & Bolívar, W. (2017). *Anadia antioquiensis*. The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T48832571A48832574. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-2.RLTS.T48832571A48832574.en>
- Arteaga, A. & Batista, A. (2023): A consolidated phylogeny of snail-eating snakes (Serpentes, Dipsadini), with the description of five new species from Colombia, Ecuador, and Panama. *ZooKeys*, 1143, 1-49.

- Cabarcas-Antequera, H.** (1994). *Bestiario del Nuevo Reino de Granada. La Imaginación animalística medieval y la descripción literaria de la naturaleza americana*. Instituto Caro y Cuervo.
- Cardona-Botero, V. E., Viáfara-Vega, R. A., Valencia-Zuleta, A., Echeverry-Bocanegra, A., Hernández-Córdoba, O. D., Jaramillo-Martínez, A. F., Galvis-Cruz, R., Gutiérrez, J. A., Castro-Herrera, F.** (2013). Diversidad de la herpetofauna en el Valle del Cauca (Colombia): un enfoque basado en la distribución por ecorregiones, altura y zonas de vida. *Biota Colombiana*, 14(2), 156-233.
- Carvajal-Cogollo, J. E., Rojas-Murcia, L. E., Cárdenas-Arévalo, G.** (2020). *Reptiles del Caribe Colombiano/Reptiles of the Colombian Caribbean*. Editorial UPTC.
- Castro-Herrera, F. & Vargas-Salinas, F.** (2008). Anfibios y reptiles en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. *Biota Colombiana*, 9(2), 251-277.
- Cieza de León, P. D.** (1994). Crónica del Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Espinosa, A.** (1991). La misión Boussingault (1822-1831), sus resultados y su influencia en la ciencia colombiana. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 18(68), 15-22.
- Flórez-Jaramillo, L. Á. & Barona-Cortés, E.** (2016). Diversity of reptiles associated with three contrasting areas in a Tropical Dry Forest (La Dorada and Victoria, Caldas). *Revista de Ciencias*, 20(2), 109-123.
- Friede, J.** (1978). *Los Quimbaya bajo la dominación española: Estudio documental (1539-1810)*. Editorial Carlos Valencia.
- Gentry, A. H.** (1995). Patterns of diversity and floristic composition in Neotropical montane forests. En S. P. Churchill, H. Balslev, E. Forero, J. Lutein. (Ed.), *Biodiversity and Conservation of Neotropical Montane Forests*. New York Botanical Garden.
- González-M, R., García, H., Isaacs, P., Cuadros, H., López-Camacho, R., Rodríguez, N., Pérez, K., Mijares, F., Castaño-Naranjo, A., Jurado, R., Idárraga-Piedrahíta, A., Rojas, A., Vergara, H., Pizano, C.** (2018). Disentangling the environmental heterogeneity, floristic distinctiveness and current threats of tropical dry forests in Colombia. *Environmental Research Letters*, 13(4), 045007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaad74>
- Guedes, T. B., Queiroz, A., Sousa, P., Hamdan, B.** (2020). Updated distribution maps with new records of *Trielpida fuliginosa* (Passos, Caramaschi & Pinto, 2006) and *Drepanoides anomalus* (Jan, 1863) (Squamata, Serpentes) in the state of Maranhão, northeastern Brazil. *Check List*, 16(2), 423-433. <https://doi.org/10.15560/16.2.423>
- Harvey, M. B.** (2008). New and poorly known *Dipsas* (Serpentes: Colubridae) from northern South America. *Herpetologica*, 64(4), 422-451. <https://doi.org/10.1655/07-068R1.1>
- Harvey, M. B., Ungueto, G. N., Gutberlet, Jr., R. L.** (2012). Review of teiid morphology with a revised taxonomy and phylogeny of the Teiidae (Lepidosauria: Squamata). *Zootaxa*, 3459, 1-156.
- Hazzi, N., Moreno, J., Movliav, C., Palacio, R. D.** (2018). Biogeographic regions and events of isolation and diversification of the endemic biota of the tropical Andes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(31), 7985-7990. <https://doi.org/10.1073/pnas.1803908115>
- Henao-Osorio, J. J., Pereira-Ramírez, A. M., Cardona-Giraldo, A., Arias-Monsalve, H. F., Rojas-Morales, J. A., Caicedo-Portilla, J. R., Ramírez-Chaves, H. E.** (2021). On the distribution of three exotic geckos of genus *Hemidactylus* Gray, 1825 (Squamata, Gekkonidae), and an unusual record of the native lizard *Gymnophthalmus speciosus* (Hallowell, 1861) outside its elevational range in Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45(175), 462-473.
- Hurtado-Gómez, J. P., Arredondo, J. C., Sales-Nunes, P. M. Daza, J. M.** (2018). A new species of *Pholidobolus* (Squamata: Gymnophthalmidae) from the Paramo Ecosystem in the Northern Andes of Colombia. *South American Journal of Herpetology*, 13(3), 271-286. <https://doi.org/10.2994/SAJH-D-15-00014.1>
- Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química – INGEOMINAS.** (1993). Mapa geológico generalizado del Departamento de Caldas. Geología y recursos minerales. INGEOMINAS.
- IUCN.** (2023). *The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2022-2*. <https://www.iucnredlist.org>.
- Kattan, G. H., Franco, P., Rojas, V., Morales, G.** (2004). Biological diversification in a complex region: a spatial analysis of faunistic diversity and biogeography of the Andes of Colombia. *Journal of Biogeography*, 31(11), 1829-1839. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2004.01109.x>

- La Marca, E. & Soriano, P. (Eds.).** (2004). Reptiles de Los Andes de Venezuela. Fundación Polar, Conservación Internacional, CODEPRE-ULA, Fundacite Mérida, BIOGEOS.
- Llambí, L. D., Becerra, M. T., Peralvo, M., Avella, A., Baruffol, M., Flores, L. J.** (2019). Monitoring biodiversity and ecosystem services in Colombia's high Andean ecosystems: toward an integrated strategy. *Mountain Research and Development*, 39(3), A8-A20. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-19-00020.1>
- Linares-Vargas, C. A., Bolívar-García, W., Herrera-Martínez, A., Osorio-Domínguez, D., Ospina, O. E., Thomas, R., Daza, J. D.** (2021). The status of the anomalepid snake *Liotyphlops albirostris* and the revalidation of three taxa based on morphology and ecological niche models. *The Anatomical Record*, 304(10), 2264-2278. <https://doi.org/10.1002/ar.24730>
- Lynch, J. D., Ruiz-Carranza, P. M., Ardila-Robayo, M. C.** (1997). Biogeographic patterns of Colombian frogs and toads. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 21(80), 237-248.
- McCranie, J. R. & Hedges, B.** (2013). A review of the *Cnemidophorus lemniscatus* group in Central America (Squamata: Teiidae), with comments on other species in the group. *Zootaxa*, 3722(3), 301-316. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.3722.3.1>
- Medem, F.** (1968). El desarrollo de la herpetología en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 13(50), 149-200. <https://doi.org/10.18257/racefyn.573>
- Morales-Betancourt, M. A., Lasso, C. A., Páez, V. P., Bock, B. C.** (2015). *Libro rojo de reptiles de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), Universidad de Antioquia.
- Moreno-Arias, R. & Quintero-Corzo, S.** (2015). Reptiles del valle seco del río Magdalena (Huila, Colombia). *Caldasia*, 37(1), 183-195. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v37n1.50811>
- Morrone, J. J., Escalante, T., Rodríguez-Tapia, G., Carmona, A., Arana, M., Mercado-Gómez, J. D.** (2022). Biogeographic regionalization of the Neotropical region: new map and shapefile. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 94(1), 1-5. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220211167>
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. B., Kent, J.** (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853-858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Newbold, T., Hudson, L. N., Hill, S. L. L., Contu, S., Lysenko, I., Senior, R. A., Börger, L., Bennett, D. J., Choimes, A., Collen, B., Day, J., De Palma, A., Díaz, S., Echeverría-Londoño, S., Edgar, M. J., Feldman, A., Garon, M., Harrison, M. L. K., Alhusseini, T., Ingram, D. J., Purvis, A.** (2015). Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 520(7545), 45-50. <https://doi.org/10.1038/nature14324>
- Ordoñez, M., Laverde, C., Battaglia, M.** (2022). The new lava dome growth of Nevado del Ruiz (2015–2021). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 430, 107626. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107626>
- Osorio, O. J.** (1990). Las investigaciones arqueológicas en la zona Quimbaya. En L. Fonseca. (Ed.), *Arte de la Tierra: Quimbayas*. Fondo de Promoción de la Cultura, Banco Popular.
- QGIS Development Team.** (2023). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgisgeo.org>
- Ramírez-Chaves, H. E., Henao-Osorio, J. J., Cardona-Galvis, E. A., Arias-Monsalve, H. F., Rojas-Morales, J. A.** (2022). Listado de los reptiles (Reptilia) del departamento de Caldas, Colombia. V1.0. Universidad de Caldas. Dataset/Checklist. <https://doi.org/10.15472/vxjiis>
- Ramírez-Chaves, H. E., Arias-Monsalve, H. F., Henao-Osorio, J. J., Mejía-Fontecha, I. Y., Usama-Suárez, L. A., Ramírez-Castaño, V. A., Rojas-Morales, J. A.** (2021). Colección de reptiles no aves (Reptilia), Museo de Historia Natural de la Universidad de Caldas, Colombia. *Biota Colombiana*, 22(2), 173-181. <https://doi.org/10.21068/c2021.v22n02a11>
- Rivas, G.A., Molina, C.R., Ugueto, G.N., Barros, T.R., Barrio-Amorós, C.L., Kok, P.J.** (2012). Reptiles of Venezuela: an updated and commented checklist. *Zootaxa*, 3211, 1-64. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.3211.1.1>
- Rojas-Morales, J. A.** (2012). Snakes of an urban-rural landscape in the central Andes of Colombia: species composition, distribution, and natural history. *Phyllomedusa*, 11(2), 135-154.
- Rojas-Morales, J. A., Arias-Monsalve, H. F., González-Durán, G. A.** (2014). Anfibios y reptiles de la región centro-sur del departamento de Caldas, Colombia. *Biota Colombiana*, 15(1), 73-93.
- Rojas-Morales, J. A., Ramírez-Castaño, V. A., Díaz-Ayala, R. F.** (2016). Anfibios y reptiles. En: Toro-Restrepo, B. & Ramírez-Castaño, V. A. (eds.). *Fauna vertebrada de la Central Hidroeléctrica Miel I*. ISAGEN - Universidad de Caldas.

- Röthlisberger, E.** (1963). *El Dorado: estampas de viaje y cultura de la Colombia suramericana*. Banco de la República.
- Rueda-Almonacid, J. V.** (2000). *La herpetofauna de los bosques de Florencia, Caldas*. Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS).
- Rueda-Almonacid, J. V.** (2010). *Anfibios y reptiles de los bosques de La Aguadita, región del Salto del Tequendama y Puerto Salgar departamento de Cundinamarca*. Informe Final, Conservación Internacional-Colombia y Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR.
- Santa Gertrudis, Fray Juan de.** (1956). *Las maravillas de la naturaleza*. Tomo i, ii, iii, iv. Ed. Kelly, Biblioteca Banco Popular.
- Stephenson, P.J., Londoño-Murcia, M. C., Borges, P. A. V., Claassens, L., Frisch-Nwakanma, H., Ling, N., McMullan-Fisher, S., Meeuwig, J. J., Unter, K. M. M., Walls, J. L., Burfield, I. J., do Carmo Vieira Correa, D., Geller, G. N., Montenegro-Paredes, I., Mubalama, L. K., Ntiamoa-Baidu, Y., Roesler, I., Rovero, F., Sharma, Y. P., Wiwardhana, N. W., Yang, J., Fumagalli, L.** (2022). Measuring the Impact of Conservation: The Growing Importance of Monitoring Fauna, Flora and Funga. *Diversity*, 14(10), 824. <https://doi.org/10.3390/d14100824>
- Toro-Restrepo, B. & Ramírez-Castaño, V. A.** (Eds). (2016). *Fauna vertebrada de la Central Hidroeléctrica Miel I*. ISAGEN - Universidad de Caldas.
- Uetz, P., Freed, P., Aguilar, R., Reyes, F., Hošek, J. (Ed.).** (2023). *The Reptile Database*. <http://www.reptile-database.org>
- Vanegas-Guerrero, J., Fernández, C., Buitrago-González, W., Vargas-Salinas, F.** (2016). Urban remnant forests: Are they important for herpetofaunal conservation in the central Andes of Colombia? *Herpetological Review*, 47, 180-185.
- Vargas-Salinas, F. & Aponte-Gutiérrez, A.** (2016). Diversidad y recambio de especies de anfibios y reptiles entre coberturas vegetales en una localidad del valle del Magdalena medio, departamento de Antioquia, Colombia. *Biota Colombiana*, 17(2), 117-137. <https://doi.org/10.21068/c2016.v17n02a09>
- Vásquez-Restrepo, J. D., Ibáñez, R., Sánchez-Pacheco, S. J., Daza, J. M.** (2020). Phylogeny, taxonomy and distribution of the Neotropical lizard genus *Echinosaura* (Squamata: Gymnophthalmidae), with the recognition of two new genera in Cercosaurinae. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 189(1), 287-314. <https://doi.org/10.1093/zoolinnean/zlz124>
- Zúñiga-Baos, J. A.** (2023). Mortalidad de serpientes en el área urbana del municipio Neira, Caldas, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencia Animal, Recia*, 15(1), e968. <https://doi.org/10.24188/recia.v15.n1.2023.968>

Original article

Beyond hippos: Evidence of an introduced deer in Colombia

Más allá de los hipopótamos: evidencia de un venado introducido en Colombia

✉ Héctor E. Ramírez-Chaves^{1,*}, ✉ Néstor Roncancio-Duque², ✉ Darwin M. Morales-Martínez³

¹Grupo de Investigación en Genética, Biodiversidad y Manejo de Ecosistemas (GEBIOME), Departamento de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas; Centro de Museos, Museo de Historia Natural, Universidad de Caldas

²Doctorado en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Palmira, Colombia

³Museum of Natural Science and Department of Biological Sciences, Louisiana State University, Baton Rouge, USA

Abstract

More than 18% of the cases of invasive mammals worldwide correspond to South America, including small rodents and large species such as deer and hippos. Among exotic mammals in Colombia, we can mention pigs (*Sus scrofa*), which are well established, mainly in the Orinoquía region of the country, and more recently, hippos (*Hippopotamus amphibius*) with a growing area of occurrence in the middle and lower basin of the Magdalena River in the inter-Andean zone. In May 2022, a spotted exotic deer was documented in the area based on direct and indirect observations (photographs and videos) of living individuals and a partial skeleton. The spotted pattern of the photographed adults (absent in native or other exotic deer) and the juvenile individuals and the shape of the antlers show that they are chitals (*Axis axis*), a species native to Asia. Compared with the white-tailed deer *Odocoileus*, the largest native deer species in Colombia, the *Axis* skeleton was one-third bigger, which corroborated the identification. According to local inhabitants' communications, the number of *Axis* has increased, and groups of up to 18 individuals have been recorded. This is the first time that exotic deer have been documented in Colombia. Their presence may impact natural regeneration and competitively displace other native herbivores, which calls for the mitigation and control of the population since its establishment and dispersal can be cryptic.

Keywords: Cervidae; Exotic species; Introduction; Mammalia, Northern Andes.

Resumen

Los mamíferos invasores en Sudamérica representan más del 18 % de los casos a nivel mundial, que incluyen desde roedores pequeños hasta especies de gran tamaño como los venados e hipopótamos. En Colombia los cerdos (*Sus scrofa*) son los mamíferos exóticos de gran tamaño que se consideran bien establecidos, principalmente en la Orinoquía. Otro caso es el de los hipopótamos (*Hippopotamus amphibius*), que han aumentado su área de presencia en la cuenca media y baja del río Magdalena en la zona interandina. En mayo de 2022, a partir de observaciones directas e indirectas (fotografías y videos) de individuos vivos y de un esqueleto parcial, se documentó la presencia de un ciervo manchado exótico en la misma área de los hipopótamos. El patrón de manchas en las fotografías de los individuos adultos (ausente en ciervos nativos) y juveniles, así como la forma de las astas, permitieron confirmar que se trataba del chital (*Axis axis*), una especie originaria de Asia. Al comparar el esqueleto con el de especímenes de venado de cola blanca *Odocoileus*, la especie de ciervo nativa de mayor tamaño en Colombia, se encontró que el de *Axis* era un tercio más grande, lo que corroboró la identificación. Según habitantes locales, el número de *Axis* ha aumentado y se han visto grupos de hasta de 18 individuos. Esta es la primera vez que se documenta la presencia de venados exóticos en Colombia, lo que puede impactar la regeneración natural y desplazar competitivamente otros herbívoros nativos. En ese sentido, la mitigación y el control de su población debe ser prioritaria, toda vez que su establecimiento y dispersión pueden ser crípticos.

Palabras clave: Andes del norte; Cervidae; Especies exóticas; Introducción; Mammalia.

Citation: Ramírez-Chaves HE, Roncancio-Duque N, Morales-Martínez DM. Beyond hippos: Evidence of an introduced deer in Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185):882-888, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1953>

Editor: Martha Patricia Ramírez Pinilla

***Corresponding autor:**

Héctor E. Ramírez-Chaves (HERC);
hector.ramirez@ucaldas.edu.co

Received: July 19, 2023

Accepted: December 1, 2023

Published on line: December 14, 2023



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

Introduction

Invasive mammals in South America represent more than 18% of the cases worldwide (Speziale & Lambertucci, 2010); they range from small-sized species of rodents (e.g., *Rattus rattus*) and rabbits (e.g., *Oryctolagus cuniculus*) to large species such as deer (*Axis axis*, *Dama dama*, *Rangifer tarandus*) and horses (*Equus caballus*) (Patiño, 1970; Novillo & Ojeda, 2008; Ramírez-Chaves *et al.*, 2011). One of the most mediatic cases of invasive mammals in South America has been the hippos (*Hippopotamus amphibius*) introduced in the inter-Andean valley of the Magdalena River in Colombia, extensively documented in recent years (Valderrama-Vásquez, 2012; Dembitzer, 2018; Castelblanco-Martínez *et al.*, 2021).

Hippos are at an establishment phase in Colombia (Montenegro *et al.*, 2019) and have been the focus of much controversy due to their origin and the ineffective methods used to control their population growth (Valderrama Vásquez, 2012; Monsalve-Buriticá & Ramírez-Guerra, 2018; Castelblanco-Martínez *et al.*, 2021). Among other artiodactyls in Colombia, only feral pigs (*Sus scrofa*) are well-established (Montenegro *et al.*, 2019), while other species, such as goats (*Capra aegagrus hircus*), have had effects on natural ecosystems (endangered dry-forest) (Valencia-Duarte *et al.*, 2012). Exotic cervids had not been documented in the country yet. Here, we present evidence of an exotic deer species in the inter-Andean valley of the Magdalena River.

Methodology

We used two approaches to confirm the species' presence in Colombia. First, we reviewed a partial skeleton of a large mammal recovered in May 2022 in the municipality of Puerto Triunfo (5.89 N, -74.70 W; 190 m a.s.l.), Department of Antioquia, and donated to the Mammal Collection at the Museo de Historia Natural, Universidad de Caldas (MHN-UCa-M). The partial skeleton (MHN-UCa-M 4047) includes the femora, scapula, pelvis, tibia, 12 ribs, eight thoracic vertebrae, two cervical and two lumbar, metatarsus, one phalanx, and sacrum. We took linear measurements (Table 1) of the femora (greatest length), scapula (diagonal height), pelvis (greatest length of one half), tibia (greatest length), metatarsus (greatest length) following von Den Driesch (1976). We compared them with the largest native deer naturally distributed in Colombia (the white-tailed deer, *Odocoileus gr. virginianus*), and with morphometric information in the literature (Yadav *et al.*, 2013, 2015) of exotic deer in South America (Novillo & Ojeda, 2008), such as *Axis axis*, *Dama dama*, *Cervus elaphus*, and *Rangifer tarandus*. We also compared the femora of MHN-UCa-M 4047 with *A. axis* skeletons from zoo specimens deposited at the Zoologische Staatssammlung München (ZSM) in Munich (ZSM 1963/27♀). Second, we asked unstructured questions with no standard methodology about the presence of large deer to inhabitants in the area where the partial skeleton was recovered and searched for photographs to confirm their observations. These were compared with cervid illustrations (Burgin *et al.*, 2020) to verify the identification using external traits like the coat pattern and the antlers shape.

Results and discussion

The partial skeleton belonged to an adult cervid given the degree of ossification: the bones were longer than those of *Odocoileus* (Table 1) and matched the size of *A. axis* individuals. We confirmed that the MHN-UCa-M 4047 femora belonged to an *A. axis* individual based on the following traits: The femora show a weak indent between the articular head and the great trochanter in *A. axis* and a strong one in *O. virginianus*; the proximal border of the great trochanter is flat in *A. axis* and more rounded in *O. virginianus* (Figure 1).

We also confirmed the identification based on the photographs and videos provided by the locals and our team's observations (NR-D) of individuals of all ages (Figure 2). The spotted pattern of adult and juvenile individuals (not present in *R. tarandus* and *C.*

Table 1. Linear measurement (mm) of some postcranial bones of *Axis axis* and *Odocoileus gr. virginianus* from Colombia. ¹ *Yadav et al.* (2013). ² *Yadav et al.* (2015)

	<i>Axis axis</i> MHN-UCa-M 4047	<i>Axis axis</i> 227 ± 2.3 ¹	<i>O. gr. virginianus</i> MHN- UCa-M 2078 (Colombia)
Femora greatest length	241.85 and 242.18		199.43-199.48
Scapula diagonal height	190.65		
Pelvis greatest length, one half	238.57		
Tibia greatest length	262.28		222.52
Metatarsus greatest length	201.60	168 ± 0.7 ²	180.48
Sacrum greatest length	124.65		80.99
Phalanx	42.35		34.91

**Figure 1.** Comparison of the femur of (A) the exotic *Axis axis*, and (B) the white-tailed deer *Odocoileus gr. virginianus* from Colombia. The comparison shows a weak indent (white arrow) between the articular head and the great trochanter in *A. axis* and a strong one in *O. gr. virginianus*.

elaphus), and the long antlers with three lines (broad and palmate in *D. dama*) confirmed the identification as *A. axis* (Figure 2). The locals commented that the number of *A. axis* had increased, and groups of up to 18 individuals had been recorded. Very likely, their origin is the same as the introduced hippos because they have been seen near the Hacienda Napoles (Figure 3).

This is the first time an exotic deer has been reported in Colombia. There are records of introduced *A. axis* in Argentina (Novillo & Ojeda, 2008) and Brazil (Preuss et al., 2020; Foster et al., 2021), and *C. elaphus* and *D. dama* in Argentina and Chile (Vásquez, 2002;



Figure 2. *Axis axis* adult and juveniles (male and female) introduced in Colombia. Photographs: Román Jiménez.

Novillo & Ojeda, 2008). Introduced deer and other ungulates increase native predators' densities and play a critical role as reservoirs and vectors of parasites and infectious diseases (**Dolman & Wäber, 2008**), which may negatively affect native deer species. Specifically, *A. axis* may impact the natural regeneration of the native forest and generate competitive displacement of native deer as in other areas where it has been introduced (**Novillo & Ojeda, 2008**). Considering the lack of data on the local diversity of deer species in Colombia and the conservation status of these populations (**Solari *et al.*, 2013**;

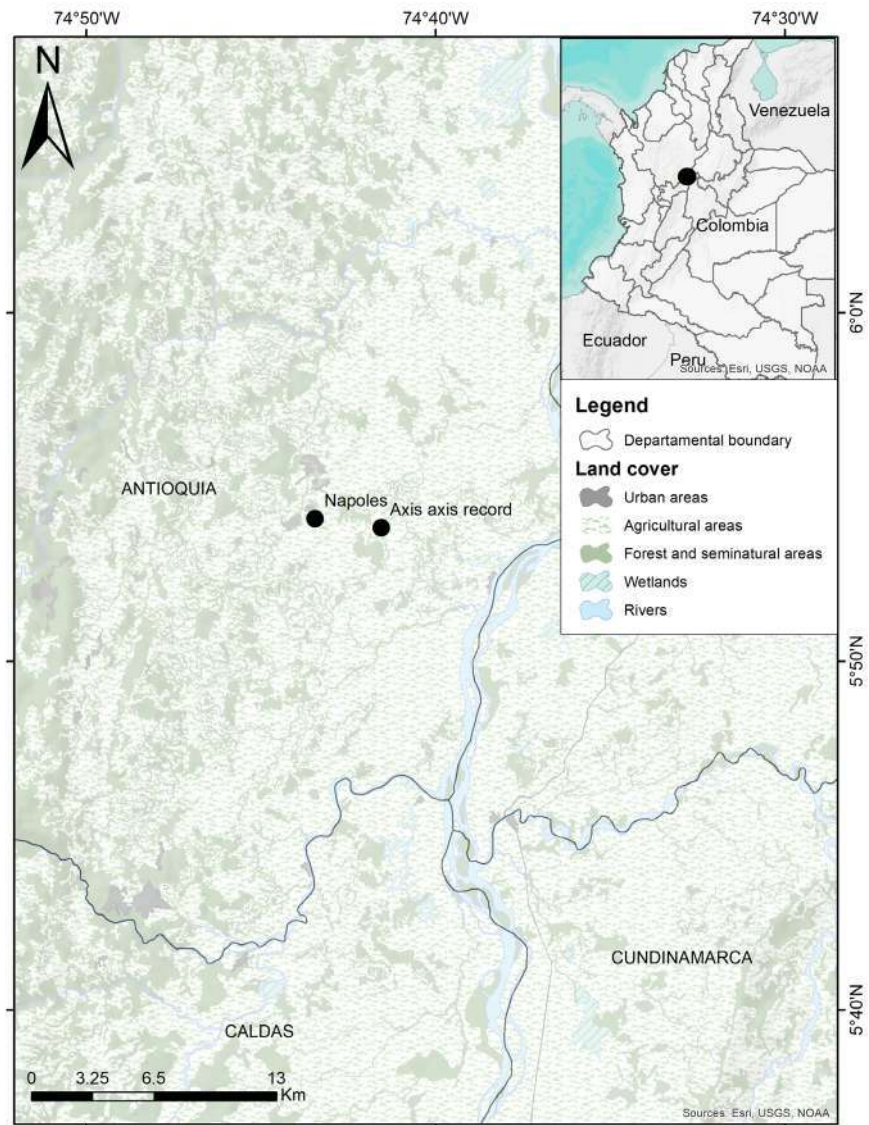


Figure 3. Location of introduced *Axis axis* in Colombia

Ramírez-Chaves *et al.*, 2021a, b), the presence of exotic deer represents a serious threat to native deer populations. For instance, red brockets such as *Mazama zetta*, which is likely a valid species endemic to the Andean cordilleras and inter-Andean valleys between the Colombian departments of Antioquia and Tolima (Sarría-Perea, 2012), are potentially threatened by high deforestation rates (Rodríguez *et al.*, 2013), and its direct interaction with *A. axis* can be harmful. In this context, mitigation and population control of exotic deer should be a priority.

Acknowledgements

We thank Román Jiménez for the photographs of the *Axis axis* individuals. DMMM thanks the Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación and the Fulbright-Colombia Commission's support for his doctoral studies (Fulbright-MinCiencias 2022 scholarship), and NSF DEB 1754393: Rates of lineage, phenotypic, and genomic diversification in replicated radiations of murine rodents. HERC thanks Fulbright Colombia (Colombian visiting researcher, 2023 cohort scholarship).

Author contribution

HERC: Project design, data collection, analysis, and interpretation, manuscript writing-review and editing. NRD, DMMM: data collection, analysis, and interpretation, manuscript writing-review and editing.

Conflicts of interest

None.

References

- Burgin, C.J., Wilson, D.E., Mittermeier, R.A., Rylands, A.B., Lacher, T.W., Sechrest W. (2020) *Illustrated Checklist of the Mammals of the World*. Lynx Ediciones.
- Castelblanco-Martínez, D.N., Moreno-Arias, R.A., Velasco, J.A., Moreno-Bernal, J.W., Restrepo, S., Noguera-Urbano, E.A., Baptiste, M.P., García-Loaiza, L.M., Jiménez, G. (2021). A hippo in the room: Predicting the persistence and dispersion of an invasive mega-vertebrate in Colombia, South America. *Biological Conservation*, 253,108923. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108923>
- Dembitzer, J. (2018). The Case for Hippos in Colombia. *Israel Journal of Ecology & Evolution*, 63(3-4), 5-8. <https://doi.org/10.1163/22244662-06303002>
- Dolman, P.M. & Wäber, K. (2008). Ecosystem and competition impacts of introduced deer. *Wildlife Research*, 35 (3), 202-214. <https://doi.org/10.1071/WR07114>
- Foster, V.C., Reginato, T., Kotz, A., Dias, J., Barros, Y. (2021). First record of axis deer (*Axis axis* – Erxleben, 1777) in the state of Paraná, southern Brazil. *DSG Newsletter* 32, 72-78.
- Novillo, A. & Ojeda, R.A. (2008). The exotic mammals of Argentina. *Biological Invasions*, 10 (8), 1333-1344
- Monsalve Buriticá, S. & Ramírez Guerra, A. (2018). Estado actual de los hipopótamos (*Hippopotamus amphibius*) en Colombia: 2018. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 13 (3), 338-346.
- Montenegro, O.L., López-Arévalo, H.F., Mora-Beltrán, C., Lizcano, D.J., Serrano, H., Mesa, E., Bonilla-Sánchez, A. (2019) Tropical ungulates of Colombia. In: Gallina-Tessaro, S. (Ed.), *Ecology and conservation of tropical ungulates in Latin America*. Springer Nature.
- Patiño, M.V. (1970). *Plantas cultivadas y animales domésticos en América Equinoccial. Tomo V. Animales domésticos introducidos*. Imprenta Departamental, Cali.
- Preuss, J.F., Posser, E., Albrecht, L.B., Da Silva, V.P.R., Bandiera, F.C. (2020). First record of the exotic species *Axis axis* (Erxleben, 1777) (Artiodactyla, Cervidae) in the state of Santa Catarina, southern Brazil. *Check List* 16 (5), 1139-1142. <https://doi.org/10.15560/16.5.1139>
- Ramírez-Chaves, H.E., Ortega-Rincón, M., Pérez, W. A., Marín, D. (2011). Historia de las especies de mamíferos exóticos en Colombia. *Boletín Científico, Centro de Museos, Museo de Historia Natural*, 15 (2), 139-156.
- Ramírez-Chaves, H.E., Morales-Martínez, D.M., Rodríguez-Posada, M.E., Suárez-Castro, A. F. (2021a). Checklist of the mammals (Mammalia) of Colombia: Taxonomic changes in a highly diverse country. *Mammalogy Notes*, 7 (2), 253. <https://doi.org/10.47603/mano.v7n2.253>
- Ramírez-Chaves, H.E., Ossa-López, P.A., Lasso-Lasso, L., Rivera-Páez, F.A., Roncancio Duque, N., Escobedo-Morales, L.A., Maldonado, J.E. (2021b). Range extension of the Central American Red Brocket, *Mazama temama* (Kerr, 1792) (Artiodactyla, Cervidae) in Colombia. *Check List*, 17 (4), 1095-1102. <https://doi.org/10.15560/17.4.1095>
- Rodríguez, N., Armenteras-Pascual, D., Retana J. (2013). Land use and land cover change in the Colombian Andes: dynamics and future scenarios. *Journal of Land Use Science*, 8 (2), 154-174. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2011.650228>
- Sarria-Perea, J.A. (2012). *Taxonomia e filogenia de algumas espécies de Mazama (Mammalia; Cervidae) da Colômbia*. [Thesis]. [JABOTICABAL]: Universidade Estadual Paulista “Julio De Mesquita Filho”.
- Speziale, K. & Lambertucci, S. (2010). A call for action to curb invasive species in South America. *Nature*, 467, 153. <https://doi.org/10.1038/467153c>
- Solari, S., Muñoz-Saba, Y., Rodríguez-Mahecha, J. V., Defler, T.R., Ramírez-Chaves, H.E., Trujillo, F. (2013). Riqueza, endemismo y conservación de los mamíferos de Colombia. *Mastozoología Neotropical*, 20(2), 301-365.

-
- Valderrama-Vásquez, C.A.** (2012). Wild hippos in Colombia. *Aliens: The Invasive Species Bulletin. Newsletter of the UICN/SCC Invasive Species Specialist Group*, 32, 8-12.
- Valencia-Duarte, J.** (2012). Dinámica de la vegetación en un enclave semiárido del río Chicamocha, Colombia. *Biota Colombiana*, 13 (2), 40-65.
- Vázquez, D.P.** (2002). Multiple effects of introduced mammalian herbivores in a temperate forest. *Biological Invasions*, 4, 175-191. <https://doi.org/10.1023/A:1020522923905>
- von den Driesch, A.** (1976). *A guide to the measurement of animal bones from archaeological sites*. Harvard University Press, Peabody Museum of Archaeology and Ethnology, Peabody Museum Bulletin.
- Yadav, S.C., Joshi, S., Mathur, R., Choudhary, O.P.** (2013). Gross and Biometrical Studies on Pelvic Bones of Chital (*Axis axis*). *Indian Journal of Veterinary Anatomy*, 24 (2), 87-88. <https://epubs.icar.org.in/index.php/IJVA/article/view/27093>
- Yadav, S., Joshi, S., Mathur, R., Choudhary, O.P.** (2015). Morphometry of tarsal and metatarsal of Indian spotted deer (*Axis axis*). *The Indian Veterinary Journal*, 92, 43-46.

Original article

Analysis of the distribution and abundance of two species of cat's claw (*Uncaria* sp.) based on the knowledge of Tikuna indigenous communities in the southern Colombian Amazon

Análisis de la distribución y abundancia de dos especies de uña de gato (*Uncaria* sp.) con base en el conocimiento de comunidades indígenas Tikuna del sur de la Amazonia colombiana

✉ Lina Paola Garzón

Universidad Nacional de Colombia, Sede Amazonia, Leticia, Colombia

Abstract

Uncaria guianensis (Aublet) J.F. Gmel and *U. tomentosa* (Willd. ex Roemer & Schultes) D.C., commonly known as cat's claw, are species with medicinal and commercial value in the Amazon region. Given the intensive extraction of forest resources for commercialization in the region, the distribution and abundance of these species there should be determined. So far, the environmental and edaphic conditions influencing *Uncaria tomentosa* growth and density are better known than those of *U. guianensis*. Besides, cat's claw species distribution in the Colombian Amazon has not been sufficiently studied. In this context, the present study was conducted in two indigenous Tikuna communities together with local experts to make the botanical identification of the two *Uncaria* species. Visits were made to register the landscapes and soils where these plants grow. We found that *U. guianensis* has a higher distribution and abundance in the southern Colombian Amazon than *U. tomentosa*. Both species grow in flooded alluvial areas with Entisol-type soils and dryland Oxisol-type soils. *U. tomentosa* grows especially in primary and secondary forest Oxisol soils on drylands. Our findings suggest that none of these two species have a homogeneous distribution in the region, which explains why their use varies from one area to the other.

Keywords: Ethnoecology; Indigenous knowledge; Amazon soils; Cat's claw.

Resumen

Uncaria guianensis (Aublet) J.F. Gmel y *U. tomentosa* (Willd. ex Roemer & Schultes) D.C., conocidas popularmente con el nombre de uña de gato, son especies con valor medicinal y comercial en la región amazónica. Dado que este recurso se extrae del medio natural para su comercialización, es importante determinar su distribución y abundancia en la región. Hay más información sobre las condiciones ambientales y edáficas que influyen en el crecimiento y densidad de *U. tomentosa* que de *U. guianensis* y, en general, el conocimiento sobre su distribución es limitado. En ese contexto, conjuntamente con conocedores locales de dos comunidades indígenas Tikuna, se hizo la identificación botánica de las dos especies, así como recorridos para reconocer los paisajes y suelos donde crecen. Se encontró que *U. guianensis* tiene una distribución más amplia y mayor abundancia en el sur de la Amazonia colombiana que *U. tomentosa*, ya que crece tanto en áreas inundables aluviales con suelos de tipo Entisol, como en zonas de tierra firme con suelos de tipo Oxisol. *U. tomentosa* crece solo en tierra firme, en suelos de tipo Oxisol de bosque primario y secundario. Los resultados sugieren que no existe una distribución homogénea de las dos especies en la Amazonia, lo que explica que una de las dos especies sea más usada en ciertas zonas que en otras.

Palabras clave: Etnoecología; Conocimiento indígena; Suelos amazónicos; Uña de gato.

Citation: Garzón LP. Analysis of the distribution and abundance of two species of cat's claw (*Uncaria* sp.) based on the knowledge of Tikuna indigenous communities in the southern Colombian Amazon. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185):889-901, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1968>

Editor: Elizabeth Castañeda

Corresponding autor:

Lina Paola Garzón;
lipgarzonga@unal.edu.co

Received: August 11, 2023

Accepted: December 12, 2023

Published on line: December 18, 2023



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

Introduction

The *Uncaria* (Schreb) genus belongs to the Rubiaceae family and comprises about 60 species with a pantropical distribution (Gomes *et al.*, 2016). Only *Uncaria tomentosa* (Willd.) DC. and *Uncaria guianensis* (Aublet) J.F. Gmel. are known in the Amazon region as cat's claw. Both species are widely distributed in humid tropical forests, especially in the Amazon region (Alvarenga, 2010), and they are used in traditional medicine to treat degenerative, infectious, and respiratory diseases and tumors (Garzón, 2019). *Uncaria* species are known as medicinal herbs commercialized worldwide (Gomes *et al.*, 2016). There are cultivation initiatives, but most of the commercialized raw material comes from the natural environment, which has decreased populations, especially in some areas of the Peruvian Amazon (Domínguez & Castillo, 2007).

The species differ in the leaf, spine and bark morphology: *U. guianensis* has ovate leaves, strongly twisted hook-like woody spines, and the main stem has a brown outer shell (Zevallos & Tomazello, 2010), while *U. tomentosa* is characterized by lanceolate leaves, adult spines sparsely curved downward, and yellowish inner bark (Zevallos & Flores, 2003; Cruz *et al.*, 2011). They generally grow in secondary forests but can also be found in primary forests (Gomes *et al.*, 2016). Although cat's claw species have been reported in various soil types (dystric Cambisols, Fluvisols, and ortic Acrisols), *U. tomentosa* is more nutritionally demanding than *U. guianensis* (Domínguez, 1997).

The most studied and commercialized species is *U. tomentosa*, presumably because it is more abundant than *U. guianensis* (Gomes *et al.*, 2016). Some reports on the distribution and abundance of *U. tomentosa* come from Perú (Quinteros, 2001; Domínguez & Castillo, 2007; Canales-Springett *et al.*, 2013), and both species have been studied in the State of Acre in Brazil (Miranda *et al.*, 2003). There is no additional information from other areas in the Amazon region. The study by Zavala & Zevallos (1996) in Perú is the only one reporting on the soil conditions for their growth and development, and, therefore, edaphological information on *U. guianensis* is limited. In this context, an interdisciplinary study was conducted with Tikuna indigenous communities to understand both species' distribution and abundance in the southern Colombian Amazon and the influence of soil conditions in natural and disturbed areas. This will help to determine whether *U. tomentosa*'s abundance is higher than that of *U. guianensis* as it happens in other areas of the Amazon region.

Materials and methods

Study area

Three areas were selected: one in the indigenous community of San Martín de Amacayacu and the other two in Macedonia. The first area (at 3°46'38"S, 70°18'12"W, on the riverside of the Amacayacu River) has denudation soils, as well as the second one (at 03°53'00"S, 70°11'17"W, on the Amazon River). The third area (at 3°51'21"S, 70°13'19"W), known as Mocagua Island, has alluvial soils (Figure 1).



Figure 1. Location of the indigenous communities in the study area

Methodology

The indigenous people with the best knowledge of cat's claw species were identified through a non-probabilistic chain or snowball sampling (Otzen & Manterola, 2017). Semi-structured interviews were conducted with them to gather information on variables of interest: common names and species identity, areas in their territory where they grow, and associations with other plants. Tikuna translators helped when the interviewee's first language was not Spanish, and the plant's common names were mentioned also in the Tikuna language. Social mapping (Vavilina & Skalaban, 2015) helped determine the cat's claw-growing areas in maps made by the participants, including the types of landscapes and soils. With this information, *Uncaria* species roads and observation routes were defined. Given the terrain conditions and the time required in the communities, an area of influence was established following those roads with lengths between 1 and 7 km; these did not cover every locality but allowed us to estimate the distribution pattern of both species.

Based on this cartography, field trips were made with the community experts to search for plants locally recognized as cat's claws. During the trips, they described in their terms the color of the bark, the shape and color of the leaf, the size of the spines, and the changes in landscape types and soil characteristics. Forty-one samples were georeferenced, 38 corresponding to cat's claw individuals (11 of *U. tomentosa* and 27 of *U. guianensis*). There were three samples from other species that some indigenous people indicated as cat's claws: one of *Macfadyena unguis-cati* (L.) A.H. Gentry (Bognoniaceae) and two of *Machaerium* sp (Fabaceae). For confirmation, herbarium samples were collected according to the Arnelas *et al.* (2012) methodology and subsequently deposited and identified at the Colombian Amazon Herbarium – COAH, SINCHI Institute.

For the physicochemical analysis, 500 g of rhizospheric soil was collected at 0-10 cm depth in the sampling points with plants. The description of soil types followed the Peña-Venegas *et al.* (2015) methodology: indigenous participants mention the characteristics according to the colors and textures observed. Codes were assigned using the Munsell chart of hue, clarity, and purity parameters (Dominguez *et al.*, 2012).

Soil samples were analyzed at the Instituto Agustín Codazzi - IGAC soil laboratory in Bogotá, including granulometry, texture class, pH, exchangeable acidity, aluminum saturation, base saturation, total carbon, available phosphorus, cation exchange content (CEC), total bases, and the presence of calcium, potassium, magnesium, and sodium.

Data analysis

The ATLAS.ti 7.0 software served for coding and analyzing the qualitative information from the interviews, and ArcGIS 10.6.1 for the geographic data. First, the sampling points and the observation routes were digitized, and then the area of influence to determine the abundance of the cat's claw species was calculated. This area totaled 25.34 hectares, including the buffer established on the observation routes with a margin of 5 m on each side of the road.

The level of local knowledge of *U. tomentosa* and *U. guianensis* botanical aspects was estimated by the percentage frequency. Species distribution and frequency on the different types of landscapes were also determined. A Kruskal-Wallis non-parametric variance test was performed to establish significant differences with a 5% probability for each soil type, for soils in the study areas and soils associated with the species.

Results

Local identification of *Uncaria* species

Cat's claw commonly names both *Uncaria* species in these communities, but "garabato" is also used, albeit less commonly. Indigenous populations in the Peruvian Amazon use it also (López, 2006). However, these communities have specific names to identify each species: *U. tomentosa*, for example, is known as white cat's claw (*uña de gato blanca* in

Spanish and *michipatü choü* in Tikuna language). The local experts described it as a plant with a green vine and a white inner bark, green, ovate leaves, and a slightly curved spine. *U. guianensis* is locally called red cat's claw (*uña de gato roja*, *michipatü dauü*) and it is identified by its reddish inner bark, reddish leaves on the underside, and fully curled spines (**Figure 2**). Another classification of these species claims that *U. guianensis* is the “male” and *U. tomentosa* is the “female”.

Three samples from Macedonia identified as a cat's claw belong to another species. Two *uña de gato roja* samples from Mocagua Island belong to the *Machaerium* sp. genus (Fabaceae), and an *uña de gato blanca* belonged to *Macfadyena unguis-cati* (Bignoniaceae). Although some species reported as cat's claws did not belong to the *Uncaria* genus, it was evident that the experts are very knowledgeable of the morphological characteristics of the species as 90% of the samples were correctly identified as *U. tomentosa* and 89% as *U. guianensis*, which demonstrate locals' expertise in establishing the species location and distribution.

Uncaria species distribution by landscapes

Indigenous communities identified six landscape types where cat's claw species could occur (**Table 1**). This categorization is based on spatial location, temporal aspects of land use, flooding periods, soil types, vegetation cover, and predominant fauna. According to the degree of intervention and the type of vegetation, cultivated land (*chagra - nqane* in Tikuna language), stubble (*rastrojo – ichikü*), and primary forest (*naimacatüxü*) were identified.

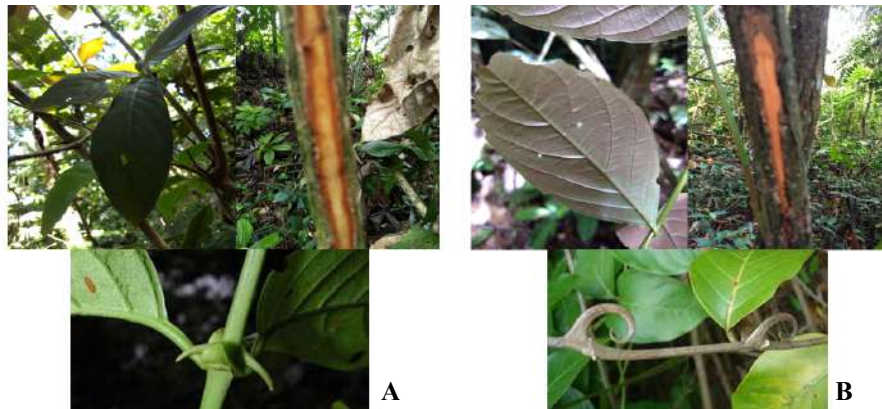


Figure 2. Morphological identification of leaf, bark, and spine of *Uncaria* species. **A)** *Uncaria tomentosa*; **B)** *Uncaria guianensis*

Table 1. Local classification of landscapes in the study area

Common name	Tikuna name	Local description
Stubble on floodplains	ichikü nibaiü	Young secondary forest area, which floods seasonally or during heavy rains
Stubble on highlands	ichikü dauchitaciü	Highland or upland area with natural secondary forest
Cultivation area on floodplains	Nqane nibaiü	Planting plots in floodable areas
Cultivation area on highlands	Nqane dauchitaciü	Cultivation area on dry land or high altitude
Primary forest	Naimacatüxü	Natural forest area on the highland
Várzea	Tatümüànè	Annual flooded area (Mocagua Island)

The Tikuna also distinguish two divisions in the physical space: the highland areas (*dauchitáàné*) and the annual flooded areas (*tatüànè*). Depending on the type of flooding, this second space can be divided into floodplains during the rainy months (*várzea*, *tatümüànè*) and flooded areas during days of prolonged rains (*bajial*, *nibaiü*) (Montes, 2002). Field observations showed that *U. guianensis* distribution and abundance are higher than *U. tomentosa*, especially in flooded areas. There were 1.62 cat's claws individuals per hectare and 1.06 *U. guianensis* individuals in high altitudes and floodplains (Figure 3). In contrast, *U. tomentosa* abundance was 0.43 individuals per hectare, restricted to secondary forests in highlands (Figure 4). This was the only one observed in mature forests with low intervention.

The highest number of *U. guianensis* plants was found in San Martín de Amacayacu, i.e., 82% of the individuals of this species (Figure 5). *U. tomentosa* was more frequent in Macedonia (60%), all in the stubble on highlands (Figure 6). None of these species were found on the Mocagua Island.

Regarding the most frequent species in *Uncaria* habitats, in flooded areas, *Scleria secans* (Cyperaceae) and *Calathea lutea* (Maranthaceae) were found with *U. guianensis*, and in the highlands, *Vismia* sp. (Hypericaceae) and *Cecropia* sp. (Urticaceae). In non-flooded areas habitats, *Apeiba membranacea* (Malvaceae) and *Ormosia* sp. (Fabaceae) were frequent next to *U. tomentosa* (Figure 7).

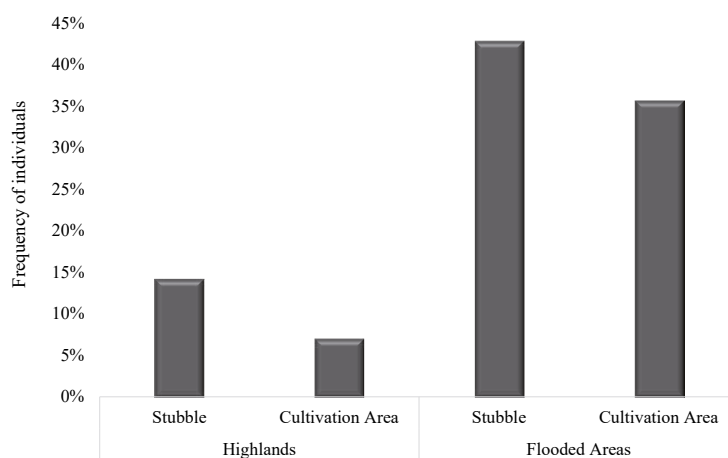


Figure 3. Distribution rate of *Uncaria guianensis* by landscape type

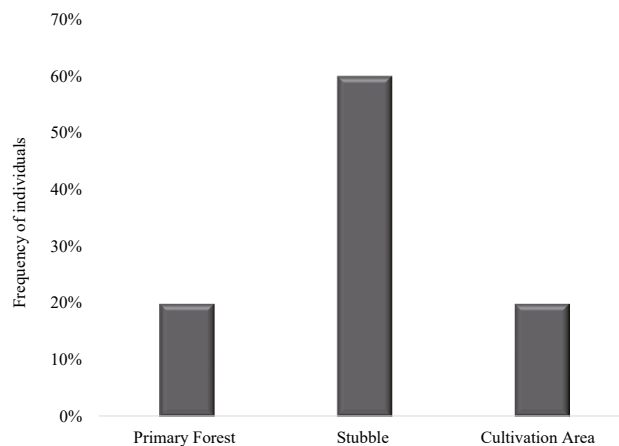


Figure 4. Distribution rate of *Uncaria tomentosa* by landscape

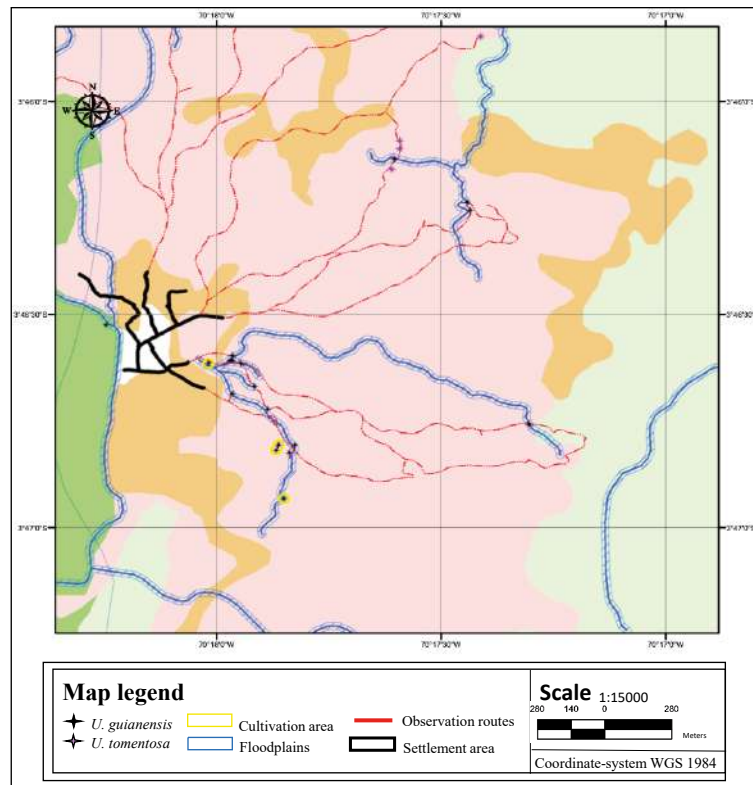


Figure 5. Sampling points and observation routes in San Martín de Amacayacu

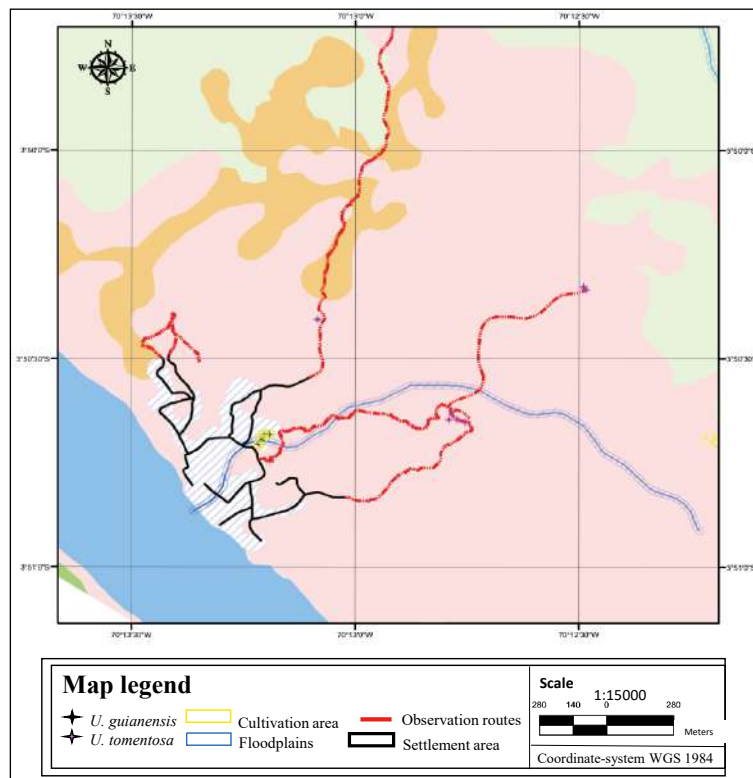


Figure 6. Sampling points and observation routes in Macedonia

Local identification of soils

Local experts identified four common names for three soil classes in which they believe cat's claw species grow (Table 2): Oxisols and Entisols (according to the USDA nomenclature system). “Black color layer” (*capa de color negro - wamüàneũ*) and “compost soil” (*suelo abonoso – fomüane*) refer to the same kind of soil found in cultivated areas and in dryland stubble. Commonly, soil types receive different names depending on the characteristics they are associated with. The first name is related to the color and the second to the texture. Their properties are described according to their fertility and location in high and flooded areas during the rainy months (*várzeas*) or those flooded on days of prolonged rain (*bajiales*).

Uncaria species distribution by soils

Uncaria guianensis grows in the two soil types evaluated (Table 3): 68% of the *U. guianensis* individuals were found in alluvial Entisols and 32% in Oxisols on highlands. *U. tomentosa* was found only in Oxisols on the highlands. According to the soil physicochemical composition in the study areas, the *Uncaria* species grow in soils with diverse textural

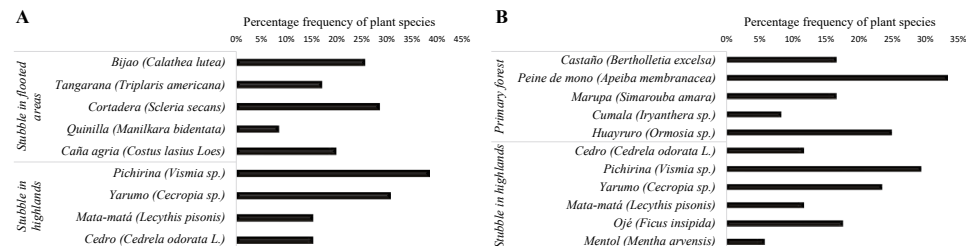


Figure 7. Percentage frequency of most abundant plant species in *Uncaria* species' landscapes. **A)** *Uncaria guianensis*; **B)** *Uncaria tomentosa*

Table 2. Soil types where *Uncaria* species grow

Type of soils	Common name	Tikuna name	Local Description	Edaphic description
Oxisols (10YR 4 3 ⁻¹ Brown)	Black color layer “capa de color negro”	<i>Wamüàneũ</i>	It is the vegetable layer with a high amount of fertilizer suitable for agriculture. It is found in high-altitude lands in the cultivation areas and stubble.	Very deep, strongly acidic, well-drained, red to strong-brown soils with low base saturation and low organic carbon content.
	Compost soil “suelo abonoso”	<i>Fomüane</i>		
Alluvial Entisols (7.5YR 3 2 ⁻¹ Dark brown)	Flooded soil “suelo de bajial”	<i>Nichirü</i>	It is found in low areas on the banks of streams and rivers. Soil with good fertility that floods annually	Soils with fine and moderately fine textures that are subject to flooding for prolonged periods during the year.
Alluvial Entisols (10YR 4 4 ⁻¹ Dark yellowish brown)	Muddy soil “suelo barroso”	<i>Ácharaaneũ</i>	The soil on the islands (“várzeas”) is soft and fertile, especially for rice.	Soils of medium textures occupying some floodplain shallows that are imperfectly drained and have a base saturation of more than 50% in the first 100 cm.

classes (**Table 4**) categorized as highly (pH less than 4.5) or strongly acidic (maximum pH of 5.5), with low to medium available phosphorus ranging from 5.08 to 15.63 mg/kg and medium to high cation exchange capacity (CEC) from 21.65 to 29.71 cmol(+)/kg.

The statistical results showed a homogeneous physicochemical composition in the corresponding soil types (**Table 5**). Differences were found in the physicochemical composition of Oxisols and Entisols. The concentration of phosphorus (22.94 mg/kg) and sodium (0.14 cmol(+)/kg) were higher in Entisols. On average, the pH levels in soils where *U. guianensis* grows were lower than in *U. tomentosa*.

Table 3. Number of *Uncaria* individuals by area and soil type

Type of area (soils)	<i>Uncaria</i> individuals	<i>Uncaria</i> species	No. of individuals per species	Abundance (Individuals per Ha)
Highlands (Oxisols)	16	<i>U. guianensis</i>	6	0.24
		<i>U. tomentosa</i>	10	0.40
Floodplain (Alluvial Entisols)	22	<i>U. guianensis</i>	22	0.86
		<i>U. tomentosa</i>	0	0
Mocagua Island (Alluvial Entisols)	No <i>Uncaria</i> individuals were identified			

Table 4. Physicochemical composition of soils identified in Tikuna communities in the study area

Community of San Martín de Amacayacu													
Type of area (soils)	No. sample	Texture	pH	A.I	S.A.I (%)	C.T (%)	P	C.I.C	Ca	Mg	K	B.T	S.B (%)
Highlands (Oxisols)	9	F	4.1	6.7	77.2	4.5	5.3	21.6	1.0	0.4	0.2	1.7	8.3
		FL	(0.4)	(3.0)	(16.1)	(1.6)	(2.1)	(6.8)	(1.0)	(0.3)	(0.1)	(1.3)	(5.0)
		FAr											
Floodplain (Alluvial Entisols)	16	F	4.0	7.7	82.5	4.9	5.4	23.0	0.9	0.4	0.20	1.6	7.3
		FL	(0.3)	(2.7)	(14.2)	(2.7)	(2.8)	(9.1)	(0.9)	(0.3)	(0.1)	(1.3)	(5.6)
		FAr											
		FArA											
Community of Macedonia													
Type of area (soils)	No. sample	Texture	pH	A.I.	S.A.I. (%)	C.T. (%)	P	C.I.C	Ca	Mg	K	B.T.	S.B. (%)
Highlands (Oxisols)	8	F	4.6	5.2	48.4	3.0	5.1	24.1	5.3	1.3	0.21	6.8	27.5
		FAr	(0.6)	(5.0)	(44.5)	(0.9)	(1.6)	(4.7)	(5.6)	(1.3)	(0.05)	(6.8)	(25.8)
		Ar											
Floodplain (Alluvial Entisols)	6	F	4.5	6.4	39.3	3.6	15.6	29.7	8.5	1.4	0.22	6.8	27.5
		FAr	(0.1)	(0.7)	(6.1)	(1.6)	(4.1)	(4.8)	(1.7)	(0.2)	(0.05)	(6.8)	(25.8)
		Ar											
		FArL											
Mocagua Island (Alluvial Entisols)	2	Ar	5.1	3.6	18.6	4.2	22.9	37.4	17.2	3.1	0.37	20.9	55.5
			(0.7)	(2.6)	(13.1)	(0.1)	(4.4)	(1.1)	(5.6)	(1.4)	(0.01)	(6.9)	(16.9)

Variables are expressed in mean and standard deviation (SD) in parentheses according to the number of soils collected for each soil type. Texture: F = loam; Ar = clay; FL = silt loam; FAr = clay loam; FArA = sandy clay loam; FArL = silty clay loam; FArL = silty clay loam. pH (1:1 in water); A.I = Exchangeable acidity with KCl in cmol(+) kg⁻¹; S.A.I.% = Percentage saturation exchangeable acidity with KCl; C.T.% = Percentage total carbon with complete oxidation; P = Phosphorus available by Bray II in mg/kg; C. I.C = Cation exchange capacity with neutral ammonium acetate in cmol(+) kg⁻¹; Ca = Calcium by DTPA in cmol(+) kg⁻¹; Mg = Magnesium by DTPA in cmol(+) kg⁻¹; K = Potassium by DTPA in cmol(+) kg⁻¹; B.T. = Total bases; S.B.% = Percent saturation of bases with neutral ammonium acetate

Table 5. Non-parametric test for physicochemical soil composition

Physicochemical variables	Soil type Oxisol	Soil type Alluvial Entisols	Soils of study areas	Soils associated with <i>Uncaria</i> species	Soils associated with <i>U. guianensis</i>
pH	0.522	0.536	0.6847	0.006*	0.004*
P	0.522	0.882	0.0044*	0.06	0.502
Na	0.392	0.293	0.038*	0.333	0.005*
A.I	0.286	0.605	0.29	0.227	0.199
S.A.I	0.831	0.066	0.684	0.311	0.002*
C.T	0.088	0.329	0.3718	0.449	0.145
C.I.C	0.088	0.261	0.1229	0.182	0.003*
Ca	0.201	0.317	0.2912	0.551	0.010*
Mg	0.136	0.346	0.6847	0.572	0.748
K	1	0.651	0.5677	0.444	0.135
B.T	0.055	0.132	0.2912	0.166	0.004*
S.B	0.286	0.361	0.6847	0.074	0.003*

* Significant differences at $p \leq 0.05$

The variability in soil chemical properties is reflected in the significant differences in pH, sodium and calcium levels, the percentage of aluminum saturation, the base saturation, and the cation exchange concentration. *U. tomentosa* was found only in Oxisols on drylands with a pH between 3.78 and 5.53, exchangeable aluminum variations ranging from 0.15 to 12.62 cmol(+)/kg, and aluminum saturation percentages from 3.04 to 85.42%. *U. guianensis* grows especially in acidic soils with a pH ranging from 3.43 to 4.62, exchangeable aluminum levels from 4.66 to 12.36 cmol(+)/kg, and aluminum saturation percentages from 29.44 - 95.18%.

Discussion

Local landscape identification

The common names for the *Uncaria* species are associated with the external characteristics of stems, leaves, and spines. For indigenous experts, the most outstanding feature is the shape of the spine, which resembles the anatomical structure of the claw (*patü*) of some animals: *michipatü* [*michi* - cat (*Felis catus*)], *bauepatü* [*baue* - charapa turtle (*Podocnemis expansa*)] or *daupatü* [*dau* - sparrowhawk (*Buteo* sp.)]. Although there is no clear explanation for the gender differentiation between these species, some local experts make this distinction based on their healing. *U. tomentosa* is the “female” and *U. guianensis* is the “male”. They consider that “males” have more medicinal uses and effectiveness in healing. The non-*Uncaria* species identified here have been reported before in other studies in the Amazon region (Obregón, 1995; Domínguez, 1997). The *Machaerium* genus, especially *Machaerium nyctitans*, is more commonly associated with the name “cockspur” (*espuela de gallo* (Bisby *et al.*, 1994)). *Macfadyena unguis-cati* had previously been reported in Colombia with the name cat’s claw and in Perú with bat’s claw (Gallegos, 2017).

In the study communities, *Uncaria* species are well distinguished, but many species are associated with the name cat’s claw in the Amazon region. Domínguez (1997) reported 22 species called cat’s claw in Perú belonging to the Bignoniaceae, Caesalpinaceae, Liliaceae, Mimosaceae, Rosaceae, Rutaceae, Sterculiaceae, and Fabaceae families. Beutelspacher & Farrera-Sarmiento (2015) reported 31 species in México where other families (Cactaceae, Cannabaceae, Loganiaceae, Martyniaceae, Nyctaginaceae, Solanaceae, and Verbenaceae) have been found. The number of botanical families related to this common name is evidence of the confusion in identifying their botanical characteristics. The name

is used by local peoples in the Amazon region for plants with similar anatomical structures, especially the presence of the spine (**Beutelspacher & Farrera-Sarmiento**, 2015). The correct determination of cat's claws is crucial for their medicinal use. **Obregón** (1995) points out that misidentification can lead to social and health problems, as some species may be toxic or may not have the pharmacological properties against specific diseases.

Uncaria species distribution by landscapes

San Martín de Amacayacu has more streams than Macedonia, so there may be more floodable areas that favor *U. guianensis* development and growth in this territory. Although *Uncaria* species are not cultivated directly in the *chagras*, usually remnant plants are left as they are considered medicinal. People sometimes preserve the seedlings that have grown spontaneously in the stubble when prepared for new *chagras*. Likewise, when these cultivation areas are abandoned to let the soil rest, the plant can grow and continue its propagation, as these species have no cultural relevance for the Tikuna people and are considered invasive.

Uncaria species distribution and abundance patterns are similar to **Miranda et al.** (2003) reports in the State of Acre, in the Brazilian Amazon, with a higher number of *U. guianensis* individuals per hectare than *U. tomentosa* in areas of 200 m.a.s.l. on average. However, *U. guianensis* abundance in the study area was higher (24.02 individuals per hectare), especially in flooded areas, and its distribution in the southern Colombian Amazon is related to its ability to grow in low areas between 100 and 800 m.a.s.l., near big rivers or second and third order streams. Due to crop rotation in indigenous communities, *U. guianensis* is commonly found in stubble fields because it usually colonizes the area after planting ceases. Its presence in *chagras* and stubble fields responds to its ephemeral heliophyte life form. *U. guianensis* is more susceptible to luminosity levels; as sun rays in open areas reach the soil with medium effectiveness, they promote its development (**Zevallos-Pollito et al.**, 2000).

As for *U. tomentosa*, some nearby species support for its entanglement and growth in disturbed areas of primary and secondary forests, and its heliophyte life form requires less light consumption to regenerate (**Zevallos-Pollito et al.**, 2000). The abundance of *U. tomentosa* in the study areas was low compared to those registered by **Quinteros** (2001) and **Canales-Springett et al.** (2003) Ucayali and Huánuco forest reserve areas in the Peruvian Amazon. They found 51 individuals per hectare in undisturbed forests and 900 individuals per hectare in mature disturbed forests.

The Macedonia and San Martín de Amacayacu indigenous communities in the Colombian Amazon have high population densities, which puts additional pressure on the abundance and distribution of the natural populations of *Uncaria* species. Self-consumption agricultural production plots may have implied high levels of intervention in the territory, especially in secondary forests where many wild species are removed, including cat's claws. This anthropic intervention would explain the differences between this and **Quinteros'** study (2001), which was conducted in areas of undisturbed forest.

Local identification of soils

The four soils identified in the communities are Oxisols and Entisols (USDA classification). Although local experts mentioned that muddy soil (alluvial Entisols) favors plant growth, none of the *Uncaria* species were found in this soil. These soils correspond to the first layer, i.e., the A horizon, at approximately 15 cm. The Tikuna relate these soils directly to the layer that provides the necessary nutrition for plants to grow because the microbial activity is restricted to the first 20 cm of these soils (**Peña-Venegas et al.**, 2007), which is essential for the species to absorb phosphorus and other nutrients for their growth and development.

Uncaria species distribution by soils

Uncaria tomentosa was identified in loam-textured and clay loam soils. According to **Quinteros** (2001), the texture does not have a significant effect on the abundance of this species, while **Mechán et al.** (2007) have reported that *U. tomentosa* grows better in clay

loam soils in the Aguaytía river basin (Ucayali, Perú), as those soils have greater aeration capacity and water availability, which facilitates the absorption of nutrients. Here, this species was the only one observed in primary and secondary forests, but no relevant differences were observed in the composition of the soil samples.

Peña-Venegas & Cardona (2010) reported a close relationship between highlands successional forests biogeochemical cycles in the southern Colombian Amazon. They found that they tend to be more acidic than those of the Ucayali region studied by **Domínguez & Castillo** (2007). In the acidity measurements, aluminum saturation percentages were above 60% in the Colombian Amazon, which can affect the species' growth by decreasing its capacity to absorb water and nutrients.

The abundance of *U. tomentosa* (0.40 individuals per hectare) is low compared to the values reported by **Quinteros** (2001) in the Ucayali region (51 individuals per hectare in undisturbed forests). The author points out that the available phosphorus content (estimated at 3.62 mg/kg) is directly related to the abundance of the species. However, in our study, there was no significant difference in this edaphic variable (5.34 mg kg⁻¹), so other factors must be responsible. *U. guianensis* is the cat's claw species that grows in the most acidic soils, with higher exchangeable aluminum levels and saturation percentages ranging from 29.44 to 95.18%. These results support the data reported by **Zavala & Zevallos** (1996) in the Peruvian Amazon, where they concluded that *U. guianensis* grows in more acid soils than *U. tomentosa*. This species has a greater capacity to adapt to the variability of physicochemical conditions in soils of secondary forests and is less demanding in nutritional terms than *U. tomentosa* (**Domínguez**, 1997).

Although the alluvial Entisols in the study areas tend to be less acidic, there were no significant differences concerning the Oxisols. It cannot be said that pH is conditioning *Uncaria* growth, and other edaphological characteristics should be considered to explain the changes in these species growth, for example, drainage conditions; when these are good, aeration and organic matter mineralization processes are favored, which facilitates the nutrition of various plant species (**Monsalve et al.**, 2017). Oxisols are highly evolved, deep, and well drained soils, while alluvial Entisols are not so well-evolved and tend to have low depth and poor drainage (**IGAC**, 2015). The distribution of *Uncaria* species in these soil types coincides with the report of **Zevallos-Pollito et al.** (2000) that found *U. tomentosa* individuals only in well-drained soils, which commonly favor its growth, while *U. guianensis* was more abundant in poorly drained soils (**Quevedo**, 1995). More detailed research on the physical, chemical, and biological characteristics of soil types is required to clarify the behavior of *Uncaria* population distribution.

On the other hand, the physicochemical composition of the soil on Mocagua Island is not a limiting factor for the cat's claw growth. **Quevedo** (1995) has documented that the dispersal range of these plants is wide as the wind disperses their filiform seeds. The indigenous communities' establishment of plots for agricultural production reinforces the idea that anthropogenic intervention has influenced the population density of *Uncaria* species in the study areas.

Conclusions

The local Tikuna experts showed good botanical knowledge of the cat's claw species. Theirs is a crucial contribution that facilitates the location and estimation of their abundance and enhances the reliability of their medicinal products. *U. guianensis* was the most abundant species both in upland and floodplain areas. It is well-adapted to the predominant soil types, and the edaphological differences do not directly affect its distribution. *U. tomentosa* was found only in mature highlands. The variations in edaphoclimatic conditions throughout the Amazonian territory make it impossible to consider a homogeneous pattern of distribution and abundance for *Uncaria* species in this region. The abundance and natural regeneration of *Uncaria* species seem to be adversely affected by the water table and the intervention of the communities in the forests to extract them for medicinal uses. Therefore, it is necessary to implement planting strategies for these species *in situ* according to habitat and soil types.

Acknowledgments

To the indigenous authorities of Macedonia and San Martín de Amacayacu for allowing us to work with their communities. Special thanks to the experts who taught us about the growing conditions of cat's claw species for their approval to socialize their knowledge in the academic environment. To the Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, Sinchi, for its help in identifying the species. This work was funded by the Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MINCIENCIAS), National Doctorates Program No. 757 of 2016.

Conflicts of interest

There is no conflict of interest as concerns the development of this research through to the production of this manuscript.

References

- Alvarenga, S.** (2010). Establecimiento in vitro y cultivo de células de la uña de gato (*Uncaria tomentosa*) (Willd.) D.C. *Tecnología en Marcha*, 23, 24-33.
- Arnelas, I., Invernón, V. R., González, M. E., López, E., Devesa, J.A.** (2012). Manual de laboratorio de botánica. El herbario. Recolección, procesamiento e identificación de plantas vasculares. *Reduca (Biología). Serie Botánica*, 5(2), 15-24.
- Beutelspacher, C. & Farrera-Sarmiento, O.** (2015). *Uncaria tomentosa* (Willd.) DC. (Rubeaceae) y las falsas "uñas de gato" en México. *Lacandonia*, 9(2), 21-32.
- Bisby, F., Buckingham, J., Harborne, J. B.** (1994). *Phytochemical Dictionary of the Leguminosae*. Chapman and Hall.
- Canales-Springett, A. W., Ceroni, A., Domínguez, G., Castillo, A.** (2013). The effect of light on the natural regeneration of *Uncaria tomentosa* (Willd) DC "cat's claw", in a forest ecosystem at the "bosque nacional Alexander von Humboldt", Pucallpa - Perú. *Ecología Aplicada*, 12, 99-109.
- Cruz, N., Brenes, M., Abdelnour, A., Alvarenga, S.** (2011). Establecimiento de un protocolo para la conservación in vitro a mediano plazo de uña de gato (*Uncaria tomentosa* (Willd.) D.C.). *Tecnología en Marcha*, 24, 19-29.
- Domínguez, G.** (1997). *Uña de gato. Producción sostenible*. Universidad Agraria de la Molina.
- Domínguez, G. & Castillo, A.** (2007). Growth of an *Uncaria tomentosa* (Willd.) DC. clone in four habitat conditions of the Aguaytia river basin, Ucayali Perú. *Ecología Aplicada*, 6, 39-46.
- Domínguez, J. M., Román, A. D., Prieto, F., Acevedo, O.** (2012). Sistema de notación Munsell y CIELab como herramienta para la evaluación de suelos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(1), 141-155.
- Gallegos, X. F.** (2017). Etnobotánica cuantitativa de la comunidad nativa infierno, Madre de Dios - Perú. *Revista Etnobiología*, 15(3), 24-40.
- Garzón, L. P.** (2019). Medicinal uses of cat's claw (*Uncaria tomentosa* (Willd. ex Roemer & Schultes) DC and *Uncaria guianensis* (Aubl.) J.F. Gmel) by Tikuna communities from the southern Colombian Amazon. *Ethnoscientia*, 4, 1-15.
- Gomes, I. C., Bertoniii, B. W., Soares, A. M.** (2016). *Uncaria tomentosa* and *Uncaria guianensis* an agronomic history to be written. *Ciência Rural, Santa Maria*, 46(8), 1401-1410.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC.** (2015). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras de Amazonas*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- López, M. T.** (2006). Uña de gato. Características y perfil terapéutico. *Offarm*, 25, 104-108.
- Mechán, T. E., Alegre, J., Domínguez, G.** (2007). Edaphic variability influence on the biomass production of cat'claw *Uncaria tomentosa* (Willd) D.C. in the Aguaytia Watershed, Ucayali, Perú. *Ecología Aplicada*, 6, 33-37.
- Miranda, E., Souza, J. A., Pereira, R.** (2003). Caracterização e avaliação de populações nativas de unha-de-gato [*Uncaria tomentosa* (Willd.) D.C. e *U. guianensis* (Aubl.) Gmel.] no Vale do Rio Juruá-AC. *Revista Brasileira de Plantas Medicinais*, 5, 41-46.
- Monsalve, O. I., Gutiérrez, J. S. Cardona, W. A.** (2017). Factors involved in the process of nitrogen mineralization when organic amendments are added to a soil. A review. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11, 200-209.
- Montes, M. E.** (2002). *Capítulo IV. Medio Ambiente*. En: F. Ahué, B. Ahué and V. Angarita (Eds). *Libro guía del maestro. Materiales de lengua y cultura ticuna* (p.p 73-93). Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Lingüística, Universidad Nacional de Colombia.

- Obregón, L.** (1995). Right identification of Cat's claw (genus *Uncaria*). *Natura Medicatrix*, 40, 28-30.
- Otzen, T. & Manterola, C.** (2017). Sampling Techniques on a Population Study. *International Journal of Morphology*, 35(1), 227-232.
- Peña-Venegas, C. P., Cardona, G., Arguelles, J. H., Arcos, A.L.** (2007). Micorrizas arbusculares del sur de la Amazonia colombiana y su relación con algunos factores fisicoquímicos y biológicos del suelo. *Acta Amazónica*, 37, 327-336.
- Peña-Venegas, C.P. & Cardona, G.** (2010). *Dinámica de los suelos amazónicos: Procesos de degradación y alternativas para su recuperación*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas - Sinchi.
- Peña-Venegas, C. P., Stomph, T. J., Verschoor, G., Echeverri, J. A. Struik, P. C.** (2015). Classification and use of natural and anthropogenic soils by indigenous communities of the upper Amazon region of Colombia. *Human Ecology*, 44, 1-15.
- Quevedo, A.** (1995). *Silvicultura de la uña de gato. Alternativas para su conservación*. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana - IIAP.
- Quinteros, B.** (2001). Distribución natural y determinación edafoclimática de la *Uncaria tomentosa* (Wild) D.C. y *Uncaria guianensis* (Aubl) Gmel (Uña de gato) en la cuenca del Río Aguaytía (Tesis de pregrado), Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Ucayali.
- Vavilina, N. D. & Skalaban, I. A.** (2015). Social mapping as a tool for public participation. *Regional Research of Russia*, 5(1), 66-72.
- Zavala, C. A. & Zevallos, P. A.** (1996). *Taxonomía, distribución y status del Género Uncaria en el Perú. "Uña de Gato"*. Universidad Agraria La Molina.
- Zevallos, P. A., Lombardi, I., Bernal, H. Y.** (2000). *Agrotecnología para el cultivo de uña de gato o bejuco de agua*. En: J. V. Martínez, H. Y. Bernal, A. Cáceres (Eds.). *Fundamentos de agroecología de cultivo de plantas medicinales iberoamericanas* (pp. 463-492). Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).
- Zevallos P. A. & Flores, Y.** (2003). Caracterización morfológica de plántulas de "uña de gato" *Uncaria tomentosa* (Willd. ex Roemer & Schultes) D.C. y *U. guianensis* (Aubl.) Gmelin del Bosque Nacional Alexander Von Humboldt. *Ecología Aplicada*, 2, 41-46.
- Zevallos-Pollito, P. A. & Tomazello, M.** (2010). Levantamento e caracterização de duas espécies do gênero *Uncaria* schreb. (Rubiaceae) correntes no estado do Acre, Brasil. *Ecología Aplicada*, 9(1), 19-30.

Nota editorial/Editorial note

El Estudio geológico del Terciario carbonífero de Antioquia, en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia, entre el río Arma y Sacaojal por Emil Grosse fué publicado en 1926 (Grosse, 1926) y una copia digital de esta obra se encuentra en el repositorio de la Academia (<https://repositorio.accefyn.org.co/handle/001/261>). El repositorio no solo contiene el texto original de la obra, sino sus cuatro mapas geológicos digitalizados en alta resolución. Este trabajo es probablemente uno de las primeras cartografías geológicas hechas en nuestro país, con una calidad que sigue tan válida ya casi después de un siglo de ser producida. En este volumen presentamos cuatro artículos relacionados con las rocas estudiadas por Grosse, la formación Amagá.

El primer artículo de **Zapata *et al.*, 2023**, presenta una revisión de la paleogeografía del noroccidente Colombiano durante el Neógeno, el tiempo de acumulación de la formación Amagá. Esta revisión también incluye la evolución del magmatismo en la región. El segundo artículo de **Pardo-Trujillo *et al.*, 2023** establece la edad de las formaciones en la Cuenca de Amagá usando biostratigrafía y modelos de zonación derivados de la Cuenca del Caribe Colombiano. El tercer artículo de **Cardenas *et al.*, 2023**, hace un análisis de todo el registro fósil que ha sido reportado para la formación Amagá e indica cuales grupos fósiles tiene potencial de ser explorados. Finalmente, el cuarto artículo de **Velasquez-Ruiz *et al.*, 2023**, es un ensayo que explora la vida y obra de Emil Grosse en su periplo por Alemania y Brasil después de haber culminado su trabajo en Colombia en 1931. Estos cuatro trabajos representan una pequeña muestra de los muchos aspectos que están relacionados a la obra de Grosse y su impacto en la geología y economía de Antioquia.

The Geological study of the Carboniferous Tertiary of Antioquia, in the western part of the Central Cordillera of Colombia, between the Arma River and Sacaojal by Emil Grosse was published in 1926 (Grosse, 1926) and a digital copy of this work can be found in the repository of the Academy (<https://repositorio.accefyn.org.co/handle/001/261>). The repository contains not only the original text of the work, but also its four geological maps that have been digitized at high resolution digitized. This work is probably one of the first geological maps made in our country, with a quality that is still as valid almost a century after its production. In this volume we present four articles related to the rocks studied by Grosse, the Amagá formation.

The first article by **Zapata *et al.*, 2023**, presents a review of the paleogeography of northwestern Colombia during the Neogene, the time of accumulation of the Amagá Formation. This review also includes the evolution of magmatism in the region. The second article by **Pardo-Trujillo *et al.*, 2023**, establishes the age of the formations in the Amagá Basin using biostratigraphy and zonation models derived from the Colombian Caribbean Basin. The third article by **Cardenas *et al.*, 2023**, makes an analysis of all the fossil record that has been reported for the Amagá formation and indicates which fossil groups have potential to be explored. Finally, the fourth paper by **Velasquez-Ruiz *et al.*, 2023**, is an essay that explores the life and work of Emil Grosse in his journey through Germany and Brazil after completing his work in Colombia in 1931. These four papers represent a small sample of the many aspects that are related to Grosse's work and its impact on the geology and economy of Antioquia.

© **Carlos Alberto Jaramillo, Ph. D.**

Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá

Editor asociado Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Referencias

- Cárdenas, A., Giraldo, J.D., Monterrosa, D., Weber, M.** (2023). Fossil leaves, woods, gastropods, and a crocodile tooth: Is the Amagá Formation worth exploring? *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 47(185), 943-951. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1896>
- Grosse, E.** (1926). Estudio geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia, entre el río Arma y Sacaojal, ejecutado en los años de 1920-1923. Dietrich Reimer. 361p.
- Pardo-Trujillo, A., Plata-Torres, A., Ramírez, E., Vallejo, F., Trejos, R.** (2023). Eocene to Miocene palynology of the Amagá Basin (Cauca Valley, Colombia) compared to the Caribbean Region. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 47(185), 925-942. Doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1921>
- Velásquez-Ruiz, F., Weber-Scharff, M., Cuadros-Jimenez, F.** (2023). Deciphering the footprint of Emil Grosse from Germany to Brazil: a brief review. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 47(185), 952-961. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1908>
- Zapata, S., Jaramillo, J.S., Botello, G.E., Siachoque, A., Calderon-Diaz L.C., Cardona, A., Till, C., Valencia, V.** (2023). Miocene paleogeography of northwest Colombia: A review of the sedimentary and magmatic evolution of the Amagá Basin a century after Grosse's work. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 47(185), 904-924. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1871>

Original article

Miocene paleogeography of northwest Colombia: A review of the sedimentary and magmatic evolution of the Amagá Basin a century after Grosse's work

Paleogeografía del Mioceno en el noroccidente de Colombia: una revisión de la evolución sedimentaria y magmática de la cuenca de Amagá un siglo después del trabajo de Grosse

Sebastián Zapata^{1,*}, Juan Sebastián Jaramillo-Ríos², Gladys Eliana Botello²,
Astrid Siachoque², Laura Cristina Calderon-Díaz², Agustín Cardona², Christy Till³,
Victor Valencia⁴

¹ Group of studies in orogenic systems (GROSSE), Facultad de Ciencias Naturales, Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia

² Grupo de estudios en geología y geofísica (EGEO), Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

³ School of Earth and Space Exploration, Arizona State University, Tempe, USA

⁴ School of Earth and Environmental Science, Washington State University, Pullman, USA

Abstract

In 1918, the geologist Emile Grosse was commissioned to conduct geological studies in the Amagá Basin, Antioquia, Colombia. In 1923, Grosse finished a comprehensive cartographic work that became the cornerstone for the geology of the northwest (NW) Colombian Andes. Today, 100 years later, the volcanoclastic strata preserved in the Amagá Basin are crucial for understanding major Oligocene to Pliocene tectonic events that occurred in the NW South-American margin, including the fragmentation of the Nazca Plate, the collision of the Panamá-Chocó Block, and the shallowing of the subducted slab. Our contribution includes new mineral chemistry and zircon petrochronological data from the Combia Volcanic Complex and published data to provide a review of the Oligocene to Pliocene deformation, sedimentation, and magmatic patterns in the Amagá Basin and their implications for the tectonic evolution of NW South America. The Amagá Basin was the result of the Eocene to Oligocene uplift of the Western Cordillera followed by the Middle Miocene to Pliocene uplift of both the Central and Western cordilleras, events that modified the Miocene drainage network in the Northern Andes. Coeval with the final Miocene deformation phases in the Amagá basin, the magmatism of the Combia Complex was the result of subduction magmas emplaced in a continental crust affected by strike-slip tectonics.

Keywords: Emile Grosse's work; Amagá Basin; Combia Volcanic Complex; Mineral chemistry; Northern Andes paleogeography; Zircon petrochronology.

Resumen

En 1918 el geólogo Emile Grosse recibió el encargo de realizar estudios geológicos en la cuenca de Amagá, Colombia. En 1923 Grosse terminó un trabajo cartográfico exhaustivo que se convirtió en la piedra angular para la geología del noroccidente de los Andes colombianos. Hoy, 100 años después, las unidades volcanoclásticas preservadas en la cuenca de Amagá son cruciales para entender los principales eventos tectónicos que ocurrieron en el margen noroccidental suramericano entre el Oligoceno y el Plioceno, incluyendo la fragmentación de la Placa de Nazca, la colisión del Bloque Panamá-Chocó y la subducción plana. El presente trabajo incluye nuevos datos de química mineral y petrocronología en circón del complejo volcánico de Combia e integra datos publicados para proporcionar una revisión de los patrones de deformación, sedimentación y magmatismo del Oligoceno al Plioceno en la cuenca de Amagá y sus implicaciones para la evolución tectónica del

Citation: Zapata S, Jaramillo JS, Botello GE, *et al.* Miocene paleogeography of northwest Colombia: A review of the sedimentary and magmatic evolution of the Amagá Basin a century after Grosse's work. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.* 47(185):904-924, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1871>

Guest editor: Carlos Jaramillo

***Corresponding autor:**
Sebastián Zapata;
sebastian.zapatah@urosario.edu.co

Received: February 20, 2023

Accepted: June 23, 2023

Published on line: July 27, 2023



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

noroccidente suramericano. La cuenca de Amagá fue el resultado del levantamiento del Eoceno al Oligoceno de la cordillera occidental, seguido por el levantamiento del Mioceno Medio al Plioceno de las cordilleras central y occidental. Estas fases de levantamiento modificaron la red de drenaje del Mioceno en los Andes del norte. Coincidiendo con las fases finales de deformación del Mioceno en la cuenca de Amagá, el magmatismo del complejo de Combia fue el resultado de magmas de subducción emplazados en una corteza continental afectada por la tectónica de rumbo.

Palabras clave: Trabajo de Emile Grosse; Cuenca de Amagá; Complejo volcánico del Combia; Química mineral; Paleogeografía de los Andes del norte; Petrocronología en círculo.

Introduction

Between 1923 and 1926, the German geologist Emile Grosse completed the geological cartography of the Amagá Basin in northwest Colombia; the study was dedicated to identifying and characterizing the economic resources –particularly coal beds– in the Amagá Basin (Grosse, 1926). The results included the identification of two clastic Cenozoic units grouped under the carboniferous tertiary of Antioquia (*Terciario Carbonífero de Antioquia*) (Amagá Formation) and the Combia strata (*Estratos de Combia*) (Combia Volcanic Complex). One hundred years have elapsed since this pivotal work was finished, and several of Grosse’s original observations, such as the distinction between the different sedimentary cycles, the geological relations between the units, and the relative chronology of the sedimentation, magmatism, and deformation events remain valid today.

In the last century, geosciences saw enormous progress, including the development of new techniques (e.g., geochronology, thermochronology, and geochemistry) and the emergence of the plate tectonics theory that led to a greater understanding of Earth systems, which have also been applied to the Amagá Basin. Contributions dealing with various aspects of the tectono-magmatic framework of the basin include studies by Bissig *et al.* (2017), Jaramillo *et al.* (2019), Lara *et al.* (2018), León *et al.* (2018), Montes *et al.* (2015), Piedrahita *et al.* (2017), Ramírez *et al.* (2006), Rodríguez & Zapata (2014), Sierra *et al.* (2012), Silva-Tamayo *et al.* (2008, 2020), Weber *et al.* (2020), and Zapata *et al.* (2020).

The Neogene volcanic and sedimentary strata in the Amagá Basin formed coevally with major Miocene tectonic events that shaped the northwestern segment of the South American Plate, including (i) the break off of the Farallon Plate at ~23 Ma, (ii) the collision of the Panamá-Chocó arc around 12 Ma, and (iii) the slab flattening of the Nazca Plate after ~5 Ma. These events modified the sedimentary routing systems and the connections between the Colombian hinterland and foreland basins (Jaramillo *et al.*, 2019; León *et al.*, 2018; Montes *et al.*, 2019; Perez-Consuegra *et al.*, 2022; Silva-Tamayo *et al.*, 2020). In consequence, the Amagá Basin has become a key element to understand the tectonic and paleogeographical evolution of NW South America.

Several studies aim at understanding the correlation between the deformation, magmatic, and sedimentary patterns in the Amagá Basin and the major tectonic events and paleogeographic configuration of the continental margin (Lara *et al.*, 2018; Montes *et al.*, 2015; Piedrahita *et al.*, 2017; Silva-Tamayo *et al.*, 2020). Despite these efforts, there are still open questions regarding the geometry of the drainage network, the main tectono-structural controls on magmatism, and the relationship between major Miocene tectonic events and deformation patterns.

Here we present new mineral geochemistry and zircon petrochronological data from selected localities in the Combia Volcanic Complex and integrate them with recent regional studies. Our data set includes compositional data of the plagioclase, garnet, and amphibole phases from a pyroclastic rock, and zircon U-Pb geochronology, chemistry, and isotopic (Lu-Hf) data from two andesites and two pyroclastic rocks. These results, combined with published detrital zircon geochronology and geochemical constraints, along with the available thermochronological ages, were used to understand the nature and the tectonic controls of magmatism, and to review and discuss the paleogeographic configuration of the basin.

Geological framework

The Colombian Andes are composed of three parallel and approximately north-south oriented cordilleras separated by two intermountain fluvial valleys: the Cauca Valley between the Western and Central cordilleras and the Magdalena Valley between the Central and Eastern cordilleras (**Figure 1A**). The Amagá and Cauca basins are two approximately north-south lens-shaped hinterland basins along the Cauca Valley (**Figure 1A, B**) (**Sierra & Marín-Cerón, 2011**). The segmented and lenticular shape of these basins coincides with the narrowest area of the Cauca Valley, around 4.5°N, which has been attributed to a pre-Pleistocene shortening associated with E-W right lateral faults (**Suter *et al.*, 2008**).

In Emile Grosse's original work, the Amagá Basin was delimited between the towns of La Pintada to the south and Santa Fe de Antioquia to the North. However, here we extend the area further south to the town of Chinchiná, where the Colombian Geological Survey has mapped correlatable volcano-sedimentary units (**Figure 1B**). The Amagá Basin sedimentary fill is characterized by Oligocene to Middle Miocene siliciclastic strata, Upper Miocene volcanoclastic layers of the Combia Volcanic Complex and the Irrá-Tres Puertas Formation, and Pliocene conglomeratic successions that include the Santa Fe de Antioquia Formation.

Clastic units of the Amagá Formation

Grosse (1926) defined the carboniferous tertiary of Antioquia as a sedimentary succession composed of conglomerates, sandstones, mudstones, and coal beds unconformably deposited on top of Mesozoic plutonic and metamorphic rocks from the Central Cordillera and the Cretaceous volcanoclastic rocks from the Western Cordillera (**Figure 1C**). Subsequent studies redefined this unit as the Amagá Formation, which included several members based on the abundance of coal beds (e.g. **Sierra *et al.*, 2003**). Recent studies have further divided this unit into Lower and Upper members based on detailed stratigraphy and provenance data interpreting that it was accumulated in braided and meandering depositional systems (for a historical review, see **Silva-Tamayo *et al.*, 2020**).

Detrital zircon fission track data with ages between 41-29 Ma and Oligocene palynomorphs suggest that the Lower Amagá Member was deposited during the late Oligocene (**Lara *et al.*, 2018**; **Montes *et al.*, 2015**; **Piedrahita *et al.*, 2017**; **Zapata *et al.*, 2020**). Maximum depositional ages obtained from detrital zircon U-Pb geochronology suggest that the Upper member was deposited after 21 Ma (**Lara *et al.*, 2018**; **Montes *et al.*, 2015**). Additionally, the older ages associated with the Combia Volcanic Complex suggest that the Upper member was deposited prior to 11 Ma (**Bissig *et al.*, 2017**; **Jaramillo *et al.*, 2019**).

The Santa Fé de Antioquia Formation was proposed by **Lara *et al.* (2018)**; it is described as poorly lithified siliciclastic sediments that display facies associations of braided rivers and maximum depositional age at 4.8 Ma. This unit overlays discordantly the Amagá Formation in the northern segment of the basin.

Geology of the volcano-sedimentary formations

Grosse (1926) determined that the Amagá Formation is unconformably overlain by volcanic and clastic strata and is intruded by several volcanic dikes, domes, and hypabyssal porphyries (**Figure 1C**). These volcanic and porphyritic rocks exhibit ages between 11 and 5.2 Ma (**Bernet *et al.*, 2020**; **Bissig *et al.*, 2017**; **Jaramillo *et al.*, 2019**; **Naranjo *et al.*, 2018**; **Leal-Mejía *et al.*, 2019**; **Santacruz *et al.*, 2021**; **Weber *et al.*, 2020**) and are currently grouped into the Combia Volcanic Complex (**Jaramillo *et al.*, 2019**).

The Combia Volcanic Complex has been divided into two members, a volcanic member that includes the intercalation of basalts, andesites, tuffs, and agglomerates, and a sedimentary member consisting mainly of conglomerates, immature sandstones, and siltstones associated with continental debris flows and braided fluvial environments. Porphyritic bodies with tonalitic, granodioritic, and dacitic compositions intrude on both members (**Jaramillo *et al.*, 2019**; **Leal-Mejía *et al.*, 2019**; **Weber *et al.*, 2020**).

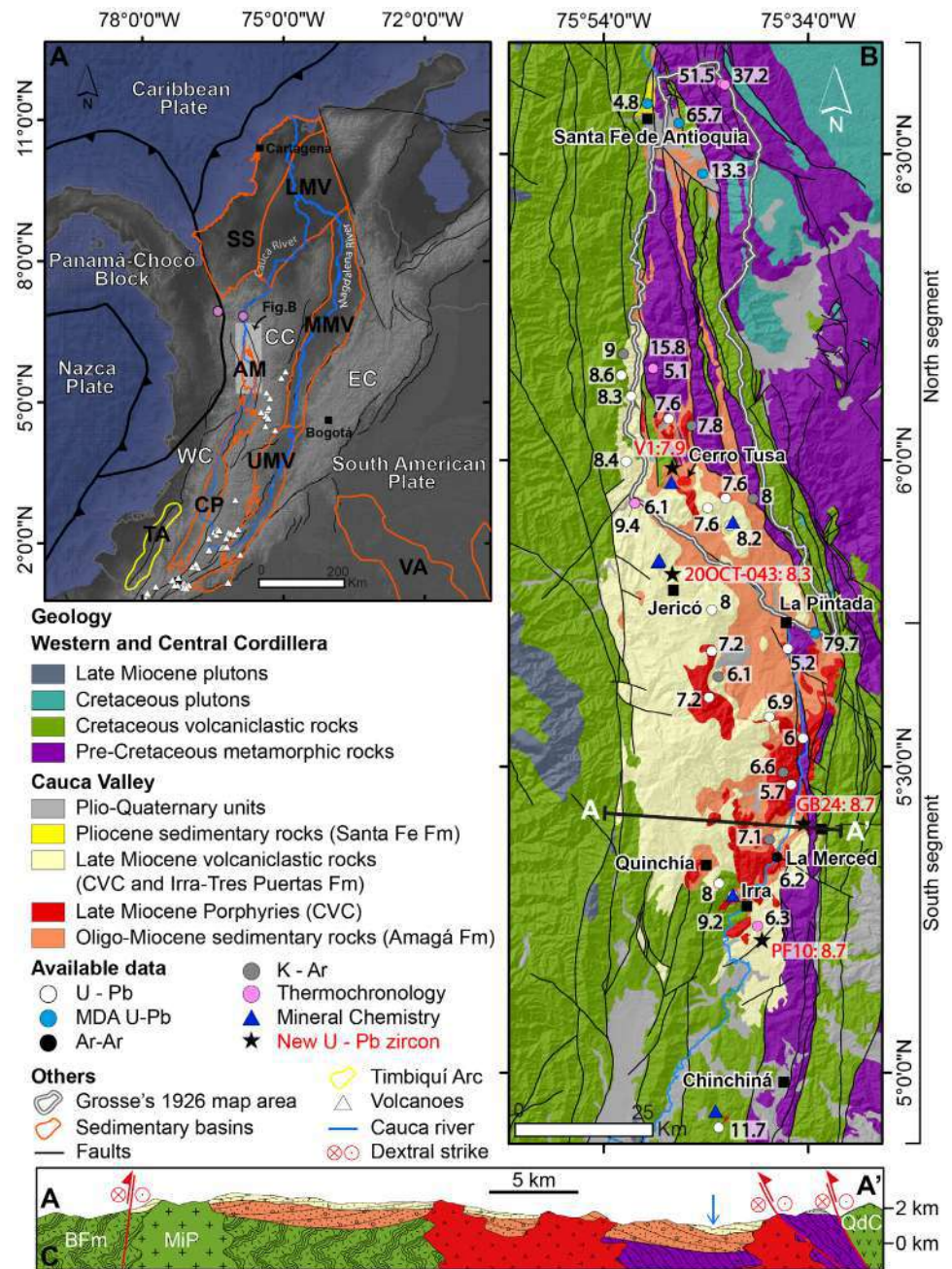


Figure 1. A. Regional map of the Colombian Andes showing the location of the Timbiquí Arc (TA) and Cauca-Patia (CP), Amagá (AM), Sinú-San Jacinto (SS), Lower Magdalena Valley (LMV), Middle Magdalena Valley (MMV), Upper Magdalena Valley (UMV), and Vaupes-Amazonas (VA) sedimentary basins according to the *Agencia Nacional de Hidrocarburos* (ANH). B. Local map of the Amagá Basin showing the ages obtained for the volcanic rocks (Bernet *et al.*, 2020; Bissig *et al.*, 2017; Jaramillo *et al.*, 2019; Leal-Mejía *et al.*, 2019; Santacruz *et al.*, 2021; Weber *et al.*, 2020). Red labels show the new U-Pb zircon ages presented in this work. C. Geological profile (A-A') of the south segment of the Amagá Basin showing the discordance relation between CVC and the Amagá Formation and the intrusive relation of the Late Miocene Porphyries (CVC) with the other units. The Cretaceous volcanoclastic rocks were separated in the Barroso Formation (BFm), Mistrató Pluton (MiP), and Quebradagrande Complex (QdC). Abbreviations: Western Cordillera (WC), Central Cordillera (CC) and Eastern Cordillera (EC), Combia Volcaniclastic Complex (CVC).

The rocks of the Combia Volcanic Complex are characterized by tholeiitic and calc-alkaline compositions, with a typical arc geochemical signature evidenced in a depletion of High-Field Strength Elements, such as Nb, Ta, and Ti. Isotopic Hf, Sr, Nd, and Pb signatures of these rocks suggest variable mantle and crustal inputs (**Bernet *et al.*, 2020; Bissig *et al.*, 2017; Jaramillo *et al.*, 2019; Leal-Mejía *et al.*, 2019; Marín-Cerón *et al.*, 2019; Tassinari *et al.*, 2008; Weber *et al.*, 2020**). Metaluminous adakite-like and garnet-bearing rocks are also common in between the intrusives of the Combia Volcanic Complex, reflecting variable fractionation trends under heterogeneous crustal architectures (**Bissig *et al.*, 2017; Jaramillo *et al.*, 2019; Weber *et al.*, 2020**).

The Irrá-Tres Puertas Formation is exposed in the southern segment of the Amagá Basin. This unit comprises conglomerates, sandstones, mudstones, thin layers of coal, tuffaceous sandstones, and pyroclastic rocks deposited by alluvial systems (**Sierra *et al.*, 2012**). This unit yields a zircon fission track age of 6.3 Ma obtained in a pyroclastic layer (**Toro *et al.*, 1999**) and is intruded by Upper Miocene porphyries, which means that it is correlatable with the Combia Volcanic Complex.

Cenozoic tectono-magmatic evolution of the Amagá Basin and the bounding cordilleras

The evolution of the Amagá Basin was linked to the exhumation and uplift of the adjacent Western and Central Cordilleras. These orogenic belts consist of crystalline basement rocks formed in contrasting tectonic and paleogeographic settings. The Central Cordillera is mostly composed of Permian to Eocene igneous and metamorphic rocks formed in a continental margin (**Bustamante *et al.*, 2016; Spikings *et al.*, 2015; Villagómez *et al.*, 2011**) while the predominantly igneous basement of the Western Cordillera corresponds to an oceanic plateau formed to the SW of the continental margin (**Kerr *et al.*, 1996**). The basement rocks of both cordilleras are intruded by late Cretaceous and Eocene-Paleocene plutonic rocks (**Cardona *et al.*, 2018; Duque-Trujillo *et al.*, 2019**).

The Central Cordillera basement is the result of several Paleozoic to Cenozoic orogenic cycles, including the accretion of the Caribbean Plateau during the late Cretaceous (**Jaramillo *et al.*, 2017; Spikings *et al.*, 2015; Zapata *et al.*, 2020; Zapata-Villada *et al.*, 2021**). These orogenic events of erosion and uplift, such as topographic growth during the onset of the Andean orogeny and the collision of the Caribbean Plateau during the Cretaceous, were followed by multiple phases of topographic growth and decay during the Cenozoic (**Restrepo-Moreno *et al.*, 2009; Zapata *et al.*, 2021**). In contrast, despite being accreted during the late Cretaceous, the onset of uplift and exhumation in the Western Cordillera occurred between the Eocene and the late Oligocene (**Lara *et al.*, 2018; León *et al.*, 2018**). During the Miocene (~25 to 15 Ma), a Cretaceous to Eocene oceanic arc (Panamá-Chocó Block) collided with the continental margin. As a result of the collision, both the Panamá-Chocó Block and the Western Cordillera experienced phases of uplift and exhumation (**León *et al.*, 2018; Montes *et al.*, 2015**).

The evolution of the Amagá Basin was shaped by several tectonic events, with most authors agreeing that basin filling and inversion were influenced by strike-slip tectonics (**Lara *et al.*, 2018; Piedrahita *et al.*, 2017; Silva-Tamayo *et al.*, 2020**). Between the late Oligocene and the Early Miocene, the changes in plate convergence vectors and the fragmentation of the Farallon Plate led to the development of topography in the Western Cordillera and the onset of hinterland sedimentation (**Lara *et al.*, 2018; Silva-Tamayo *et al.*, 2020**). The oblique collision and docking of the Panamá-Chocó Block between 25 and 12 Ma further promoted uplift and exhumation along the Western Cordillera, provided new sedimentary sources in the basin, and changed the fluvial systems from meandered to braided (**Lara *et al.*, 2018; León *et al.*, 2018; Montes *et al.*, 2015**). After the collision, between ~11 Ma and ~5 Ma, the Amagá Basin hosted the volcanic and intrusive magmatism of the Combia Volcanic Complex (**Bernet *et al.*, 2020; Bissig *et al.*, 2017; Jaramillo *et al.*, 2019; Weber *et al.*, 2020**). Finally, the slab flattening of the Nazca Plate after ~5 Ma has been linked to the Late Miocene uplift of the Central Cordillera, the cessation of magmatism, and the deformation of Miocene-Pliocene rocks (**Jaramillo *et al.*, 2019; Pérez-Consuegra *et al.*, 2022; Wagner *et al.*, 2017**).

Methods

Mineral chemistry and thermobarometry

The mineral compositions of amphibole, plagioclase, and garnet crystals obtained for this study were done in a polished thin (30 μm) section of a pyroclastic rock (Sample CQM-28B; 8.2 ± 0.1 Ma; **Jaramillo et al.**, 2019) at the Department of Lunar and Planetary Sciences of the University of Arizona. After petrographic observations, we selected almost 20 crystals from the mentioned mineral phases for the electron probe micro-analyzer (EPMA). These analyses were performed using CAMECA SX-50 equipment, including quantitative spot analysis done by wavelength-dispersive spectrometry (WDS). The analyses were done with a beam current of 20.0 nA, an accelerating voltage of 15 kV, and a total counting time of 20s. The standards used for element calibrations included “albite-Cr” for Na, “ol-fo92” for Mg and Si, “anor-hk” for Al and Ca, “kspar-OR1” for K, “rutile1” for Ti, “fayalite” for Fe, “rhod-791” for Mn, “chrom-s” for Cr, and “Sp5” for Ni.

Structural formulas of amphibole crystals were calculated following the latest International Mineralogical Association (IMA, 2012) recommendations, which considered that $\text{O}+\text{OH}+\text{F}+\text{Cl}$ was equal to 24 atoms per formula unit (apfu). For thermobarometry calculations, amphibole $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ratios were determined assuming 13 cations exclusive of Ca, Na, and K (13-CNK). Cation proportions and formulas for plagioclase and garnet were calculated based on 8 and 12 oxygens, respectively. The summary of the EPMA data and references for normalization and structural mineral formulas are presented in **table 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1871/3389>.

Amphibole physicochemical parameters, such as crystallization temperatures ($T^{\circ}\text{C}$), oxygen fugacity ($f\text{O}_2$), and water contents ($\text{H}_2\text{O}_{\text{melt}}$), were calculated using the equations of **Ridolfi** (2021) while crystallization pressure estimations (MPa) were obtained using the $T^{\circ}\text{C}$ -independent calibrations of **Mutch et al.** (2016). Using these procedures, we recalculated published mineral compositions for the same mineral phases in six garnet-bearing porphyries and one andesite from the Combia Volcanic Complex (data from **Bissig et al.**, 2017; **Weber et al.**, 2020).

U-Pb geochronology

Zircons from four samples (V1: Andesite, 20OCT-043: garnet-bearing andesite; PF10 and GB24: pyroclastic rocks) (**Table 1**) were separated at Zirchron LLC®, Tucson, AZ. Zircon U-Pb ages were measured at the Radiogenic Isotope and Geochronology Lab (RIGL) at Washington State University using an Analyte G2 193 excimer laser ablation system coupled with a Thermo-Finnigan™ Element 2 single-collector, inductively coupled, plasma mass spectrometer. The laser parameters included a spot size of 35 μm , a repetition rate of 10 Hz, and an energy of ~ 5.5 J/cm². The procedures followed those of **Chang et al.** (2006), except for the use of the 193 nm laser system instead of the 213 nm laser. The Plešovice standard (337 Ma) was used to calibrate the ²⁰⁶Pb/²³⁸U and ²⁰⁷Pb/²³⁵U ages, and the common Pb correction was performed using the ²⁰⁷Pb method. Plots were generated using Isoplot 4.15. The zircon U-Pb data are reported in **table 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1871/3390>.

We reported the ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb zircon age for grains older than 1000 Ma, while the ²⁰⁶Pb/²³⁸U age was reported for younger grains. Normal and inverse discordance values were calculated for ages older than 500 Ma, eliminating those that exceeded 20%. The data with more than a 10% error were discarded.

Lu-Hf isotopes in zircon

After the U-Pb analysis, the Lu-Hf isotopic compositions of each sample were analyzed using an Analyte G2 193 nm excimer laser ablation system coupled with a Thermo-Finnigan™ Neptune multi-collector mass spectrometer. Operating parameters included a laser fluence of ~ 5.5 J/cm² and a repetition rate of 10 Hz, following the method discussed by **Fisher et al.** (2014), except that U-Pb dates were not simultaneously determined. The

Table 1. Sample information and average of mineral chemistry of amphibole and petrochronologic data from zircon and amphibole for volcanic rocks of the Combia Volcanic Complex system

Samples	Lat.	Long.	Volcanic facies	U-Pb Age (Ma)	$\epsilon\text{Hf}(t)$	Ti-in-Zr (°C)	Crystallization parameters			
							P ($\pm 50\text{MPa}$)	T ($\pm 22^\circ\text{C}$)	Log f_{O_2} (± 0.3)	H ₂ O wt.% ($\pm 14\%$)
V1	5.97	-75.77	Garnet-free andesite porphyry	7.9 \pm 0.1	10.8 \pm 1.5	698	-	-	-	-
20-OCT-043	5.81	-75.79	Garnet-bearing andesite porphyry	8.3 \pm 0.1	7.5 \pm 1.3	688	-	-	-	-
PF-10	5.22	-75.64	Pyroclastic rock	8.7 \pm 0.1	12.6 \pm 1.2	685	-	-	-	-
GB-24	5.41	-75.57	Pyroclastic rock	8.7 \pm 0.1	9.7 \pm 4.4	692	-	-	-	-
CQM-28B**	5.90	-75.69	Garnet-bearing pyroclastic rock	8.2 \pm 0.1	6.7 \pm 2.1	-	649	832-907	-12.5	9.0
MJG-132***	5.83	-75.81	Garnet-bearing porphyry	8.9 \pm 0.3	-	-	544	873	-11.9	7.2
MJG-134***	5.84	-75.81	Garnet-bearing porphyry	8.6 \pm 0.1	-	-	619	888	-11.2	7.9
MW-1***	5.97	-75.77	Garnet-free andesite porphyry	7.9 \pm 0.1	-	-	-	-	-	-
CB-P-TB-36*	-	-	Garnet-bearing porphyry	-	-	-	760	885	-10.5	9.3
CB-P-TB-37*	4.92	-75.70	Garnet-bearing porphyry	11.75 \pm 0.04	-	764	756	883	-10.8	9.3
CB-P-TB-38*	4.92	-75.70	Garnet-bearing porphyry	-	-	-	719	918	-10.7	8.8
CB-M-AG-25*	5.29	-75.69	Garnet-bearing porphyry	9.25 \pm 0.02	-	733	-	-	-	-

References: *Bissig *et al.*, 2017; **Jaramillo *et al.*, 2017; ***Weber *et al.*, 2020

output from the ablation cell was mixed with N₂ gas and delivered directly to the Neptune MC-ICPMS. The Plešovice zircon standard ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282482 \pm 13$) was regularly analyzed between sample blocks to correct the measured $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ of unknowns and reduce inter-laboratory bias. Correction for the isobaric interference of ^{176}Yb and ^{176}Lu on ^{176}Hf was assessed using quality control zircons (Fisher *et al.*, 2014). Internal 2-sigma precision was ~ 1.1 ϵHf . Analyses with less than 25 ratios or internal 2-sigma uncertainty over 2 ϵHf units were discarded. Present-day ϵHf values were calculated using the CHUR parameters reported by Bouvier *et al.* (2008). Zircon Lu-Hf isotopic data are reported in table 3S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1871/3391>.

Trace element and Lu-Hf isotopes analysis in zircon

Samples with U-Pb and Lu-Hf data were also selected for the trace element analysis including rare earth element (REE) using LA-ICP-MS performed at the Washington State University. Between 8 and 14 zircons were analyzed for each sample. The analysis consisted of two cleaning pulses, 10s washout, 18s gas blank, 40s ablation, and 15s wait before moving the stage. Standards NIST610 and NIST612 and zircon reference 91500 were verified every 15 analyses. Data correction and reduction were performed using the Iolite software. Trace elements and REE zircon data are presented in table 4S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1871/3391>.

Results

New integrated zircon U-Pb, Hf isotopes, trace element results, and mineral chemistry were obtained on several magmatic samples from the Combia Volcanic Complex and the Irrá-Tres Puertas Formation at the northern and southern segments of the Amagá Basin. Here we present some interpretations derived from these results to avoid repetitions in the discussion.

Mineral chemistry and crystallization conditions

Previous studies have documented the existence of andesites, porphyries, and pyroclastic rocks with garnet in the Combia Volcanic Complex (Bissig *et al.*, 2017; Jaramillo *et al.*, 2019; Ramírez *et al.*, 2006; Weber *et al.*, 2020). Here we present new mineral chemistry from a garnet-bearing pyroclastic rock found in the northeastern segment of the Amagá

Basin, which, together with published data from the other garnet-bearing igneous rocks, can be used to understand deep crustal magmatic processes and the evolution of crustal architecture in the Amagá Basin.

The analyzed pyroclastic rock (Sample CQM-28B) is characterized by a mixture of primary vitric-crystalline and fragmental textures with euhedral to subhedral plagioclase, amphibole, garnet, and quartz phenocrysts, and rounded to angular juvenile-accessory basaltic/andesitic fragments (twinned plagioclase, amphibole, and oxy-hornblende). Additionally, minor rounded accidental lithics (fine-grained sandstones) are embedded into the glassy matrix. Devitrification and jaw-sag textures were also identified.

Mineral chemical results from amphiboles in the Combia Volcanic Complex, including our newly analyzed sample and those from porphyritic rocks presented by **Bissig et al.** (2017) and **Weber et al.**, (2020), indicate predominantly calcic compositions [$0.78 \leq \text{BCa}/\text{B}(\text{Ca}+\text{Na}) \leq 0.95$], classifying as ferri-tschermakite with minor variations to ferri-sadanagaite (**Figure 2A**). The amphibole compositions from porphyritic rocks showed AlT and Ti values of up to 2.75 and 0.24 (in apfu), higher than those in the pyroclastic rock of up to 2.43 and 0.21, respectively (**Table 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1871/3389>). These values positively correlate with the Mg number [$\text{Mg\#} = \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{FeT})$ wt.% oxides], which is between 0.40 and 0.70 in porphyries and between 0.47 and 0.65 in the pyroclastic facies. In contrast, the Fe³⁺/Fe²⁺ ratios were significantly higher in the pyroclastic rock (0.47 to 2.81) compared to those from the porphyries (0.42 to 1.55; **Table 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1871/3389>).

Calculated intensive parameters (P, T, $f\text{O}_2$, $\text{H}_2\text{O}_{\text{melt}}$) using the chemistry of amphiboles for the Combia Volcanic Complex are presented in **table 1**. Despite having similar compositions (**Figure 2A**), the porphyritic rocks exposed in the south present the highest crystallization pressures and temperatures of 526-866 (± 50) MPa and 841-968 (± 22)°C (**Figure 2B**), which can be related to the crystallization of an H₂O-rich (~9.2 wt. %) magma in the middle crust at a depth of ~28 km under elevated magmatic oxidation state ($f\text{O}_2 = \text{NNO}+0$ to $\text{NNO}+3$) (**Figure 2C**). Porphyries from the north have overlapping temperatures varying from ~849 to 908 (± 22)°C (**Figure 2B**) but lower pressure emplacement values between 499 to 653 (± 50) MPa (**Figure 2B**), indicating magma fractionation at lower crustal levels at ~24 km depth, and moderate magmatic oxidizing conditions ($f\text{O}_2 = \text{NNO}+0$ to $\text{NNO}+1$) (**Figure 2C**) with ~7.5 wt. % H₂O in the melt. Amphibole fragments randomly distributed in the vitric-crystalline texture from the pyroclastic rock exhibited similar pressure conditions at ~24 km of depth (**Figure 2B**) but showed the lowest crystallization temperatures among the Combia volcanic facies, between 832 to 870 (± 22 °C), indicating magma fractionation under relatively lower oxidation conditions ($f\text{O}_2 = \text{NNO}-1$ to $\text{NNO}+0$) (**Figure 2C**).

Core-to-rim chemical data from plagioclase phenocrysts in the northern porphyries showed variable compositions from bytownite to labradorite ($\text{An}_{70-90}\text{-Ab}_{10-30}\text{-Or}_{1-8}$) while the southern porphyries and the pyroclastic rock were characterized by plagioclases with labradorite to andesine ($\text{An}_{30-60}\text{-Ab}_{40-70}\text{-Or}_{1-5}$) (**Table 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1871/3389>). These compositions suggest that plagioclase phenocrysts from the Combia Volcanic Complex were crystallized at temperatures close to the solidus between 700° to 750°C according to the Ab–An–Or diagram (**Figure 2D**).

Chemical compositions of garnets contain significant amounts of almandine (43-62%), similar grossular and pyrope (11-25% and 11-20%, respectively), and low spessartine (2-19%) (**Figure 2E**). These compositions show two distinct garnet types: (i) one group of Ca- and Mn-rich garnets from the southern porphyries and (ii) garnets with relatively minor Ca- and Mn contents from the northern volcanic rocks which plotted in the high-pressure magmatic crystallization conditions field (HP garnets) of the CaO vs. Mn diagram shown in **figure 2F** (**Harangi et al.**, 2001). The early crystallization of the almandine-rich garnets indicates that this phase corresponds to the near-liquidus mineral among the distinct Combia volcanic facies suggesting an earlier deeper magmatic fractionation of nearly 40 km (e.g. **Harangi et al.**, 2001; **Yuan et al.**, 2009).

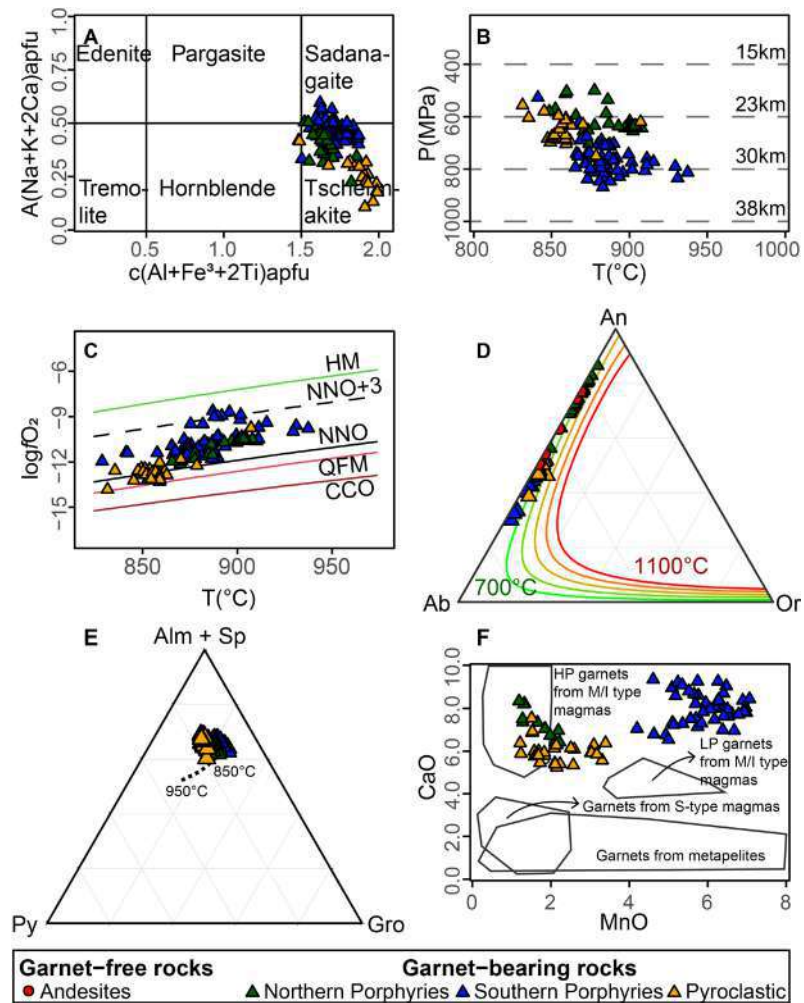


Figure 2. Compositional classification for amphibole, plagioclase, and garnet minerals from porphyries, andesite, and pyroclastic rocks exposed in the Amagá Basin. **A.** Amphibole classification diagram. **B.** Thermobarometry results using the chemistry of amphiboles. **C.** Log f_{O_2} vs. temperature fields from **Ridolfi** (2021) showing the contrasting amphibole crystallization conditions in the Combia volcanic rocks. **D.** An-Ab-Or ternary diagram of feldspars showing the temperature model from **Elkins & Grove** (1990). **E.** Ternary garnet diagram, the dashed line corresponds to the isobaric cooling between 950 and 850°C (**Alonso-Pérez et al.**, 2009). **F.** Binary MnO vs. CaO plot showing the distinct tectonic setting of garnet formation proposed by **Harangi et al.**, (2001).

Geochronology

U-Pb zircon results were obtained from two lavas and one pyroclastic rock from the Combia Volcanic Complex and one pyroclastic rock from the Irrá-Tres Puertas Formation (**Figure 1B**; **Table 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1871/3390>).

Samples showed zircons younger than ~9 Ma having Th/U ratios between 0.09 and 1.1 (**Table 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1871/3390>), suggesting an igneous instead of a metamorphic origin. Older zircon grains with ages between 35 and 2731 Ma and Th/U between 0.12 and 1.1 were interpreted as inherited (**Table 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1871/3390>). Zircons have sub-hedral to euhedral shapes, with grain sizes ranging from 50 to 400 μm and length: width (l:w) ratios between 1:1 and 4:1. Cathodoluminescence images showed oscillatory zoning and dark patterns in the magmatic zircons and sector zoning and complex core rims pattern in the inherited ones (**Text 1S**).

Andesite (Sample V1) collected in the Cerro Tusa dome (**Figure 1B**) has a crystallization age of 7.9 ± 0.1 Ma (2σ , $n=41$) (**Figure 3A, B**) and two zircons with inherited ages of 262 and 1428 Ma. Farther south, a garnet-bearing andesite collected close to the town of Jericó (Sample 20OCT-043) yielded a crystallization age of 8.3 ± 0.1 Ma (2σ , $n=15$) (**Figure 3C, D**). Lastly, the sample GB24 corresponding to an agglomerate collected close to the town

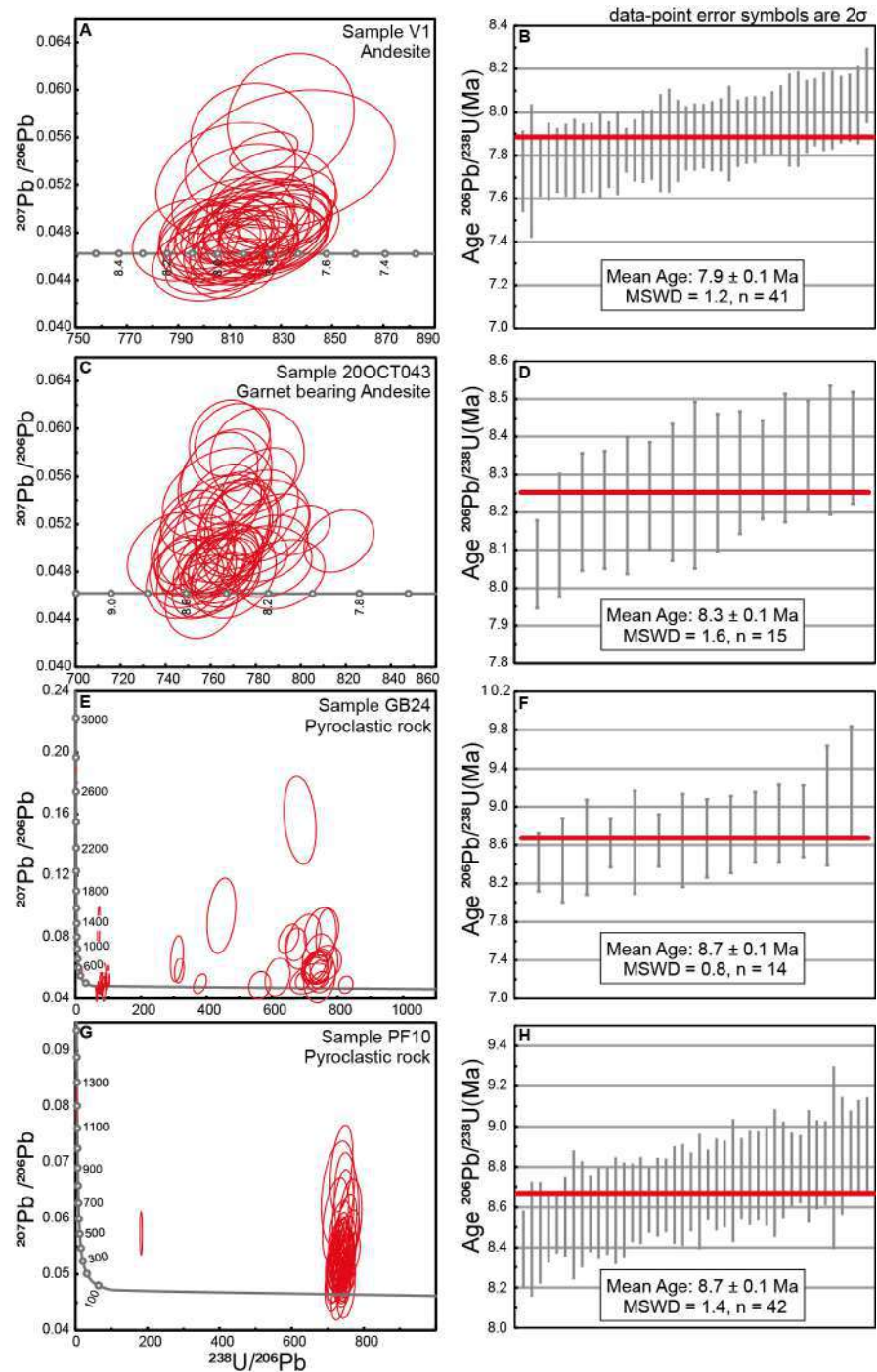


Figure 3. U-Pb geochronological results from the volcanic samples for Combia Volcanic Complex (A - F) and Irrá-Tres Puertas Formation (G-H). Tera-Wasserburg and weighted average age plots. PDC: Pyroclastic density currents.

of La Merced (Caldas) shows a maximum depositional age of 8.7 ± 0.1 Ma (2σ , $n=16$) (**Figure 3E, F**), which is considered a maximum age for the pyroclastic event. Other zircon crystals have Early Miocene (19 Ma) and Late Cretaceous (69 - 100 Ma) ages and single grains with ages between 309 and 2731 Ma.

The pyroclastic rock sample PF10 was collected in the Irrá-Tres Puertas Formation close to the town of Irrá and yielded an age of 8.7 ± 0.1 Ma (2σ , $n=42$), which can be related to the maximum age for the pyroclastic accumulation. Also, two zircons were 35 and 1195 Ma.

Zircon chemistry and Hf isotopes

Trace elements and Hf isotopes in zircons were conducted in the same samples used for geochronology. Additionally, we reviewed the trace element data from porphyritic rocks in the southern segment of the Amagá Basin presented by **Bissig *et al.*** (2017).

The magmatic facies of the Combia Volcanic Complex have similar trace elements in zircon compositions, with few differences in some specific elements that we discuss next. Zircons show a positive slope between the light rare earth elements (LREE) and the heavy rare earth elements (HREE). However, the garnet-bearing andesite (20OCT-043) was characterized by a lower slope when compared with all the other samples (**Figure 4A**). All samples showed a flat to weakly negative Eu trend with Eu/Eu* ratios between 0.20 and 0.91, except for the garnet-free andesite that exhibited a stronger negative anomaly (Eu/Eu* between 0.03 and 0.08) (**Figure 4B**). Furthermore, all samples have a positive Ce anomaly, which is more pronounced in the porphyries and the pyroclastic rocks compared to the andesites. Ti values had low variations, between 4.9 and 6.5 ppm, in the pyroclastic and andesitic samples corresponding to temperatures between 683.0 and 704.3 °C while in porphyries these values were more scattered, between 4.1 and 19.8 ppm, corresponding to temperatures from 668.1 to 804.6 °C (**Figure 4B**).

Th/U ratios exhibited a correlation with the presence of magmatic garnet. The U content of the samples ranged between 100 and 1000 ppm, while the Th values ranged between 10 and 700 ppm. The garnet-free magmatic facies had higher Th/U values, between 0.19 and 1.07, while the garnet-bearing had relatively lower values ranging from 0.04 to 0.33 (**Figure 4C, D**).

Yb/Gd showed a trend between the garnet-free volcanic rocks, whereas porphyries and garnet-bearing andesite show a data cloud (**Figure 4D**). The pyroclastic rocks and andesites had higher Yb/Gd ratios ranging from 15 to 80, followed by the porphyritic rocks with ratios between 10 and 50. Finally, garnet-bearing andesites had lower values ranging from 5 to 14. Additionally, all samples plot in an array of magmatic arc zircons in the Nb/Yb vs U/Yb diagram (**Figure 4E**). $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ values in the garnet-bearing rocks varied between 4.7 and 9.12, while garnet-free rocks exhibited a wider $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ range with values between -0.9 and 13.8 (**Figure 4F**).

Discussion

After Grosse's fundamental cartographic work on the Amagá Basin, significant progress has been made in understanding specific aspects associated with the history of this basin, including its structural style and geometry, the evolution of its sedimentary systems, and its tectono-magmatic evolution (**Bernet *et al.***, 2020; **Bissig *et al.***, 2017; **Jaramillo *et al.***, 2019; **Lara *et al.***, 2018; **Piedrahita *et al.***, 2017; **Silva-Tamayo *et al.***, 2020). Moreover, the sedimentary and volcanoclastic filling of this basin has provided relevant data on major issues concerning the Cenozoic tectonic evolution of northwestern South America, such as the collision of the Panamá-Chocó Block and the subduction history of the Nazca Plate (**Jaramillo *et al.***, 2019; **Lara *et al.***, 2018; **Montes *et al.***, 2015; **Silva-Tamayo *et al.***, 2020).

Based on the data presented in this study, on a review of recent provenance, and the thermochronological constraints from various regions in the northern Colombian Andes, including the Central and Western cordilleras and the Amagá, Upper and Middle

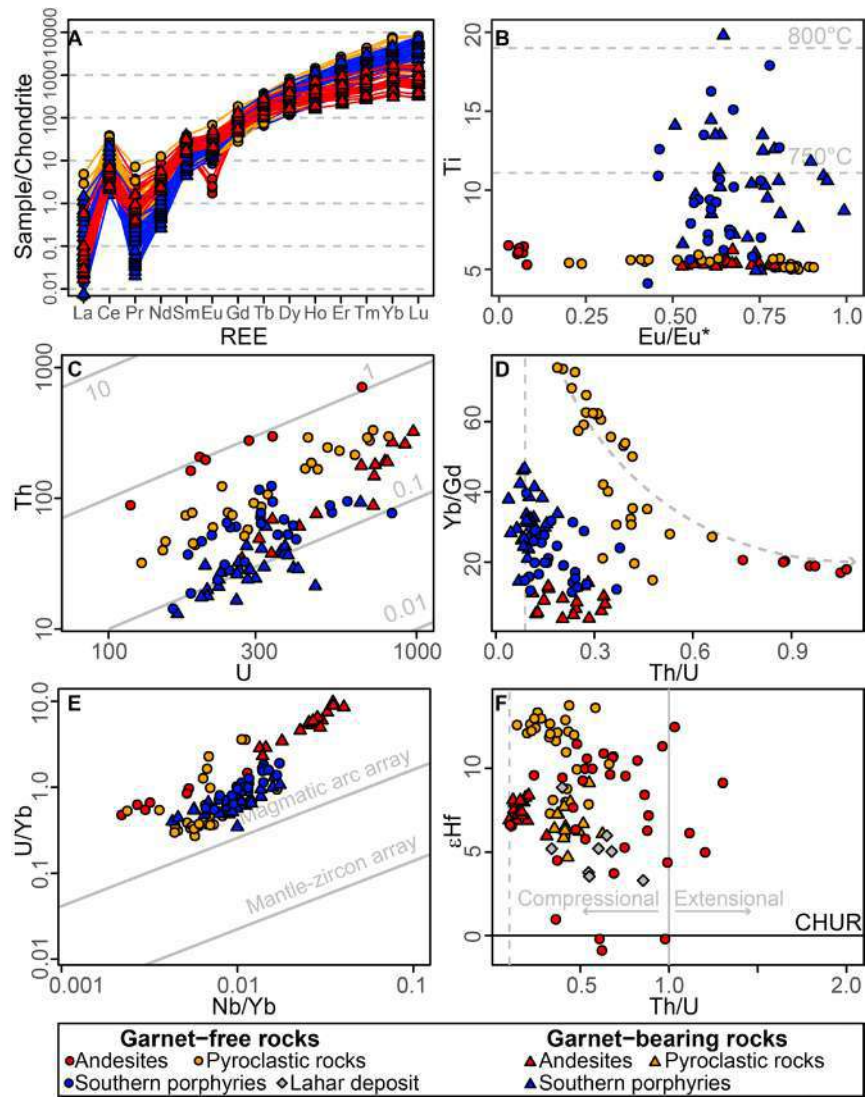


Figure 4. A. Spider plot of REE normalized to chondrite (McDonough & Sun, 1995). B. Eu/Eu^* calculated as $Eu_N/(Sm_N * Gd_N)^{0.5}$ vs. Ti (ppm) and the inferred saturation temperatures (Ferry & Watson, 2007). C. Th v. U and Th/U ratios, D. Th/U vs Yb/Gd. E. Nb/Yb vs. U/Yb, annotations are from Grimes *et al.*, (2015). F. Th/U vs ϵHf_0 , annotations are from McKay *et al.*, (2018). Zircon chemical and isotopic data from garnet-free and garnet-bearing porphyries are from Bissig *et al.*, (2017), ϵHf_0 data from garnet-bearing pyroclastic rocks and some other andesites are from Jaramillo *et al.* (2019). The dashed vertical lines in figure 4 D and F correspond to Th/U=0.01.

Magdalena, and Caribbean basins, we investigated the paleogeographic and structural development of the Amagá Basin with special emphasis on the significant role of strike-slip tectonics on its Cenozoic evolution (Montes *et al.*, 2019; Silva-Tamayo *et al.*, 2020).

Basin configuration and paleogeography

In Grosse’s study, the Amagá Basin was found to have two main filling phases separated by an angular unconformity: the Oligocene to Middle Miocene Amagá Formation, characterized by sedimentation without magmatic activity, and the Middle Miocene to Pliocene Combia Volcanic Complex, which recorded a period of intra-arc magmatism in the basin. The stratigraphic analysis of the Amagá Formation suggests that it was deposited in fluvial systems within several intermountain pull-apart basins (Lara *et al.*, 2018;

Silva-Tamayo *et al.*, 2020). For the Combia Volcanic Complex, the magmatic activity was contemporaneous with sedimentation in fluvial environments and the denudation of volcanic edifices (**Sierra *et al.*, 2003; Ramírez *et al.*, 2006**).

Available detrital zircon ages from the Amagá Formation (Lower and Upper members) include 1273 zircon ages from 11 samples distributed in three localities along the basin (**Bissig *et al.*, 2017; Jaramillo *et al.*, 2019; Lara *et al.*, 2018; Montes *et al.*, 2015; Naranjo *et al.*, 2018; Santacruz *et al.*, 2021; Zapata *et al.*, 2020**). The broad stratigraphic and spatial distribution of this detrital database can be used to reconstruct the regional configuration of the Amagá Basin and its fluvial connection with or isolation from other basins.

The Oligocene to Early Miocene Lower Amagá Formation is more compositionally mature than the Middle Miocene Upper Amagá Formation (**Lara *et al.*, 2018**). The Lower Amaga Formation is characterized by dominant late Cretaceous to early Eocene (100 - 45 Ma) zircon age populations that account for 86% of the ages, with a minor component of early Cretaceous (1.7%) and Permo-Triassic (12%) age populations whereas the Upper Member exhibits similar late Cretaceous to early Eocene (67%) and Permo-Triassic (24%) populations besides the presence of a diagnostic late Eocene to Oligocene (3.2%) Panamanian population (**Table 2**) (**Figure 5**).

Late Cretaceous to early Eocene zircon ages are characteristic of primary and reworked volcanoclastic and plutonic rocks in the axis and western flank of the Central Cordillera and in the axis and eastern flank of the Western Cordillera (**Bustamante *et al.*, 2016; Duque-Trujillo *et al.*, 2019; Pardo-Trujillo *et al.*, 2020; Villagómez *et al.*, 2011; Zapata-Villada *et al.*, 2021**). The high proportion of late Cretaceous detrital zircons suggests that most of their sources were related to the erosion of the magmatic arcs and volcanoclastic sequences exposed in both cordilleras (**Cardona *et al.*, 2020; Duque-Trujillo *et al.*, 2019; Jaramillo *et al.*, 2017; Pardo-Trujillo *et al.*, 2020; Zapata-Villada *et al.*, 2021**). Such affinity to the bounding cordilleras confirms the intra-mountainous character of this basin. The younger Eocene to Oligocene sources in the Upper Amagá Formation have been considered a major tracer of the 25-12 Ma docking of the Panamá-Chocó Block, which is exposed in the western flank of the Western Cordillera (**Lara *et al.*, 2018; Silva-Tamayo *et al.*, 2020**).

In the Upper Amagá Member, there is a higher abundance of lithic fragments, particularly those of plutonic and metamorphic origin, compared to the Lower Amagá Member. The latter is distinguished by a low percentage of volcanic lithics (**Lara *et al.*, 2018**). This pattern, coupled with the observed rise in the proportion of Permian and Triassic zircon ages (as depicted in **figure 5**), implies that sources from the Central Cordillera region became more prominent.

The Western Cordillera has been subject to various cooling phases and there is available thermochronological data and thermal history modeling suggesting at least two major phases of cooling from the Eocene to late Oligocene and Middle Miocene to Pliocene (**León *et al.*, 2018; Villagómez *et al.*, 2011**). In contrast, the Central Cordillera

Table 2. Summary of the geochronological results with the age ranges in percentage

Lithostratigraphic Unit	N (grain number)	Ages (%)					
		0 - 10 Ma	10 - 30 Ma	30 - 45 Ma	45 - 100 Ma	100 - 130 Ma	>130 Ma
Lower Amagá Fm	706	0.0	0.0	0.0	86.1	1.7	12.2
Upper Amagá Fm	567	0.0	3.7	3.2	67.5	0.9	24.7
Combia Volcanic Complex (Pyroclastic rocks)	180	62.8	10.0	0.6	12.1	1.2	13.3
Combia Volcanic Complex (Crystalline rocks)	252	73.4	2.0	0.8	4.4	3.2	16.3
Santa Fe de Antioquia Fm	113	9.7	0.0	0.0	30.1	0.0	60.2

has a more extensive thermochronological dataset, which has been interpreted as a result of different phases of exhumation and deformation between the late Cretaceous and the Miocene (**Duque-Palacio et al., 2021**; **Pérez-Consuegra et al., 2022**; **Restrepo-Moreno et al., 2009**; **Zapata et al., 2020**).

An integrated regional thermo-kinematic modeling of the available data on the Central Cordillera revealed rapid exhumation and uplift during the late Cretaceous followed by topographic decay during the Paleogene and uplift during the Miocene (**Zapata et al., 2021**). This scenario where the Central Cordillera was an old and denuded landscape that was re-activated in the Miocene is consistent with the previously mentioned increase in detrital sources from the Central Cordillera during the Middle Miocene (**Zapata et al., 2021**).

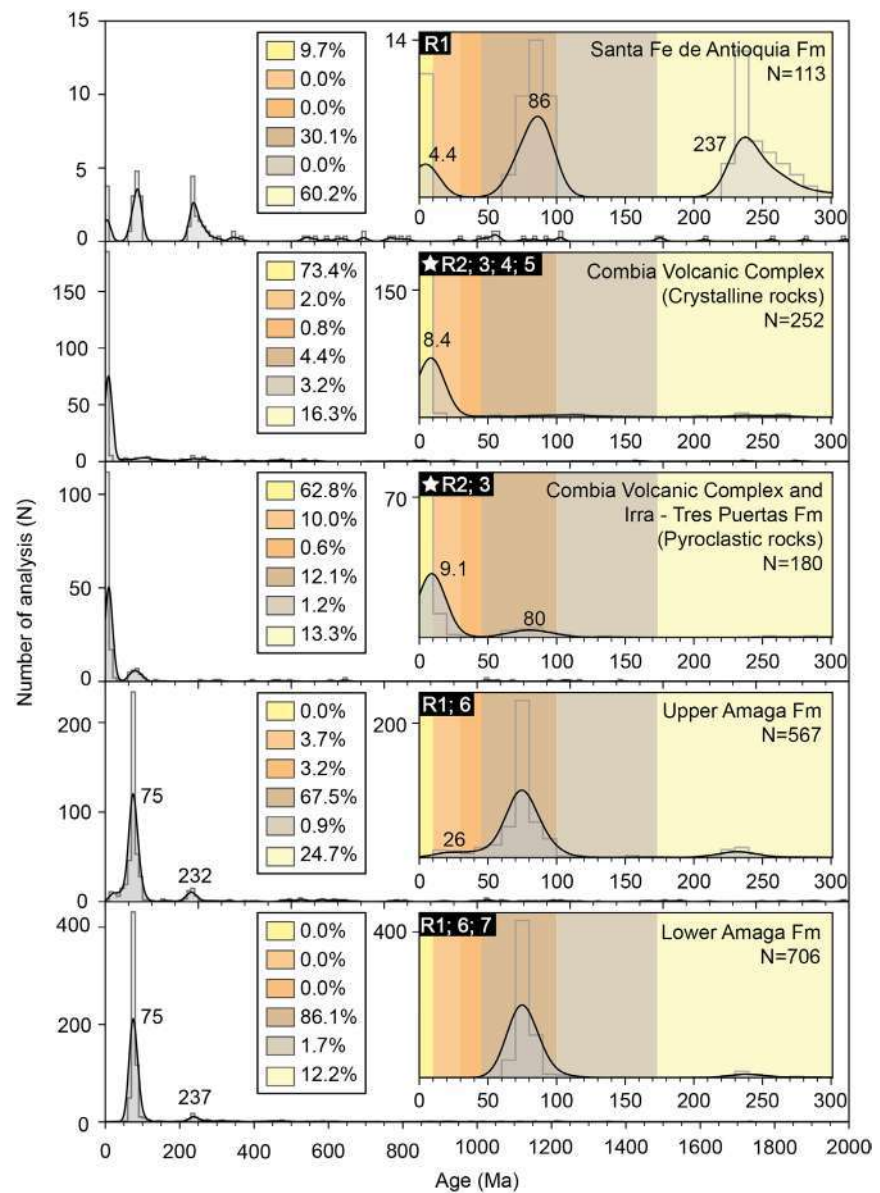


Figure 5. Kernel density estimates of zircon U-Pb ages data compiled from Cenozoic units in the Amagá Basin. Black squares contain the references of the compiled data while white stars denote the data presented in this contribution (R1: **Lara et al., 2018**; R2: **Bissing et al., 2017**; R3: **Jaramillo et al., 2019**; R4: **Naranjo et al., 2018**; R5: **Santacruz et al., 2021**; R6: **Montes et al., 2015**; R7: **Zapata et al., 2020**).

In summary, provenance signatures and modeled thermochronological data indicate Eocene to Oligocene exhumation and uplift in the Western Cordillera, while the Central Cordillera was a decaying positive relief. Furthermore, both cordilleras underwent exhumation and uplift during the Middle Miocene to Pliocene, a final phase that was more intense in the Western Cordillera. The observations further suggest that deformation and exhumation were more prolonged and intense to the west, within the suture zone of the Western Cordillera, which documents the oblique approach of the Panamá Arc to northwestern South America (**Lara *et al.*, 2018; León *et al.*, 2018; Montes *et al.*, 2019**).

Additional insights on the geometrical and structural evolution of the Amagá Basin can be evaluated from its relationship with other Oligo-Miocene basins. **Montes *et al.* (2015)** proposed a fluvial connection between the Amagá, the Caribbean Sinú-San Jacinto, and the Lower Magdalena basins based on the synchronous apparition of Eocene (30 to 45 Ma) zircons from the Panamá-Chocó Block in these basins. Similarly, the presence of Eocene to Miocene zircons in the Upper Magdalena Basin served to propose a fluvial connection between the Amagá, the Cauca-Patía, the Upper Magdalena, and the Amazon basins (**Montes *et al.*, 2021**). Based on a regional interpretation of the sedimentary facies in the Sinú-San Jacinto and Lower Magdalena basins, **Mora *et al.* (2018)** proposed a model that suggests a long-lived connection between these basins (Proto-Cauca).

The presence of the Eocene to Oligocene zircon ages indicates that the Panamá-Chocó Block became the source area of the Amagá and San Jacinto basins; however, it does not necessarily imply a fluvial connection between these basins. Additionally, the presence of an Eocene volcanic arc in the southern part of the Western Cordillera (Timbiquí Arc) presents a valid source for the Eocene zircon grains in the Upper Magdalena Valley and other basins in the south; in consequence (**Zapata *et al.*, 2023**), a fluvial connection between the Panamá-Chocó Block and the Amazonia is not required.

Based on geomorphometric data, **Pérez-Consuegra *et al.* (2022)** proposed that the connection between the Amagá and the San Jacinto basins occurred only after 7 Ma. This interpretation aligns with the existence of a relatively high Western Cordillera and a low Central Cordillera, which may have facilitated west-to-east drainage connections between the Amagá and Middle Magdalena basins. Hence, we favor the paleogeographic model that proposes a connection between the Amagá Basin and the eastern Middle Magdalena Basin presented in **Zapata *et al.* (2023)**.

However, it should be noted that the configuration of the paleo-drainage network in the Amagá Basin remains an open research topic and that regional provenance and stratigraphic correlation are necessary to resolve and clarify this discussion. The available data still leaves room for further investigation and refinement of the paleogeographic configuration, the subsidence mechanisms, and the topographic evolution of the Amagá Basin.

The Combia Volcanic Complex: Late Miocene structurally controlled volcanic arc

The new U-Pb zircon results from volcanic rocks of the Combia Volcanic Complex exhibit ages between 8.7 and 7.9 Ma, which together with published geochronological data (**Bissig *et al.*, 2017; Jaramillo *et al.*, 2019, Santacruz *et al.*, 2021; Weber *et al.*, 2020**) suggest that the volcanic record of the Combia Volcanic Complex in the Amagá Basin only lasted ~6 Ma, with older ages in the south (11.8 - 4.7 Ma) and apparently younger in the north (9.0 - 5.2 Ma).

Previous geochemical and isotopic studies conducted on the Combia Volcanic Complex have recognized geochemical groups exhibiting tholeiitic, calc-alkaline, and adakite-like signatures (**Bernet *et al.*, 2020; Bissig *et al.*, 2017; Borrero & Toro-Toro, 2016; Jaramillo *et al.*, 2019; Weber *et al.*, 2020**), as well as exotic garnet-bearing igneous rocks (**Bissig *et al.*, 2017; Weber *et al.*, 2020; this contribution**). These compositional heterogeneities are widely distributed along the Amagá Basin and are evident in the Hf results (including those reported here), which range from -0.9 to 13.8, as well as in the variations of oxygen fugacity observed in the amphiboles (**Figures 2C and 4F**).

Extensive discussions have been conducted on the relation between HREE and LREE elements and La/Yb or Sr/Y ratios as tracers of MOHO depth and crustal thickness (e.g., **Luffi & Ducea**, 2022 and references therein). These inferences are based on the fact that intermediate to silicic magmas that evolved from mantle magmas are fractionated at the base of the crust. These tracers were evaluated for rocks of the Combia Complex by **Jaramillo et al.** (2019) and suggested highly variable crustal depths between 14 and 51 km. Consistent with mineral chemistry and the absence of an Eu anomaly in the zircon REE trends (**Figures 2 and 4 A, B**), they also indicate that fractionation or emplacement occurred at intermediate to shallow crustal depths between 17-50 km (**Bissig et al.**, 2017; **Borrero & Toro-Toro**, 2016; **Jaramillo et al.**, 2019; **Weber et al.**, 2020). These findings suggest the evolution of mantle-derived magmas that underwent different degrees of crustal assimilation and fractionation at various depths within the crust (**Borrero & Toro-Toro**, 2016; **Jaramillo et al.**, 2019; **Weber et al.**, 2020).

These variations in crustal thickness are also reflected in the occurrence of garnet-bearing facies, which, together with adakite-like magmatism and mixtures of radiogenic and contaminated isotopic signatures, are indicative of a thicker continental crust. Furthermore, the preservation of primary magmatic garnet phases in volcanic rocks is often associated with fast and structurally controlled magmatic migration between deep and upper crustal levels (**Harangi et al.**, 2001). The high water content and calc-alkaline nature of mafic magmas suggest that they were generated by flux melting of the mantle in the presence of water in a subduction zone. Therefore, it is possible to relate the magmatic suites of the Combia Volcanic Complex to a thick continental crust that was locally extended by strike-slip tectonics and cut by deep-seated faults, which facilitated the emplacement of subduction-related juvenile magmas.

The Combia Complex was likely related to the formation subduction magmas that were emplaced during strike-slip extensional tectonics associated with the long-term evolution of the Amagá Basin in a regional pull-apart configuration (**Jaramillo et al.**, 2019; **Sierra et al.**, 2012). This tectonic scenario was already proposed by **Jaramillo et al.** (2019) and **Weber et al.** (2020).

Pliocene sedimentation inversion of the Amagá Basin and termination of vulcanism in the Combia Volcanic Complex

Most authors agree on the existence of a final Late Miocene to Pliocene exhumation phase in the Central Cordillera; the time of this event was well constrained by **Pérez-Congruera et al.** (2022) using fully reset AHe ages of ~7 Ma below the apatite partial retention zone. Moreover, geogenomic studies have shown that high-elevation palms colonized the northern segment of the Central Cordillera during the Pliocene (**Sanín et al.**, 2022). This deformation phase coincided with the deposition of the conglomeratic Santa Fe de Antioquia Formation after 4.8 Ma, which is characterized by a major Permo-Triassic population (60.2%), followed by a late Cretaceous to Eocene peak (30.1%) and a Miocene population (9.7%), with minor Precambrian peaks; this detrital signature shows higher affinity with the Central Cordillera than the Amagá Formation (**Figure 5**). These independent pieces of evidence suggest significant surface uplift in the Northern segment of the Central Cordillera between 7 and 3 Ma.

The available geochronological database shows that magmatism in the Amagá Basin was totally terminated at ~5.0 Ma (**Bissig et al.**, 2017; **Jaramillo et al.**, 2019; **Naranjo et al.**, 2018; **Santacruz et al.**, 2021), which together with the installation of the Pleistocene to a recent volcanic arc in the south of the Central Cordillera has been interpreted as the result of slab shallowing after 5 Ma at least north of the 5.5 °N (**Wagner et al.**, 2017 and references therein).

Conclusions

1. The provenance data compiled and presented in this contribution suggest that the Amagá Basin resulted from Oligocene to Pliocene sediment accumulation in an intermountain pull-apart basin between the Western and Central Cordilleras. The basin

history is directly related to the uplift phases of the bounding cordilleras. During the Oligocene, uplift in the Western Cordillera created space for intermountain sediment accumulation, while the Central Cordillera remained as a low and decaying positive relief. Subsequently, during the docking of the Panamá-Chocó Block, both cordilleras experienced further phases of uplift after 20 million years. However, the Western Cordillera underwent more intense exhumation, deformation, and uplift. During the Pliocene, both cordilleras experienced deformation, uplift, and exhumation.

2. The obtained crystallization parameters for the calc-alkaline andesite porphyries and pyroclastic facies of the Combia Volcanic System demonstrate that the porphyritic rocks found in the southernmost portion of the Amagá Basin were produced from a hydrous magma that experienced higher oxidizing (f_{O_2}) conditions in comparison to the coeval porphyries and pyroclastic rocks found in the northern region of the basin. These rocks were formed under moderate to lower magmatic oxidation conditions. The presence of magmas that were derived and fractionated under contrasting crustal architectures with varying degrees of crustal assimilation are interpreted as the products of a short-lived volcanic arc controlled by upper plate strike-slip tectonics
3. We highlight the Amagá Basin as an example of a strike-slip basin in a subduction orogen characterized by structurally controlled heterogeneous and discontinuous magmatism and multiple phases of uplift of the bounding tectonic blocks and a likely complex short-lived connection with the adjacent basins.

Supplementary material

See table 1S in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1871/3389>

See table 2S in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1871/3390>

See table 3S in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1871/3391>

See table 4S in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1871/3392>

Acknowledgments

We want to thank the colleagues from the EGEO and GROSSE groups for their field support and productive discussions; the Zirchron workers, for their help in mineral separation; Comfama and Pablo Aristizábal helped us to collect the data from the Cerro Tusa Project. We received an NSF EAR award (1925940) and a seed grant from the STRI-ASU collaborative initiative for the fieldwork and the analytical data of some of the samples.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no conflicts of interest that may in any way influence the transparency or objectivity of the peer review and publication process or financial conflicts resulting from employer-employee relationships, patents, fees, advisory, or research funding by companies.

Author contributions

SZ: Interpretation of the data, manuscript writing; JSJ: Data collection and interpretation, manuscript writing; GEB.: Data collection and interpretation, manuscript writing; AS.: Data interpretation, manuscript writing; LCCD: Data interpretation, manuscript writing; AC: Data collection and interpretation, manuscript writing; CT: Data collection, manuscript writing; VV: Data collection and analysis

References

- Alonso-Pérez, R., Müntener, O., Ulmer, P. (2009). Igneous garnet and amphibole fractionation in the roots of island arcs: Experimental constraints on andesitic liquids. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(4), 541-558. <https://doi.org/10.1007/s00410-008-0351-8>

- Bernet, M., Mesa-García, J., Chauvel, C., Ramírez-Londoño, M. J., Marín-Cerón, M. I.** (2020). Thermochronological, petrographic and geochemical characteristics of the Combia Formation, Amagá basin, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 104 (September), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102897>
- Bissig, T., Leal-Mejía, H., Stevens, R. B., Hart, C. J. R.** (2017). High Sr/Y magma petrogenesis and the link to porphyry mineralization as revealed by garnet-bearing I-type granodiorite porphyries of the middle Cauca Au-Cu belt, Colombia. *Economic Geology*, 112(3), 551-568. <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.3.551>
- Borrero, C., Toro-Toro, L. M.** (2016). Vulcanismo de afinidad adaquítica en el miembro inferior de la formación Combia (mioceno tardío) al sur de la subcuenca de Amaga, Noroccidente de Colombia. *Boletín de Geología*, 38(1), 87-100. <https://doi.org/10.18273/revbol.v38n1-2016005>
- Bouvier, A., Vervoort, J. D., Patchett, P. J.** (2008). The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1-2), 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.010>
- Bustamante, C., Archanjo, C. J., Cardona, A., Vervoort, J. D.** (2016). Late Jurassic to Early Cretaceous plutonism in the Colombian Andes: A record of long-term arc maturity. *Bulletin of the Geological Society of America*, 128(11-12), 1762-1779. <https://doi.org/10.1130/B31307.1>
- Cardona, A., León, S., Jaramillo, J. S., Montes, C., Valencia, V., Vanegas, J., Bustamante, C., Echeverri, S.** (2018). The Paleogene arcs of the northern Andes of Colombia and Panama: Insights on plate kinematic implications from new and existing geochemical, geochronological and isotopic data. *Tectonophysics*, 749(October), 88-103. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.10.032>
- Cardona, A., León, S., Jaramillo, J. S., Schmitt, A. K., Mejía, D., Arenas, J. C.** (2020). Cretaceous Record from a Mariana– to an Andean–Type Margin in the Central Cordillera of the Colombian Andes. In Gómez, J. & Pinilla–Pachon, A.O. *The Geology of Colombia* (Vol. 2), Servicio Geológico Colombiano.
- Chang, Z., Vervoort, J. D., McClelland, W. C., Knaack, C.** (2006). U-Pb dating of zircon by LA-ICP-MS. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(5), 1-14.
- Duque-Palacio, S., Seward, D., Restrepo-Moreno, S. A., García-Ramos, D.** (2021). Timing and rates of morpho-tectonic events in a segment of the Central and Western cordilleras of Colombia revealed through low-temperature thermochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 103085. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103085>
- Duque-Trujillo, J., Bustamante, C., Solari, L., Gómez-Mafla, Á., Toro-Villegas, G., Hoyos, S.** (2019). Reviewing the Antioquia batholith and satellite bodies: A record of Late Cretaceous to Eocene syn-to post-collisional arc magmatism in the central cordillera of Colombia. *Andean Geology*, 46(1), 82-101. <https://doi.org/10.5027/andgeov46n1-3120>
- Elkins, L. T., Grove, T. L.** (1990). Ternary feldspar experiments and thermodynamic models. *American Mineralogist*, 75(5-6), 544-559.
- Ferry, J. M. & Watson, E. B.** (2007). New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154 (4), 429-437. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0201-0>
- Fisher, C. M., Vervoort, J. D., Dufrane, S. A.** (2014). Accurate Hf isotope determinations of complex zircons using the “laser ablation split stream” method. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(1), 121-139. <https://doi.org/10.1002/2013GC004962>
- Grimes, C. B., Wooden, J. L., Cheadle, M. J., John, B. E.** (2015). “Fingerprinting” tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170(5-6), 1-26. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1199-3>
- Grosse, E.** (1926). El Terciario Carbonífero de Antioquia. In *Das Kohlentertiär Antioquias*, Verlag von Dietrich Reimer (Ernst Vohsen) (p. 361).
- Harangi, S., Downes, H., Kósa, L., Szabó, C. S., Thirlwall, M. F., Mason, P. R. D., Matthey, D.** (2001). Almandine garnet in calc-alkaline volcanic rocks of the Northern Pannonian Basin (Eastern-Central Europe): Geochemistry, petrogenesis and geodynamic implications. *Journal of Petrology*, 42(10), 1813-1844. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.10.1813>
- Jaramillo, J. S., Cardona, A., León, S., Valencia, V., Vinasco, C.** (2017). Geochemistry and geochronology from Cretaceous magmatic and sedimentary rocks at 6°35' N, western flank of the Central cordillera (Colombian Andes): Magmatic record of arc growth and collision. *Journal of South American Earth Sciences*, 76, 460-481. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.04.012>

- Jaramillo, J. S., Cardona, A., Monsalve, G., Valencia, V., León, S.** (2019). Petrogenesis of the late Miocene Combia volcanic complex, northwestern Colombian Andes: Tectonic implication of short term and compositionally heterogeneous arc magmatism. *Lithos*, 330-331, 194-210. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.02.017>
- Kerr, A. C., Tarney, J., Marriner, G. F., Nivia, A., Klaver, G. T. H., Saunders, A. D.** (1996). The geochemistry and tectonic setting of late Cretaceous Caribbean and Colombian volcanism. *Journal of South American Earth Sciences*, 9(1-2 SPEC. ISS.), 111-120. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(96\)00031-4](https://doi.org/10.1016/0895-9811(96)00031-4)
- Lara, M., Salazar-Franco, A. M., Silva-Tamayo, J. C.** (2018). Provenance of the Cenozoic siliciclastic intramontane Amagá Formation: Implications for the early Miocene collision between Central and South America. *Sedimentary Geology*, 373, 147-162. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.06.003>
- Leal-Mejía, H., Shaw, R. P., Melgarejo i Draper, J. C.** (2019). Spatial-temporal migration of granitoid magmatism and the Phanerozoic tectono-magmatic evolution of the Colombian Andes. In *Frontiers in Earth Sciences*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_5
- León, S., Cardona, A., Parra, M., Sobel, E. R., Jaramillo, J. S., Glodny, J., Valencia, V. A., Chew, D., Montes, C., Posada, G., Monsalve, G., Pardo-Trujillo, A.** (2018). Transition From Collisional to Subduction-Related Regimes: An Example From Neogene Panama-Nazca-South America Interactions. *Tectonics*, 37(1), 119-139. <https://doi.org/10.1002/2017TC004785>
- Luffi, P., Ducea, M. N.** (2022). Chemical Mohometry: Assessing Crustal Thickness of Ancient Orogens Using Geochemical and Isotopic Data. *Reviews of Geophysics*, 60(2), 1-42. <https://doi.org/10.1029/2021RG000753>
- Marín-Cerón, M. I., Leal-Mejía, H., Bernet, M., Mesa-García, J.** (2019). Late Cenozoic to modern-day volcanism in the Northern Andes: A geochronological, petrographical, and geochemical review. In *Frontiers in Earth Sciences* (Issue January). https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_8
- McDonough, W. F., Sun, S. S.** (1995). The composition of the Earth. *Chemical geology*, 120(3-4), 223-253.
- McKay, M. P., Jackson, W. T., Hessler, A. M.** (2018). Tectonic stress regime recorded by zircon Th/U. *Gondwana Research*, 57, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.01.004>
- Leal-Mejía, H., Shaw, R. P., Melgarejo i Draper, J. C.** (2019). Spatial-temporal migration of granitoid magmatism and the Phanerozoic tectono-magmatic evolution of the Colombian Andes. In Cedié, F., Shaw, R.P. (eds) *Geology and Tectonics of Northwestern South America*. *Frontiers in Earth Sciences*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_5
- Montes, C., Rodríguez-Corcho, A. F., Bayona, G., Hoyos, N., Zapata, S., Cardona, A.** (2019). Continental margin response to multiple arc-continent collisions: The northern Andes-Caribbean margin. *Earth-Science Reviews*, 198(April), 102903. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102903>
- Montes, C., Silva, C. A., Bayona, G. A., Villamil, R., Stiles, E., Rodríguez-Corcho, A. F., Beltrán-Triviño, A., Lamus, F., Muñoz-Granados, M. D., Pérez-Angel, L. C., Hoyos, N., Gómez, S., Galeano, J. J., Romero, E., Baquero, M., Cardenas-Rozo, A. L., von Quadt, A.** (2021). A Middle to Late Miocene Trans-Andean Portal: Geologic Record in the Tatacoa Desert. *Frontiers in Earth Science*, 8(January), 1-19. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.587022>
- Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Pardo, A., Silva - Tamayo, J. C., Valencia, V., Ayala, C., Pérez-Angel, L. C., Rodríguez-Parra, L., Ramírez, V., Niño, H.** (2015). Middle Miocene closure of the Central American Seaway. *Science*, 348(6231), 226-229.
- Mora, J. A., Oncken, O., Le Breton, E., Mora, A., Veloza, G., Vélez, V., de Freitas, M.** (2018). Controls on forearc basin formation and evolution: Insights from Oligocene to Recent tectono-stratigraphy of the Lower Magdalena Valley basin of northwest Colombia. *Marine and Petroleum Geology*, 97(June), 288-310. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.06.032>
- Mutch, E. J. F., Blundy, J. D., Tattitch, B. C., Cooper, F. J., Brooker, R. A.** (2016). An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171(10), 1-27. <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1298-9>
- Naranjo, A., Horner, J., Jahoda, R., Diamond, L. W., Castro, A., Uribe, A., Perez, C., Paz, H., Mejia, C., Weil, J.** (2018). La Colosa Au porphyry deposit, Colombia: Mineralization styles, structural controls, and age constraints. *Economic Geology*, 113(3), 553-578. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4562>

- Pardo-Trujillo, A., Cardona, A., Giraldo, A. S., León, S., Vallejo, D. F., Trejos-Tamayo, R., Plata, A., Ceballos, J., Echeverri, S., Barbosa-Espitia, A., Slattery, J., Salazar-Rios, A., Botello, G. E., Celis, S. A., Osorio-Granada, E., Giraldo-Villegas, C. A.** (2020). Sedimentary record of the Cretaceous–Paleocene arc–continent collision in the northwestern Colombian Andes: Insights from stratigraphic and provenance constraints. *Sedimentary Geology*, 401, 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2020.105627>
- Pérez-Consuegra, N., Hoke, G. D., Fitzgerald, P., Mora, A., Sobel, E. R., Glodny, J.** (2022). Late Miocene–Pliocene onset of fluvial incision of the Cauca River Canyon in the Northern Andes. *Bulletin of the Geological Society of America*, 134(9-10), 2453-2468. <https://doi.org/10.1130/B36047.1>
- Piedrahita, V. A., Bernet, M., Chadima, M., Sierra, G. M., Marín-Cerón, M. I., Toro, G. E.** (2017). Detrital zircon fission-track thermochronology and magnetic fabric of the Amagá Formation (Colombia): Intracontinental deformation and exhumation events in the northwestern Andes. *Sedimentary Geology*, 356, 26-42. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.05.003>
- Ramírez, D., López, A., Sierra, G., Toro, G.** (2006). Edad y proveniencia de las rocas volcánico sedimentarias de la formación Combia en el suroccidente antioqueño - Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 0(19), 09-26.
- Restrepo-Moreno, S. A., Foster, D. A., Stockli, D. F., Parra-Sánchez, L. N.** (2009). Long-term erosion and exhumation of the “Altiplano Antioqueño”, Northern Andes (Colombia) from apatite (U-Th)/He thermochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 278 (1-2), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.09.037>
- Ridolfi, F.** (2021). Amp-tb2: An updated model for calcic amphibole thermobarometry. *Minerals*, 11(3), 1-9. <https://doi.org/10.3390/min11030324>
- Rodríguez, G., Zapata, G.** (2014). Denominada andesitas basálticas de El Morito - Correlación regional con eventos magmáticos de arco. *Boletín de Geología*, 36, 85-102.
- Sanín, M. J., Mejía-Franco, F. G., Paris, M., Valencia-Montoya, W. A., Salamin, N., Kessler, M., Olivares, I., Jaramillo, J. S., Cardona, A.** (2022). Geogenomics of montane palms points to Miocene–Pliocene Andean segmentation related to strike-slip tectonics. *Journal of Biogeography*, 49(9), 1711-1725. <https://doi.org/10.1111/jbi.14327>
- Santacruz, L., Redwood, S. D., Cecchi, A., Matteini, M., Botelho, N. F., Ceballos, J., Starling, T., Molano, J. C.** (2021). The age and petrogenesis of reduced to weakly oxidized porphyry intrusions at the Marmato gold deposit, Colombia. *Ore Geology Reviews*, 131(December 2020), 103953. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103953>
- Sierra, G. M., Marín-Cerón, M. I., MacDonald, W. D.** (2012). Evolución tectónica de la cuenca de tracción Irrá. Evidencias de cambios en el movimiento de rumbo de la zona de falla de Romeral, zona norte de la Cordillera central de los Andes, Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 32, 143-159. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169525406013>
- Sierra, G. M., Silva-Tamayo, J. C., Correa, L. G.** (2003). Estratigrafía secuencias de la Formación Amagá. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 15, 9-22.
- Sierra, G. M., Marín-Cerón, M. I.** (2011). Petroleum geology of Colombia: Amagá, Cauca and Patía basins. *Agencia Nacional de Hidrocarburos*, 2, 25-38.
- Silva-Tamayo, J. C., Lara, M., Salazar-Franco, A. M.** (2020). Oligocene – Miocene Coal–Bearing Successions of the Amagá Formation, Antioquia, Colombia: Sedimentary Environments, Stratigraphy, and Tectonic Implications. *The Geology of Colombia*, Chapter 11, Servicio Geológico Colombiano.
- Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W., Beate, B.** (2015). The geological history of northwestern South America: From Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290-75 Ma). *Gondwana Research*, 27(1), 95-139. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.06.004>
- Suter, F., Sartori, M., Neuwerth, R., Gorin, G.** (2008). Structural imprints at the front of the Chocó-Panamá indenter: Field data from the North Cauca Valley Basin, Central Colombia. *Tectonophysics*, 460(1-4), 134-157. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.07.015>
- Tassinari, C. C. G., Pinzón, F. D., Buena Ventura, J.** (2008). Age and sources of gold mineralization in the Marmato mining district, NW Colombia: A Miocene–Pliocene epizonal gold deposit. *Ore Geology Reviews*, 33(3-4), 505-518. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.03.002>
- Vargas, C. A., Mann, P.** (2013). Tearing and breaking off of subducted slabs as the result of collision of the Panama arc-indenter with Northwestern South America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(3), 2025-2046. <https://doi.org/10.1785/0120120328>

- Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W., Beltrán, A.** (2011). Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia. *Lithos*, 125(3-4), 875-896. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.003>
- Wagner, L. S., Jaramillo, J. S., Ramírez-Hoyos, L. F., Monsalve, G., Cardona, A., Becker, T. W.** (2017). Transient slab flattening beneath Colombia. *Geophysical Research Letters*, 44(13), 6616-6623. <https://doi.org/10.1002/2017GL073981>
- Weber, M., Duque, J., Hoyos, S., Cárdenas-Rozo, A., Gómez-Tapias, J., Wilson, R.** (2020). The Combia Volcanic Province: Miocene Post-Collisional Magmatism in the Northern Andes. *Geology of Colombia*, 3(November), 161-172. <https://doi.org/10.1201/9780203498743-15>
- Yuan, C., Sun, M., Xiao, W., Wilde, S., Li, X., Liu, X., Long, X., Xia, X., Ye, K., Li, J.** (2009). Garnet-bearing tonalitic porphyry from East Kunlun, Northeast Tibetan Plateau: Implications for adakite and magmas from the MASH Zone. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6), 1489-1510. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0335-y>
- Zapata-Villada, J. P., Cardona, A., Serna, S., Rodríguez, G.** (2021). Late Cretaceous to Paleocene magmatic record of the transition between collision and subduction in the Western and Central Cordillera of northern Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 112(P1), 103557. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103557>
- Zapata, S., Patiño, A., Cardona, A., Parra, M., Valencia, V., Reiners, P., Oboh-Ikuenobe, F., Genezini, F.** (2020). Bedrock and detrital zircon thermochronology to unravel exhumation histories of accreted tectonic blocks: An example from the Western Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 103(April), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102715>
- Zapata, S., Zapata-Henao, M., Cardona, A., Jaramillo, C., Silvestro, D., Oboh-Ikuenobe, F.** (2021). Long-term topographic growth and decay constrained by 3D thermo-kinematic modeling: Tectonic evolution of the Antioquia Altiplano, Northern Andes. *Global and Planetary Change*, 203(May), 103553. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103553>
- Zapata, S., Calderón-Díaz, L., Jaramillo, C., Oboh-Ikuenobe, F., Piedrahíta, J. C., Rodríguez-Cuevas, M., Cardona, A., Sobel, E. R., Parra, M., Valencia, V., Patiño, A., Jaramillo-Ríos, J. S., Flores, M., Glodny, J.** (2023). Drainage and sedimentary response of the Northern Andes and the Pebas system to Miocene strike-slip tectonics: A source to sink study of the Magdalena Basin. *Basin Research*, 00, 1-44. <https://doi.org/10.1111/br.12769>

Original article

Eocene to Miocene palynology of the Amagá Basin (Cauca Valley, Colombia) compared to the Caribbean Region

Palinología del Eoceno al Mioceno de la cuenca de Amagá (Valle del Cauca, Colombia) comparada con la Región Caribe

✉ Andrés Pardo-Trujillo^{1,2,*}, ✉ Angelo Plata-Torres^{2,3}, ✉ Edwin Ramírez^{2,4},
✉ Felipe Vallejo-Hincapié^{2,3}, ✉ Raúl Trejos-Tamayo^{2,3}

¹Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

²Instituto de Investigaciones en Estratigrafía (IIES), Grupo de Investigaciones en Estratigrafía y Vulcanología (GIEV-Cumanday, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia)

³Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, Salamanca, España

⁴Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), CCT-CONICET Mendoza, Mendoza, Argentina

Abstract

The Cenozoic sedimentary basins of northwestern Colombia contain clues to understanding the evolution of past ecosystems and their possible relationship to regional events, such as the uplift of the northern Andes and the collision of the Panama-Chocó Block with the South American continent. However, these basins have not been thoroughly investigated. This work aims to fill this knowledge gap by performing a comprehensive palynological analysis of the Amagá Basin (Valle del Cauca). Three outcrops were studied to determine their depositional ages, paleoenvironments, and overall floral composition over time. To contextualize our analyses, a comparison was made with two drill holes (ANH-SSJ-Nueva Esperanza-1X and ANH-San Jacinto-1) in the Sinú-San Jacinto Basin in the Colombian Caribbean. The application of the palynological zonation from the Llanos Basin in eastern Colombia was also used to evaluate its suitability in the Amagá Basin. The age of deposition was determined by using several traditional palynostratigraphic markers, including *Perisyncolporites pokornyi*, *Foveotriporites hammeni*, *Retibrevitricolporites speciosus*, *Magnastriatites grandiosus*, *Concavissimisporites fossulatus*, *Clavinaaperturites microclavatus*, and *Polyodiaceoisporites pseudopsilatus*. This assemblage indicates a Middle to Late Eocene, Oligocene, and Miocene age spanning from ~40 to 18 Ma (~22 Myr). However, there are also some differences with respect to the Llanos zonation, such as the absence of *Cicatricosisporites dorogensis*. Based on this age model, we question whether it is correct to include all these deposits in a single lithostratigraphic unit under the rank of a formation.

In the Caribbean, stratigraphic units of similar age exhibit a greater number of key taxa than in the Llanos zonation. In addition, the presence of calcareous microfossils allows for a more detailed determination of the sedimentation age. Furthermore, the discovery of new pollen and spore species could improve the resolution of the biostratigraphy in western Colombia. In the Amagá Basin, only terrestrial palynomorphs were found, which, together with the sedimentary facies, suggest a humid lowland tropical vegetation in fluvial and lacustrine environments.

Keywords: Palynology; Palynostratigraphy; Amagá Basin; Caribbean, Eocene; Oligocene; Miocene.

Resumen

Las cuencas sedimentarias cenozoicas del noroeste de Colombia contienen pistas para comprender la evolución de los ecosistemas del pasado y su posible relación con acontecimientos regionales tales como el levantamiento de los Andes septentrionales y la colisión del bloque Panamá-Chocó con el continente suramericano. Sin embargo, estas cuencas no se han investigado a fondo. Este trabajo pretende llenar este vacío de conocimiento realizando un análisis palinológico exhaustivo de la cuenca de Amagá (Valle del Cauca). Se estudiaron tres afloramientos para determinar sus edades de depósito, paleoambientes y composición florística general a lo largo del tiempo. Además,

Citation: Pardo-Trujillo A, Plata-Torres A, Ramírez E, *et al.* Eocene to Miocene palynology of the Amagá Basin (Cauca Valley, Colombia) compared to the Caribbean Region. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185):925-942, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1921>

Guest editor: Carlos Jaramillo

***Corresponding autor:**
Andrés Pardo-Trujillo;
andres.pardo@ucaldas.edu.co

Received: May 11, 2023

Accepted: July 7, 2023

Published on line: August 15, 2023



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

se comparó con dos sondeos (ANH-SSJ-Nueva Esperanza-1X y ANH-San Jacinto-1) perforados en la cuenca del Sinú-San Jacinto en el Caribe colombiano y se utilizó la zonación palinológica de la cuenca de los Llanos en el oriente colombiano para evaluar su aplicación en la cuenca de Amagá. La edad de depositación fue determinada usando varios marcadores palinoestratigráficos tradicionales, entre ellos *Perisyncolporites pokornyi*, *Foveotriporites hammeni*, *Retibrevitricolporites speciosus*, *Magnastriatites grandiosus*, *Concavissimisporites fossulatus*, *Clavainaperturites microclavatus*, y *Polypodiaceoisporites pseudopsilatus*. Esta asociación indica una edad comprendida entre el Eoceno Medio a Tardío, el Oligoceno y el Mioceno, abarcando de ~40 a 18 Ma (~22 Myr). Sin embargo, también existen algunas diferencias con respecto a la zonación de los Llanos, como la ausencia de *Cicatricosisporites dorogensis*. Con base en este modelo de edad, cuestionamos si es correcto incluir todos estos depósitos en una única unidad litoestratigráfica bajo el rango de formación. En el Caribe, las unidades estratigráficas de edad similar exhiben un mayor número de taxones clave de la zonación de los Llanos. Además, la presencia de microfósiles calcáreos permite una determinación más detallada de la edad de sedimentación. Por otra parte, el descubrimiento de nuevas especies de polen y esporas podría mejorar la resolución de la bioestratigrafía en el oeste de Colombia. En la cuenca del Amagá, sólo se hallaron palinomorfos terrestres, los cuales, junto con las facies sedimentarias, sugieren una vegetación tropical húmeda de tierras bajas en ambientes fluviales y lacustres.

Palabras claves: Palinología; Palinoestratigrafía; Cuenca de Amagá; Caribe colombiano; Eoceno; Oligoceno; Mioceno.

Introduction

During the Cenozoic, regional geological events occurred in the northwestern region of Colombia, such as the uplift of the Central and Western cordilleras and the collision of the Panama-Chocó Block against the Southamerican Plate (**Restrepo & Toussaint**, 1990; **Duque-Caro**, 1990; **Coates *et al.***, 1992; **Montes *et al.***, 2012). To understand these events, it is fundamental to study the sedimentary deposits from adjacent basins, such as the northern region of the Cauca River Valley and the Colombian Caribbean (**Figure 1**) (**Gómez *et al.***, 2007). Studying changes within the sedimentary record and its fossils can provide valuable insights into establishing a chronological framework for identifying tectonic and climatic variations over time. In these deposits, pollen, spores, and, occasionally, marine microfossils are the most common fossils present and have been studied in recent years (**Dueñas**, 1980; **Ramírez-Pinilla**, 2015; **Celis *et al.***, 2023). Regional studies have shown that during the Oligocene-Early Miocene, the Amagá Basin was dominated by fluvial environments (**Silva-Tamayo *et al.***, 2008), with the coastline located in the southern sector where what is now the Caribbean (**Celis *et al.***, 2023) and nearshore settings transitioned to open marine environments in further north areas. Here we present a synthesis of stratigraphic and palynological studies done in the Amagá Basin and the San Jacinto Fold Belt, where the University of Caldas-Minciencias and the National Hydrocarbons Agency (ANH, after its Spanish acronym) have conducted borehole and outcrop studies covering the Eocene-Miocene interval. This allowed us to make a regional comparison of palynological associations among these basins to recognize taxa useful for biostratigraphy. In the Caribbean sections, the presence of calcareous microfossils (foraminifers and calcareous nannofossils), with better-calibrated bioevents, helped us to build an independent chronostratigraphic framework, which was used to tie up the palynological record. Additionally, we assessed the suitability and effectiveness of the palynological zonation of eastern Colombia (**Jaramillo *et al.***, 2011) in the northwestern region.

The Amagá Basin is located between the Central and Western cordilleras (**Figure 1**), and it is bounded to the east and west by the Romeral and Cauca fault systems, respectively. It consists of a siliciclastic sedimentary fill that rests on an igneous-metamorphic basement (**Barrero *et al.***, 2007) and is unconformably overlain by volcanic-sedimentary deposits of the Combia Formation (**Bernet *et al.***, 2020). The siliciclastic unit was named the Carboniferous Tertiary of Antioquia by **Grosse** (1926), the Antioquia Formation by **Van der Hammen** (1958), and the Amagá Formation by **González** (1980). **Grosse** (1926) divided it into three intervals. The lower interval corresponds to a 200 m thick sequence of conglomerates and sandstones interbedded with some claystones. The middle interval,

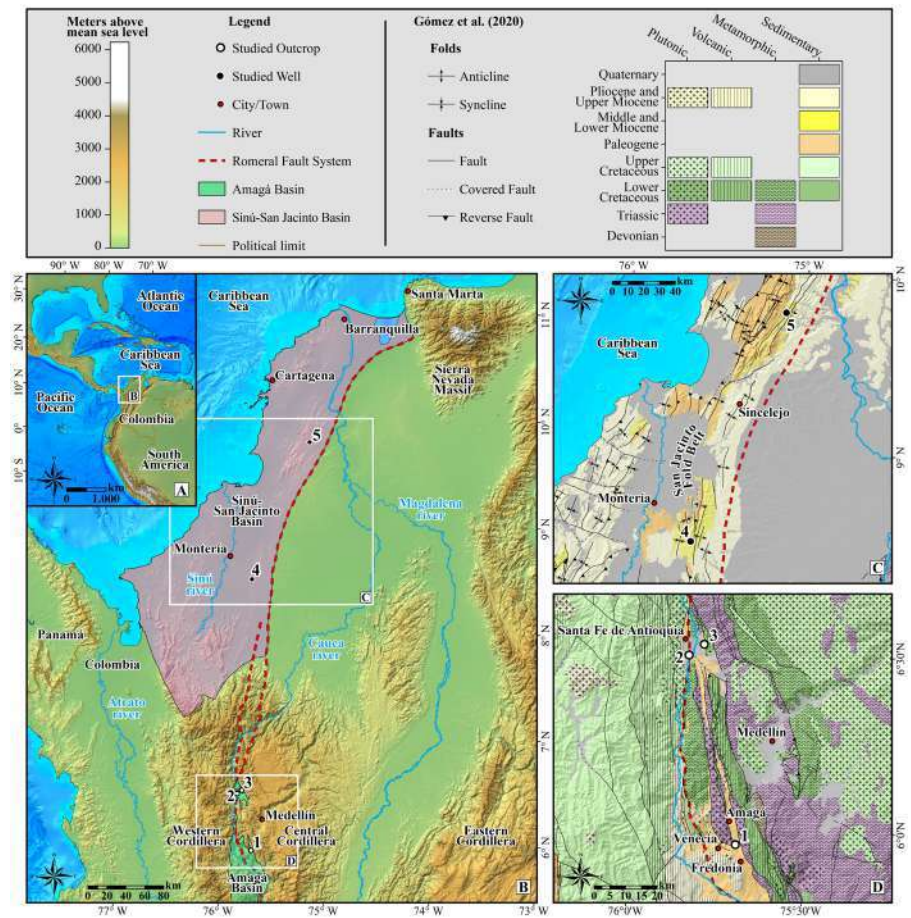


Figure 1. A. Map of northern South America, Central America, and the Caribbean indicating the study area. B. Map of northwest Colombia showing the locations of the Amagá and Sinú-San Jacinto basins and the outcrops and wells studied. C. Geology of the San Jacinto Fold Belt and location of the studied wells. D. Geology of the Amagá area and its surroundings. 1. La Sucia Creek; 2. Puente Santa Fé; 3. La Nuarque Creek; 4. ANH-SSJ-Nueva Esperanza-1X well; 5. ANH-San Jacinto-1 well

200-250 m thick, consists mainly of sandstones and mudstones with some coal beds. In the upper interval, a sequence of ~1000 m of sandstones alternates with claystones (De Porta, 1974). The unit is named after the city of Amagá, where the type locality was defined (González, 2001). Based on palynological evidence, different ages have been proposed for this unit: late Oligocene-Early Miocene (Zegarra, 1993; Van der Hammen, 1958), late Eocene-Oligocene (Schuler & Doubinger, 1970), and late Paleocene-Eocene (Escobar, 1990). However, no microfossil distribution diagrams have been published to justify the proposed ages. In addition, sedimentological and paleontological evidence has led some authors to suggest that the unit accumulated in fluvial environments (Guzmán & Sierra, 1984; Guzmán, 1991), while others have suggested a local marine influence (Escobar, 1983; Escobar, 1990; Blandón, 2007).

In the Caribbean, ANH has conducted several stratigraphic drillings in the Sinú-San Jacinto Basin, particularly in the San Jacinto Fold Belt (SJFB). The Universidad de Caldas has studied the stratigraphical and micropaleontological records from these wells to understand the origin and age of the deposits. The SJFB is currently a low-lying mountain range oriented N20°E. It has been affected by subduction, collision, and transpression of the Caribbean oceanic plate and associated oceanic arcs, including the Panamá-Chocó Block, against the South American continental Plate (Pindell & Kennan, 2009; Farris et

al., 2011; **Montes *et al.***, 2015; **Vallejo-Hicapié *et al.***, 2023). It is composed of terrigenous and calcareous sedimentary rocks that span the Late Cretaceous to the Pliocene, although they exhibit regional unconformities (**Flinch**, 2003; **Guzmán *et al.***, 2004; **Cardona *et al.***, 2012; **Gómez *et al.***, 2015). From the Oligocene to the Recent, they were formed in a forearc basin controlled by a low-angle subduction of the Caribbean plate beneath the South American Plate (**Mantilla-Pimiento *et al.***, 2009; **Bernal-Olaya *et al.***, 2015; **Mora *et al.***, 2018; **Osorio-Granada *et al.***, 2020). Two drill holes were analyzed, the ANH-SSJ-Nueva Esperanza-1X and the ANH-San Jacinto-1X, which span the Eocene-Miocene and Eocene-Oligocene intervals, respectively.

The ANH-SSJ-Nueva Esperanza-1X well has a depth of 2265 ft (690 m) and can be divided into three intervals. Interval 1 (2265-1980 ft; 690-604 m) consists mainly of coarse to very coarse beds of poorly to moderately sorted, laminated, or massive sandstones ranging from fine to very coarse-grained and occasionally conglomeratic. Dark gray mudstones with parallel lamination and polymictic conglomerates are less common. Interval 2 (1980-575 ft; 604-175 m) consists mainly of beds of laminated sandstones and mudstones forming coarsening-upward sequences up to 30 meters thick, locally with coal beds. Mollusks and charred logs are present in some beds and pollen, and spores have been recovered from mudstones. To a lesser extent, dinoflagellates, foraminifers, and calcareous nannofossils have also been found. Bioturbation is very common. Interval 3 (575-0 ft; 175-0 m) consists of medium to very thick beds of fine- to coarse-grained sandstones, occasionally conglomeratic, massive, or laminated, locally bioturbated and/or fossiliferous (mollusks and charred logs), interbedded with medium to thick beds of massive or laminated mudstones, locally bioturbated (rhizolites, *Thalassinoides*) or with mollusk shells. Coal beds are less common. The mudstone beds yielded mainly terrestrial palynomorphs and, to a lesser extent, dinoflagellates. Foraminifers (planktonic and benthic) and calcareous nannofossils are present in some beds (**UCaldas – ANH**, 2020).

The ANH-San Jacinto-1 well drilled 1725 ft (~526 m) of fine-grained sedimentary rocks in the SJFB (**Figure 1**) that can be divided into three intervals (**UCaldas – ANH**, 2020). Interval 1 (1725-1500 ft; 526-457 m) consists of up to 30 cm thick beds of sandy and glauconitic packstones-grainstones that grade to mudstones or marls. Muddy intraclasts and erosion marks are common. Interval 2 (1500-400 ft; 457-122 m) consists of black to gray bioturbated mudrocks parallel laminated or massive, rich in calcareous microfossils, mollusks, charred wood, and fish remains. Occasionally they are interbedded with mudstones and marls. Interval 3 (400-0 ft; 122-0 m) consists mainly of black and yellowish-brown marls, structureless or with parallel lamination, locally bioturbated (**UCaldas – ANH**, 2020).

Materials and methods

We studied two stratigraphic sections located between the towns of Santa Fé de Antioquia and San Jerónimo in the northern part of the Amagá Basin, which correspond to the Amagá Formation (**Figure 1D**). From base to top, they correspond to Puente Santa Fé (coordinates: initial point 6.511607, -75.817259; final point 6.511303, -75.814422), and Quebrada La Nuarque (initial point 6.540519, -75.777726; final point ~6.541149, -75.772351). The sections were surveyed using an open polygonal method with a tape measure, a compass, and Jacob's staff. Geometry, lithology (texture and composition), sedimentary structures, and fossils were systematically described in the outcrops (**Selley**, 1985). Fifty samples were collected for the palynological study. In addition, the palynological record of La Sucia Creek, near the Palomos Mine (**Sánchez**, 2005), was integrated to build an extended composite section (**Figure 1**), and the palynological data were compared with those from the ANH-SSJ-Nueva Esperanza-1X and ANH-San Jacinto-1 stratigraphic wells drilled in the Colombian Caribbean (**Figure 1**).

Sample preparation was carried out at the Instituto de Investigaciones en Estratigrafía (IIES) at Universidad de Caldas using a standard procedure for paleopalynological samples (**Traverse**, 2007). Approximately 10 to 20 g of rock were collected, cleaned, and

crushed until 1-2 mm fragments were obtained. Carbonates were then removed with 50 ml of 37% hydrochloric acid (HCl) and silicates with 70% hydrofluoric acid (HF), followed by washing and filtration through 100 μm and 10 μm mesh. The samples were placed in an ultrasonic bath for about 1 minute to remove any remaining minerals. Then, 10% KOH was added to remove humic acids; the mixture was then centrifuged to concentrate the organic residue, and the non-oxidized organic matter was spread on a coverslip with polyvinyl alcohol. Some of the recovered organic matter was removed and oxidized with 65% nitric acid (HNO_3), and humic acids were removed with 5% ammonium hydroxide (NH_4OH). The mixture was then filtered through a 10 μm mesh, and the oxidized film was mounted on a coverslip and fixed to a slide with Canada balsam.

A Nikon 80i transmitted light microscope with 40x and 100x objectives was used to identify, count, and, in some cases, describe the palynomorphs. The identified morphospecies were photographed using a Nikon digital camera and the NIS-Elements F software. Identification of the palynomorphs followed several regional publications (**Regali *et al.*, 1974; Germeraad *et al.*, 1968; Lorente, 1986; Muller *et al.*, 1987; Hoorn, 1993; Jaramillo & Dilcher, 2001; Plata-Torres *et al.*, 2023**), as well as the morphological database of **Jaramillo & Rueda (2023)**, which contains the description of all the palynomorphs published for northern South America.

For the biostratigraphic analysis, all palynomorphs on the oxidized slab were systematically counted up to 300 palynomorphs per sample, when possible. The abundance and stratigraphic distribution of the biostratigraphic markers were then analyzed and compared with the associations described in the palynological zonation proposed by **Jaramillo *et al.* (2011)** for eastern Colombia (Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Magdalena Valley). This zonation has the advantage that some stratigraphic levels have been independently calibrated to the international stratigraphic time scale using carbon isotopes, magnetostratigraphy, and foraminifera. Other regional zonations were also reviewed (e.g., **Gonzalez-Guzmán, 1967; Dueñas-Jiménez, 1986**).

For the paleovegetation analysis, the palynomorphs were grouped into five categories: Angiosperms (excluding palms), Palms, Ferns (including pteridophytes and bryophytes), Algae, and Fungi. The relative proportions of these palynomorphs along the stratigraphic sequence are presented in pollen diagrams generated by the Tilia 2.0 software. Information on the ecological preferences and paleoenvironmental significance was obtained from the existing literature (e.g., **Marchant *et al.*, 2002**). The abundance of palynomorphs in the slides was defined as follows: 1) Low: < 100 palynomorphs per slide; 2) moderate: between 100 and 200; 3) high: greater than 200. The terms poorly, moderately, and well-preserved were used to indicate the preservation of the microfossils. The abbreviations FAD (First Appearance Datum) and LAD (Last Appearance Datum) are commonly used to refer to the first or last appearance of a species in the stratigraphic record.

Results

Description of the sampled sections of the Amagá Basin

In the northernmost part of the Amagá Basin, the Amagá Formation is faulted and folded, requiring the study of discrete segments to construct a composite section of the entire unit. The lower part of the unit can be observed near the town of San Nicolás, where it rests on a Paleozoic-Mesozoic igneous and metamorphic basement. It comprises thick amalgamated lenticular beds of lithic sandstones and conglomerates, with crossbedding, shale intraclasts, and calcareous concretions. There are also some thin lenticular beds of siltstones and mudstones with poorly preserved plant remains. Unfortunately, some palynological samples analyzed in this interval are sterile in palynomorphs. The Puente Santa Fé section overlays the previous sequence. Nowadays, the described outcrops have been practically destroyed due to the construction of a highway. It is a succession of 240 m thick composed of fining-upward sequences of conglomeratic sandstones, coarse to fine-grained sandstones, and siltstones. Some coal seams (< 1 m) can be seen in the upper part of some of these

sequences. Planar and trough cross-bedding are common in the sandstones (**Figure 2A**). The organic shales and coal beds contain pollen, spores, and well-preserved plant remains, locally rizoliths. Fine-grained sandstones and organic-rich mudstones are also common in this part. A sequence of lithic conglomerates and sandstones is seen in the upper part of this interval, followed by a fining upward sequence (2-3 m thick) of trough crossbedded coarse quartz sandstones, fine sandstones, and variegated sandy siltstones. The sequences become thicker and coarser in the upper part of this interval (**Figure 2A**).

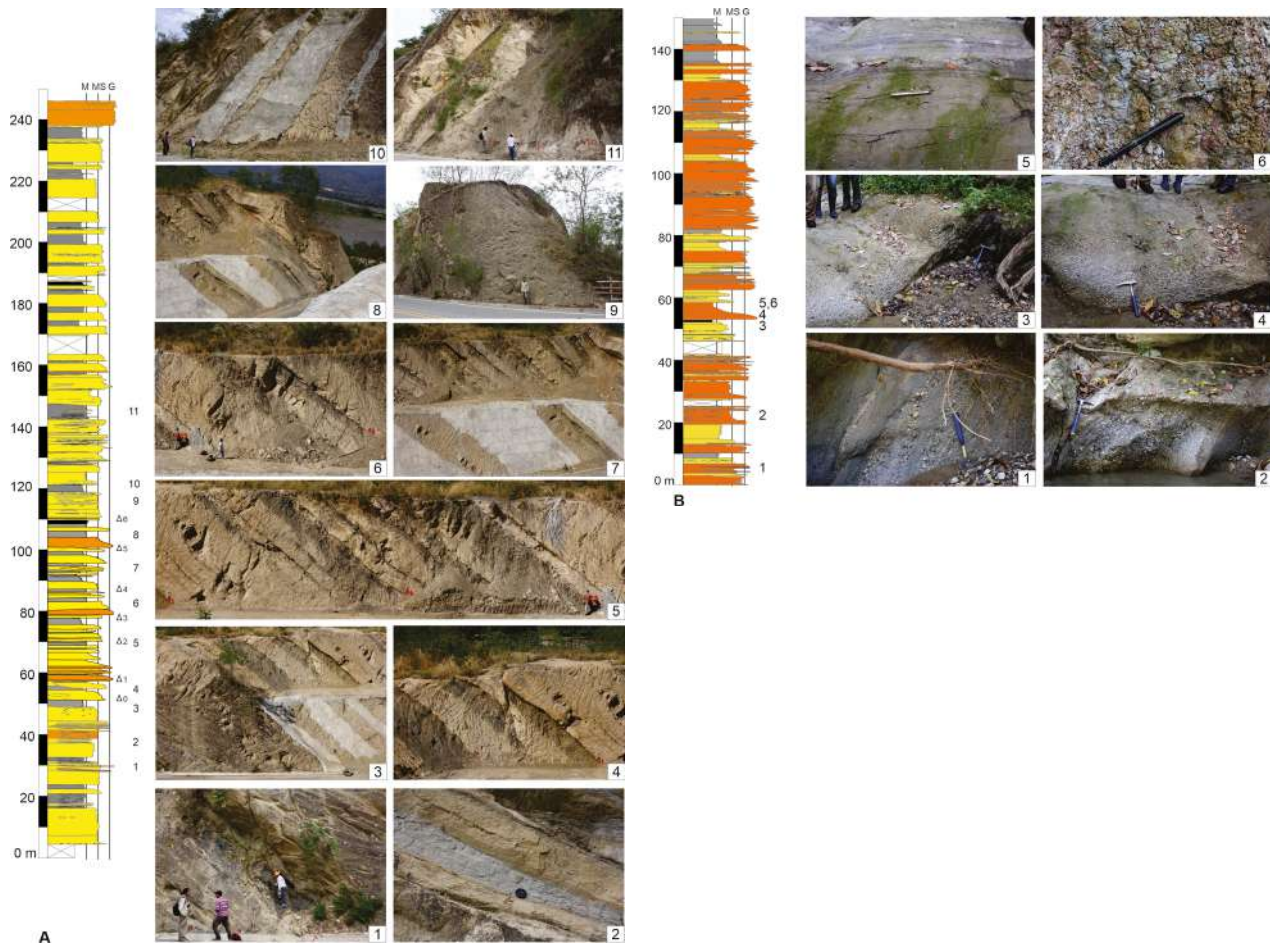


Figure 2. A. Sedimentological characteristics of the Puente Santa Fé section (The numbers indicated in the stratigraphic column correspond to the numbers of the photos). 1. Laminated sandstone and conglomeratic sandstone beds that gradually change to carbonaceous gray siltstones and coal, followed by a succession of crossbedded coarse sandstones and conglomeratic sandstones. 2. Detail of fine-grained sandstone beds with low angle cross-bedding. 3. Left, coarse to very coarse sandstones with crossbedded conglomeratic beds and calcareous concretions grading to gray sandy mudstones. From delta 0 there are increasing sequences of coarse sandstones with crossbedding (sets of 10 cm thick), grading to greenish-gray and black mudstones with plant remains. 4. Detail of two fining upward sequences affected by a normal fault. 5. Succession of sandstones and mudstones forming fining upward sequences. Note the irregular surfaces and lenticular geometry of some beds. Some of the mudstones contain rizoliths, well-preserved plant remains, and thin coal beds at the top. 6, 7, and 8. Succession of coarse to fine-grained sandstones with crossbedding at different scales, green and gray mudstones, and coal with plant remains. 9. Coarse-grained sandstone beds with cross bedding and calcareous concretions gradually changing towards the top to gray mudstones whose upper part is coal. 10. Fine to coarse-grained sandstones interbedded with coal-bearing mudstones (partly covered by industrial cement). 11. Right: Layers of greenish-gray siltstones with plant debris overlain by thick, lenticular, coarse- to medium-grained sandstone beds. **B.** Sedimentological characteristics of the La Nuarque Creek section. 1. Medium to very coarse-grained sandstones interbedded with conglomerates of granules and pebbles with cross bedding. 2. Granule conglomerates interbedded with sandstones. Note the orientation of the fragments parallel to the stratification. 3. A layer of carbonaceous mudstone and coal overlain by a layer of pebble conglomerate. 4. Pebble conglomerate gradually changing to very coarse to fine-grained sandstones. 5. Medium- to fine-grained sandstone with discontinuous wavy lamination, marked by carbonized plant debris. 6. Variegated mudstones. M: mud; MS: medium sand; G: gravel (granule)

The La Sucia Creek section consists of thin to very thick beds of mudstones rich in organic matter and plant remains interbedded with some coal beds. There are also medium to thick beds of sandstones with planar lamination and crossbedding at various scales. Sandstones and mudstones often form fining upward sequences. The La Nuarque Creek section has ~150 m in thickness; it is located in the northeastern part of the basin (**Figures 1 and 2B**). The base of the section is covered by Quaternary sediments and the top is in faulted contact with the Cretaceous volcanic rocks of the Quebradagrande Complex (**Gómez et al., 2020**) (**Figure 1**). It is composed of fining upward sequences (~ 6 m thick) of conglomerates, crossbedded sandstones, and green, mostly variegated, siltstones (**Figure 2B**). Calcareous concretions and thin coal beds are also observed. The upper part of the succession is mainly coarse-grained, consisting of amalgamated lenticular beds of clast-supported conglomerates and sandstones (**Figure 2B**). Thin beds of gray and black siltstones and claystones are locally present and large charred woody debris and poorly preserved leaves are common.

Palynology

In the three sections studied in the Amagá Basin, a total of 6861 palynomorphs were recorded, distributed in 127 morphotypes, of which 84 correspond to angiosperms, including palms, two gymnosperms (e.g., *Podocarpidites*), 40 fern morphotypes, one alga (*Chomotriletes minor*), and one fungus (**Table 1s**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1921/3402>). Most samples in the Puente Santa Fè section have moderate to high recovery and good preservation of palynomorphs. Within the palynological assemblage, we recognized *Corsinipollenites* sp., *Foveotriporites hammeni*, *Gemmamonocolpites perfectus*, *Mauritiidites franciscoi*, *Perisyncolporites pokornyi*, *Psilastephanocoporites fissilis*, *Retistephanoporites crassiannulatus*, *Spirosyncolpites spiralis*, *Striatopollis catatumbus*, and *Tetracolporopollenites transversalis*, and the spores *Foveotriletes concavoides*, *Polypodiisporites* sp., *Psilatriteles* sp., and *Verrutriteles* sp. Freshwater algae of the *Concentricystes* type (*Chomotriletes minor*) and fungi were abundant in some samples (**Table 1s**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1921/3402>).

In the Quebrada La Sucia section, of the 25 samples processed, 11 showed good recovery of palynomorphs. As for pollen, *Cyclusphaera scabrata*, *Mauritiidites franciscoi*, *Perisyncolporites pokornyi*, *Ranunculacidites operculatus*, *Striatopollis catatumbus*, *Tetracolporopollenites transversalis*, among others, were recognized. We highlight the presence of spores of *Magnastriatites grandiosus*, *Foveotriletes ornatus*, and abundant *Psilatriteles* sp., as well as fungal remains (**Table 1s**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1921/3402>).

In the Quebrada La Nuarque section, the palynomorph content is low towards the base and ~110 m. High recoveries are found between 50 to 60 m and 80 to 130 m. Among the pollen, *Clavainaperturites microclavatus*, *Crassiectoapertites columbianus*, *Mauritiidites franciscoi*, *Perisyncolporites pokornyi*, *Retistephanoporites crassiannulatus*, *Striatopollis catatumbus*, *Tetracolporopollenites maculosus*, *Tetracolporopollenites transversalis* were identified. This section presents the greatest diversity of pteridophyte spores, including, among others, *Concavissimisporites fossulatus*, *Kuylisporites waterbolckii*, *Foveotriletes ornatus*, *Polypodiisporites usmensis*, *Polypodiaceiosporites pseudopsilatus*, *Psilatriteles peruanus*, *Retitritele sommeri*, and *Verrucatotriteles* aff. *bullatus*, which are associated with abundant freshwater algae (*Chomotriletes minor*) and fungal remains (**Table 1s**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1921/3402>).

For the ANH-SSJ-Nueva Esperanza-1X well, 72 palynological samples were prepared and distributed between ~17' and 2265 ft (5-690 m). A total of 9557 palynomorphs were examined distributed in 309 morphotypes, 236 angiosperm morphotypes (of which 10 correspond to palms and 3 to mangroves), 55 spores (including ferns and bryophytes), three fungi, and 17 marines (dinoflagellate cysts, marine algae, organic foraminiferal linings, and scolecodonts). Preservation is good and abundance ranges from poor to very

abundant. Among the spores, we found *Cicatricosisporites dorogensis*, *Echinatisporis brevispinosus*, *Echinatisporis muelleri*, *Foveotriletes ornatus*, *Magnastriatites grandiosus*, *Nijssenosporites fossulatus*, *Polypodiaceoisporites? fossulatus*, *Polypodiaceoisporites usmenis*, and *Verrucotriletes etayoi*. As for pollen, we found different species of *Bombacacidites* (e.g., *B. echinatus*), *Clavatricolpites densiclavatus*, *Crassiectoapertites columbianus*, *Cyclusphaera scabrata*, *Echimorphomonocolpites solitarius/gracilis* complex, *Echiperiporites estelae*, *Echitriporites nuriae*, *Foveotricolporites crassiexinus*, *Grimsdalea minor*, *Horniella lunarensis*, *Lanagiopollis crassa*, *Magnaperiporites spinosus*, *Mauritiidites franciscoi*, *Perfotricolpites digitatus*, *Perisyncolporites pokorny*, *Proteacidites triangulatus*, *Psilabrevitricolporites triangularis*, *Psilastephanocolporites fissilis*, *Psilatricolporites atalayensis*, *Psilatricolporites costatus*, *Psilatricolporites pachydermatus*, *Ranunculacidites operculatus*, *Retibrevitricolporites grandis*, *Retistephanocolpites tropicalis*, *Retistephanoporites crassiannulatus*, *Retistephanoporites minutiporus*, *Retitrescolpites magnus*, *Retitrescolpites? irregularis*, *Retitricolpites simplex*, *Rhoipites guianensis*, *Rhoipites hispidus*, *Rhoipites planipolaris*, *Scabraperiporites asymmetricus*, *Scabratricolporites planetensis*, *Spinizonocolpites echinatus*, *Spirosyncolpites spiralis*, *Striatopollis catatumbus*, *Tetracolporopollenites maculosus*, *Tetracolporopollenites transversalis*, *Verruperiporites denseverrucatus*, *Verruperiporites paucumverrucatus*, *Ulmoideipites krempii*, *Zonocostites ramonae*, among others. A progressive increase of marine palynomorphs (e.g., *Tuberculodinium vancampoeae*) can be seen towards the top of the sequence.

In the ANH-San Jacinto-1 well, 36 samples were prepared for palynology. A total of 5125 palynomorphs were counted, distributed in 206 morphotypes, 121 angiosperm morphotypes (of which 12 correspond to palms and two to mangroves), 41 spores (including ferns and bryophytes), four fungi, one alga (*Botryococcus* sp.), and 39 marines (dinoflagellate cysts, marine algae, organic foraminiferal linings, and scolecodonts). The preservation is good and the abundance ranges from poor to high. Spores include the presence of *Cicatricosisporites dorogensis*, *Echinatisporis brevispinosus*, *Foveotriletes concavoides*, *Kuylisporites waterbolkii*, *Laevigatosporites* spp., *Nijssenosporites* sp., *Polypodiaceoisporites fossulatus?*, *Polypodiisporites planus*, *Polypodiisporites usmensis*, *Polypodiisporites* spp., *Chomotriletes minor* (freshwater algae), among many others. Within the pollen, we recognized several species of *Bombacacidites*, *Clavatricolpites* cf. *densiclavatus*, *Crassiectoapertites columbianus*, *Crototricolpites* aff. *densus*, *Cyclusphaera euribei*, *Cyclusphaera scabrata*, *Echitriporites* aff. *nuriae*, *Foveotriporites hammenii*, *Gemmamonocolpites dispersus*, *Grimsdalea minor*, *Janduyfouria seamrogiformis*, *Lakiapollis costatus*, *Lanagiopollis crassa*, *Magnaperiporites spinosus*, *Mauritiidites franciscoi*, *Monoporopollenites annulatus*, *Perisyncolporites pokorny*, *Psilabrevitricolporites triangularis*, *Psilamonocolpites medius*, *Psilaperiporites minimus*, *Psilatricolporites pachydermatus*, *Ranunculacidites operculatus*, *Retistephanoporites crassianulatus*, *Retistephanoporites minutiporus*, *Retitrescolpites? irregularis*, *Retitriporites dubiosus*, *Rhoipites hispidus*, *Scabraperiporites asymmetricus*, *Spirosyncolpites spiralis*, *Verruperiporites denseverrucatus*, *Verruperiporites paucumverrucatus*, and *Zonocostites* sp. The recovery of marine palynomorphs along the borehole was high. We recognized *Alisocysta* sp., *Cordosphaeridium* sp., *Dinopteridium* sp., *Batiacasphaera* spp., *Bitectatodinium* spp., *Cleistosphaeridium?* sp., *Heterosphaeridium?* spp., *Homotryblium* sp., *Hystriocholpoma* spp., *Impagidinium* spp., *Lejeunecysta* aff. *fallax*, *Lingulodinium* aff. *machaerophorum*, *Oligosphaeridium* sp., *Operculodinium* sp., *Pentadinium* sp., *Polysphaeridium* spp., *Selenopemphix nephroides*, *Spiniferites* spp., and *Tectatodinium* spp./*Filisphaera* spp.

Palynostratigraphy and age of the studied sections

In the Puente Santa Fé section, the presence of *Perisyncolporites pokorny* (FAD at ~45 Ma) at 18 m indicates that this part of the section is not older than the Middle Eocene (Lutetian). It co-occurs with *Foveotriporites hammeni* up to 148 m, which has its LAD

at ~33 Ma (lower Rupelian). According to the above, the age of this succession is between the Middle Eocene–Early Oligocene (45–33 Ma; T07 zone). On the other hand, *Retibrevitricolporites speciosus* (LAD 40 Ma, B) accompanies this association up to 129 m and *Retistephanoporites crassiannulatus* (FAD ~41 Ma, B) is recorded at 148 m. Thus, the sequence between 18–129 m would have a Middle to Late Eocene (Lutetian–Bartonian) age (**Figures 3 and figure 1s**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1921/3403>). Toward the top of the section, there are no biostratigraphic markers to determine age. However, there are no changes in sedimentary facies that would allow us to interpret a stratigraphic discontinuity. Therefore, the sequence is probably Early Oligocene.

In the Quebrada La Sucia section, the presence of *Concavissimisporites fossulatus* between ~8–85 m and of *Magnastriatites grandiosus* at the 14 m level, whose FADs were estimated at ~34 Ma, indicates that this interval is not older than the Oligocene. However, no stratigraphic markers constrain the age at the top of the section (**Figures 3 and figure 1s**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1921/3403>).

In the Quebrada La Nuarque section, *Clavainaperturites microclavatus* and *Polyodiaceoisporites pseudopsilatus* are recorded at ~55 m and ~14 m, respectively (**Figures 3 and figure 1s**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1921/3403>). These species have their FAD at ~20 and 23 Ma, respectively, suggesting that the deposits of this section cannot be older than the Aquitanian–Burdigalian. This association is also

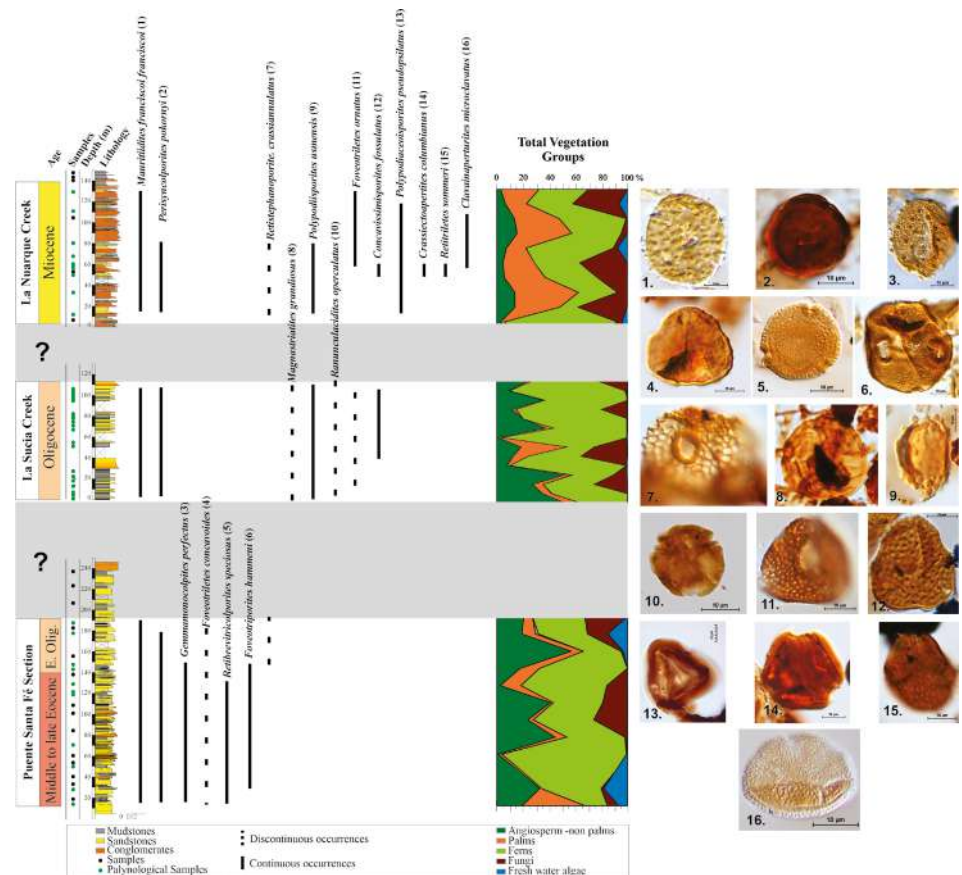


Figure 3. Palynostratigraphy and stratigraphic distribution of vegetation groups of the Amagá Formation based on the sections studied in this work. Information on the Quebrada La Sucia section is taken from Sánchez (2005). The numbers at the end of each palynological name correspond to the photos located to the right. The samples represented by black dots were prepared for palynology. However, they are barren or contain very few palynomorphs.

accompanied by *Concavissimisporites fossulatus*, *Retitriletes sommeri*, *Foveotriletes ornatus*, and *Crassiectoapertites columbianus*, whose FADs occurred during the Late Eocene-Early Oligocene (~34-31 Ma). According to **Jaramillo *et al.*** (2011), *C. fossulatus* has its LAD in the Serravallian (~12 Ma), suggesting that the age of the section could range between ~20-12 Ma (Burdigalian-Serravallian). However, this event was not considered as will be further discussed below. Thus, based on the palynological information, the age of the Amagá Formation is estimated to be Middle to Late Eocene-Miocene.

The age model of the ANH-SSJ-Nueva Esperanza-1X well, including palynology and calcareous microfossils, was published by **Celis *et al.*** (2023). The age ranges from Middle Eocene to the Early Miocene. At the base of the core, between 2265-2051 ft (690-625 m), an age no older than Middle to Late Eocene (T06-T07 zones) is assigned by the presence of *Perisyncolporites pokornyi* (FAD 45 Ma) and *Polypodiisporites usmensis* (FAD 36 Ma). Between 1962 and 525 ft (598-162 m), an Oligocene age (T08-T11 zones) is interpreted based on the occurrence of *Cicatricosisporites dorogensis* (LAD 23 Ma), *Magnastriatites grandiosus* (FAD 33 Ma), *Bombacacidites echinatus* (LAD 32Ma), *Crassiectoapertites columbianus* (FAD 33 Ma), *Magnaperiporites spinosus* (FAD 32 Ma), *Psilatricolporites pachydermatus* (FAD 30 Ma), and *Rhoipites planipolaris* (FAD 31 Ma). At the top of the core, between 525-17ft (160-5m), an Early Miocene age was assigned due to the occurrence of *Bombacacidites muinaneorum* (FAD 23 Ma), *Cyclusphaera scabrata* (LAD 17 Ma), *Nijszenosporites fossulatus* (FAD 19 Ma), and *Proteacidites triangulatus* (FAD 24 Ma). It is also important to note that Middle Miocene biostratigraphic markers, such as *Grimsdalea magnaclavata* and *Crassoretitriletes vanraadshoveni*, were not observed.

The ANH-San Jacinto-1X hole is Middle Eocene to Oligocene in age. The continuous presence of *Cicatricosisporites dorogensis*, along with *Perisyncolporites pokornyi*, is highlighted. From 1729 to 1548 ft (527 to 472 m), the presence of *Perisyncolporites pokornyi* suggests an age no older than the Middle Eocene (T06 zone). From sample 1526 to 1126 ft (465 to 343 m), *Polypodiisporites usmensis* suggests a Late Eocene age (T07 zone). Between the 1076 to 676 ft (328 to 206 m) interval, *Psilatricolporites pachydermatus*, *Crassiectoapertites columbianus*, and *Foveotriporites hammenii* co-occur in the Early Oligocene (T08-T09 zones). Finally, between the 625 and 50 ft (191 to 15 m), the occurrence of *Magnaperiporites spinosus*, the continuous record of *Cicatricosisporites dorogensis*, and the absence of Miocene palynomorphs suggest an Oligocene age (T09-T11 zones).

Discussion

Biostratigraphy and chronostratigraphy of the studied sections

The Cenozoic deposits of western Colombia along the Cauca-Patía and Amagá basins are poorly controlled chronologically. The Amagá Basin predominantly contains pollen, spores, plant remains (leaves, stems), mollusks, and crocodile teeth (e.g., **Grosse**, 1926; **Huertas**, 1977; **Sucerquia**, 2004). Among these fossils, pollen can potentially constrain the age of sedimentation. However, there is currently no published information on the stratigraphic distribution of palynomorphs with biostratigraphic value.

Jaramillo *et al.* (2011) zonation divides the Middle-Late Eocene into two palynological zones (T06 and T07). Very few species used in this zonation were found in the studied sections. In the Amagá Basin, one of the most common species is *Perisyncolporites pokornyi*, which has biostratigraphic value. Its FAD in the eastern part of the country is ~45 Ma (**Jaramillo *et al.***, 2011), and it is relatively abundant along the studied sections. *P. pokornyi* corresponds to the pollen of the Malphigiaceae, a family of trees, herbs, and lianas with diverse ecological preferences. They are widespread in swamps and mangrove scrub, tropical humid forests, and sub-Andean forests (**Marchant *et al.***, 2002). Due to its abundance and wide distribution, its FAD has been used to constrain the age of the Middle Eocene strata. In the Caribbean, *P. pokornyi* has been recorded in several sections and its FAD could be calibrated with marine calcareous microfossils. Another species of

biostratigraphic value that allows constraining the age of the lower part of the Amagá Formation and the Caribbean deposits is *Foveotriporites hammeni*, whose natural affinity remains unknown. It was first identified in the Catatumbo Basin by **González-Guzmán** (1967) and has been described, albeit in low abundance, in numerous sections and drill holes from eastern Colombia, the Caribbean, and the Cauca Valley (**Pardo-Trujillo et al.**, 2003; **Jaramillo et al.**, 2011; **Plata-Torres et al.**, 2023a; observations of the authors). In the Jaramillo zonation, it has a LAD at ~33 Ma, which is consistent with its distribution in the ANH-San Jacinto-1X well, where an independent age model was built based on calcareous nannofossils (**Arias-Villegas et al.**, 2023). Other palynomorphs useful for biostratigraphy are *Retistephanoporites crassiannulatus* (FAD ~41; Lutetian) and *Retibrevitricolporites speciosus* (LAD ~40 Ma; Bartonian), which help to constrain the age of the lower part of the Amagá Formation. *Foveotriletes concavoides* was defined by **Jaramillo et al.** (2007) in the Middle Eocene of the Llanos foothills and the Upper Paleocene of the Cerrejón Formation, which is very similar to *Concavissimisporites fossulatus* described in Oligocene deposits from the southwestern Caribbean region (**Dueñas**, 1980). These two spores were recovered in the Amagá Basin. On the other hand, *Gemmamonocolpites perfectus* belongs to a diverse group of monocolpate-gemmate pollen grains recorded in the Eocene of the Catatumbo region and the Caribbean (**González-Guzmán**, 1967; **Jaramillo & Dilcher**, 2001; **Plata-Torres et al.**, 2023a). We believe that these species may have biostratigraphic potential in western Colombia basins.

Jaramillo et al. (2011) divided the Oligocene into four palynological zones (T08 to T11). However, in the studied beds of the Amagá Formation, included in the Oligocene (La Sucia Creek section), these biozones cannot be identified due to the scarcity of biostratigraphic markers for this zonation (**Figures 3 and figure 1s**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1921/3403>). Among them are the spores *Magnastriatites grandiosus*, *Concavissimisporites fossulatus*, and *Foveotriletes ornatus* whose FADs are estimated at ~34, 34, and ~31 Ma (Eocene-Oligocene boundary and early Rupelian). *M. grandiosus* is very similar to *Ceratopteris* sp., an aquatic fern currently found in the tropics in coastal marshes and alluvial plains adjacent to lakes and rivers (**Germeraad et al.**, 1968). In the case of *C. fossulatus* and *F. ornatus*, they have a natural affinity with *Huperzia* (Lycopodiaceae), which is currently widespread in the humid mountain ecosystems of Colombia (**Solé de Porta & Murillo-Pulido**, 2005). In this section, *R. operculatus* is also recorded, co-occurring with *Polypodiisporites usmensis*, whose FADs are estimated at ~40 Ma and ~37 Ma (Late Eocene), respectively. The natural affinity of *R. operculatus* corresponds to *Alchornea* (Euphorbiaceae), mostly trees common in tropical lowland and sub-Andean forests (**Marchant et al.**, 2002). On the other hand, *P. usmensis* is a fern spore related to *Polypodium* (**Jaramillo & Rueda**, 2023), which usually lives epiphytically on lowland rainforest trees, extending to secondary dry forests, gallery forests, shrub savannas, and mountain forests (**Marchant et al.**, 2002). It is also important to note that some of the key species used in the palynological zonation of Jaramillo (e.g., *Cicatricosisporites dorogensis*, *Retibrevitricolporites triangulatus*) were not found in the studied material. This, together with the presence of species not described in the literature, suggests that the vegetation in this region had unique characteristics. Therefore, these new morphospecies must be studied to ascertain their biostratigraphic value.

On the other hand, EAFIT University (Medellín) conducted a study to assess the potential for coal bed methane exploration in the Amagá Basin (EAFIT-ANH, 2011). Seven core holes ranging in depth from 80 to 530 meters were drilled near the towns of Venecia and La Pintada, located in the “middle” part of the Amagá Formation, which has economically exploitable coal seams. A palynological study of 92 samples was conducted in five holes (**Bioss-Universidad EAFIT**, 2011). Palynomorphs found included *Magnastriatites grandiosus*, *Retitricolporites simplex*, *P. usmensis*, *Laevigatosporites catanejensis*, *Retitricolporites irregularis*, *Mauritiidites minor*, *Perisyncolporites pokorny*, and *Echiperiporites* cf. *stellae* (sic.). The author concluded that this association is characteristic of the Early Miocene. However, according to the available palynological

zonations, none of these palynomorphs allows to constrain this age. Instead, most of these species have their FAD in the Eocene, and the association can only be considered not older than the Oligocene since the FAD of *M. grandiosus* is ~34 Ma. The author also notes that some samples have an older palynological species and interprets them as reworked, such as *Foveotriporites hammenii*, *Bombacacidites gonzalezii*, *Cricotriporites* cf. *guianensis*, *Verruperiporites densiverrucato* (sic.), *Foveotricolpites* cf. *fossulatus*, and *Psilatricolporites crassus*. Although not mentioned in the report, the photographic plates include *Cicatricosisporites dorogensis*. It is also worth noting that the occurrence of igneous dikes in the area had thermal effects on the organic matter in certain instances. In any case, this material has great potential for further study.

In the Caribbean ANH-SSJ-Nueva Esperanza-1X well, different palynological events were used to establish the age of the Oligocene strata, including the FADs of *Magnastriatites grandiosus* (~34 Ma), *Crassiectoapertites columbianus* (~33 Ma), *Magnaperiporites spinosus* (~32 Ma), *Psilatricolporites pachydermatus* (~30 Ma), and *Proteacidites triangulatus* (~24 Ma), as well as the LAD of *Bombacacidites echinatus* (~32 Ma) and *Cicatricosisporites dorogensis* (~23 Ma) (Figure 4). Similarly, events such as the FAD of *Psilatricolporites pachydermatus*, *Crassiectoapertites colombianus*, *Magnaperiporites spinosus*, and the LAD of *Foveotriporites hammenii* and *Cicatricosisporites dorogensis* were recorded in the ANH-San Jacinto-1X well (Figure 4).

In the La Nuarque Creek section, *Polypodiaceoisporites pseudopsilatus* and *Clavainaperturites microclavatus* were recovered with Early Miocene FADs of ~23 and 20 Ma (Aquitanian and Burdigalian), respectively. *P. pseudopsilatus* has been associated with *Pteris* (D’Apolito et al., 2019), which has a diverse ecology in lower and upper montane rainforests. *C. microclavatus* has been associated with *Hedyosmum*. Today, this genus is mainly distributed in wet habitats of montane cloud forests, but in the Miocene, its ancestor was distributed in the lowlands (Martínez et al., 2013). On the other hand, the spore *Concavissimisporites fossulatus* is present in the La Nuarque Creek section. According

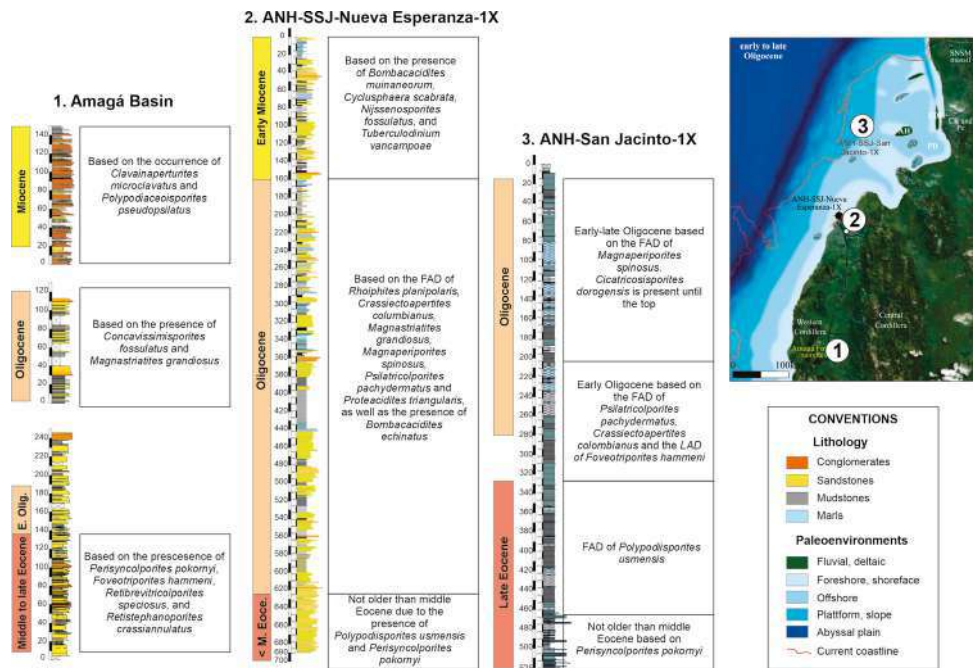


Figure 4. Comparison of the studied sites and summary of the palynological criteria used to determine the age. On the upper right is a paleogeographic map of the Oligocene for northwestern Colombia (modified from Celis et al., 2023) showing the location of the studied sections.

to **Jaramillo et al.** (2011), this species has its LAD at ~12 Ma (Serravalian) and could therefore constrain the minimum age of sedimentation. However, this criterion should not be used because, as mentioned above, *C. fossulatus* can be related to recent spores of *Huperzia hippuridea* (**Solé De Porta & Murillo-Pulido**, 2005), a fern that is currently abundant in Central and South America (**Lellinger**, 1989). In contrast, species common in eastern Colombia and part of the Jaramillo zonation, such as *Nijssenosporites fossulatus* and *Rugutricolporites intensus*, were not found in the Amagá Formation.

In addition to micropaleontological data, radiometric methods such as zircon U/Pb detrital geochronology and thermochronology (zircon fission tracks-ZFT) have been applied to the Cenozoic sediments of the Amagá Formation (**Montes et al.**, 2015; **Piedrahíta et al.**, 2017; **Lara et al.**, 2018). These methods have allowed the determination of maximum depositional ages for different stratigraphic levels. In the central part of the Amagá basin, **Piedrahíta et al.** (2017) indicated a ZFT maximum depositional age of 28.1 ± 5.8 for the Lower Member of the Amagá Formation and a range of 17.6 ± 1.6 to 10.6 ± 2.5 Ma in the Upper Member. These data are complemented by U/Pb maximum depositional ages from **Lara et al.** (2018) in the northern part of the basin, which yielded ages ranging from 72.9 to 58.8 for the lower section (Puente Santa Fé section of this work) and 21 to 18.8 for the upper section (La Nuarque Creek section). On the other hand, in a sandstone of the upper part of the Amagá Formation, near the La Nuarque Creek section, **Montes et al.** (2015) found a U/Pb age of 13.3 Ma for the youngest single-detrital zircon, which was used to establish a maximum depositional age of 13 Ma for this part of the unit. These results demonstrate the importance of using both radiometric and micropaleontological methods in the determination of the age of the continental deposits of western Colombia.

Finally, according to the palynostratigraphic information presented here and the available geochronology, the age of the Amagá Formation ranges from ~40-13 Ma (~27 Myr). Given this wide time interval, we question whether it is correct to include all these deposits in a single lithostratigraphic unit under the rank of a formation. The thermochronological data show that during the Eocene-Miocene, this region was influenced by uplift pulses of the Western and Central cordilleras associated with a general transpressive structural setting causing syn- and post-depositional deformation of the Amagá Basin (**Restrepo-Moreno et al.**, 2009; **Sierra & Marín-Cerón**, 2011; **Piedrahíta et al.**, 2017). Therefore, it is possible that the so-called Amagá Formation considered as a single unit represents several units separated by stratigraphic discontinuities that have not yet been differentiated due to the lack of detailed cartographic and chronostratigraphic framework.

Vegetation patterns in the Amagá Formation

The distribution patterns of the angiosperm groups (excluding palms), pteridophytes, ferns, algae, and fungi (**Figures 3 and 1s**) show that the Puente Santa Fé section has the highest abundance of freshwater algae at both the base and the top of the section. Pteridophyte spores and fungi are common throughout the section. Similar trends occur in the Quebrada La Sucia section, although there is also a decrease in the abundance of angiosperms (excluding palms), from the base to the top. In contrast, the Quebrada La Nuarque section shows the lowest abundance of angiosperms (excluding palms) among the three sections studied, while palms are the most abundant group. The detailed stratigraphic distribution of palynomorphs in the studied sections is shown in **figure 1S** (Supplementary Material).

According to this and the sedimentological data, the Amagá Formation accumulated in fluvial environments where humid tropical lowland forests dominated. During the Middle-Late Eocene to Early Oligocene (Puente Santa Fé section), these environments were characterized by freshwater lakes or floodplain swamps, as indicated by the abundance of *Concentricystes* (**Quin et al.**, 2008; **Tang et al.**, 2013). During the Oligocene (Quebrada La Sucia section), the dominance of ferns, angiosperms, and fungi, suggest tropical rainforests that changed during the Miocene (Quebrada La Nuarque section) to gallery forests near water sources or floodplain forests indicated by the marked increase of *Mauritia* and the abundance of freshwater algae (**Bogota et al.**, 2021; **Trujillo-Gonzalez et al.**, 2011).

Conclusions

The palynostratigraphic analyses of three stratigraphic sections of the Amagá Formation allowed us to establish a Middle-Late Eocene to Miocene age. Some of the stratigraphic markers used in the eastern Colombian zonations (e.g., **Jaramillo *et al.***, 2011) have been identified, including *Perisyncolporites pokornyi*, *Foveotriporites hammeni*, *Retibrevitricolporites speciosus*, *Magnastriatites grandiosus*, *Concavissimisporites fossulatus*, *Clavainaperturites microclavatus*, and *Polypodiaceoisporites pseudopsilatus*. Nevertheless, some common key species from these palynological zonations (e.g., *Cicatricosisporites dorogensis*) were not found. Additionally, the presence of previously undescribed pollen and spore species becomes crucial to establish their biostratigraphic potential and understand the evolution of the flora from western Colombia.

The comparison of this information with the Caribbean wells shows that the Middle Eocene-Lower Miocene strata have more key taxa from the eastern zonation of **Jaramillo *et al.*** (2010), which, together with the presence of calcareous microfossils, allowed us to further constrain the age of sedimentation. Moreover, these findings can potentially contribute to the calibration of palynological events to the time scale in the continental basins of western Colombia.

According to sedimentological and palynological data, the Amagá Formation accumulated in fluvial environments with freshwater lakes, floodplain swamps dominated by humid tropical lowland forests, and gallery forests near water sources. In contrast, the marine influence increases in the Caribbean from coastal sedimentation in the ANH-SSJ-Nueva Esperanza-1X to open marine in the ANH-San Jacinto-1 (**Figure 4**).

Supplementary material

See table 1S in <https://www.raccefy.n.co/index.php/raccefy.n/article/view/1921/3402>

See figure 1S in <https://www.raccefy.n.co/index.php/raccefy.n/article/view/1921/3403>

Acknowledgments

We want to thank Dr. Carlos Jaramillo for his invitation to publish in this special volume dedicated to Dr. Emile Grosse. Special thanks go to *Minciencias* and the *Agencia Nacional de Hidrocarburos-ANH* for allowing the publication of the project data (contract FP44842-494-2017) and to the *Fondo Corrigan - ACGGP* and the *Ares Foundation* for economic support. We thank the logistic and administrative staff at *Instituto de Investigaciones en Estratigrafía-IIES*, University of Caldas, especially Juan Pablo Betancourth and Rubén Hernández for the preparation of some figures and Mauricio Reyes for the preparation of the palynological slides. Special thanks to Diana Ochoa, Sebastián Rosero, and Juan Carlos Silva for their help in the fieldwork, and to Angel Barbosa for his collaboration in analyzing the geochronological information. Finally, we thank the two anonymous reviewers who helped us improve the final version of the manuscript.

Contribution of the authors

A.P-T. y A.PI-T.: Conceptualization, investigation, methodology, writing of the original draft, visualization, review, and editing; E.R. Data curation, methodology; F. V-H y R. T-T.: Data curation, review & editing.

Conflicts of interest

The authors declare that they do not have any conflict of interest about the content of this work or its financial support.

References

Arias-Villegas, V., Bedoya, E., Vallejo, D.F., Aubry, M-P., Pardo-Trujillo, A. (2023). Late Eocene to Early Miocene calcareous nannofossil biostratigraphy from the ANH-San Jacinto-1 well: Stratigraphic implications for the Sinú-San Jacinto basin in the Caribbean region of Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 104470.

- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C.A., Martínez, J. F.** (2007). Colombian sedimentary basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. *Agencia Nacional de Hidrocarburos, 1*, 92.
- Bernal-Olaya, R., Mann, P., Escalona, A.** (2015). Cenozoic tectonostratigraphic evolution of the Lower Magdalena Basin, Colombia: An example of an under- to overfilled forearc basin, in Bartolini, C., and Mann, P., eds., *Petroleum Geology and Potential of the Colombian Caribbean Margin: American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 108, p. 345-397. <https://doi.org/10.1306/13531943M1083645>
- Bernet, M., Mesa-García, J., Chauvel, C., Ramírez-Londoño, M. J., Marín-Cerón, M-I.** (2020). Thermochronological, petrographic and geochemical characteristics of the Combia Formation, Amagá basin, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences, 105*, 102929
- Bioss-Universidad EAFIT.** (2011). Palinología de la Formación Amagá, report 783/2011. Presented to the National Hydrocarbons Agency. 18 p. Unpublished.
- Blandón, A.** (2007). Contribución de la Materia Orgánica Sedimentaria a la determinación del paleoambiente y del potencial de generación de hidrocarburos en los carbones de la Formación Amagá (Colombia). Tesis Doctoral. Département de géologie et paléontologie. Université de Genève.
- Bogotá-Ángel, G., H. Huang, P. E. Jardine, N. Chazot, S. Salamanca, H. Banks, A. Pardo-Trujillo, A. Plata, H. Dueñas, W. Star, R. Langelaan, A. Eisawi, O. P. Umeji, L. O. Enuenwemba, S. Parmar, R. R. da Silveira, J. Y. Lim, V. Prasad, R. J. Morley, C. D. Bacon, C. Hoorn.** (2021). Climate and Geological Change as Drivers of Mauritiinae Palm Biogeography. *Journal of Biogeography, 48*(5), 1001-1022. <https://doi.org/10.1111/jbi.14098>
- Cardona, A., Montes, C., Ayala, C., Bustamante, C., Hoyos, N., Montenegro, O., Ojeda, C., Niño, H., Ramírez, V., Valencia, V., Rincón, D., Vervoort, J., Zapata, S.** (2012). From arc-continent collision to continuous convergence, clues from Paleogene conglomerates along the southern Caribbean–South America plate boundary. *Tectonophysics, 580*, 58-87.
- Celis, S.A., Rodríguez-Tovar, F. J., Pardo-Trujillo, A., Giraldo-Villegas, C.A., Gallego, F., Plata, A., Trejos-Tamayo, R., Vallejo-Hincapie, F., Cardona, F.J.** (2023). Deciphering influencing processes in a tropical delta system (middle-late Eocene? To Early Miocene, Colombian Caribbean): signals from a well-core integrative sedimentological, ichnological, and micropaleontological analysis. *Journal of South American Earth Sciences, 127*, 104368. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104368>
- Coates, A.G., Jackson, J.B., Collins, L.S., Cronin, T.M., Dowsett, H.J., Bybell, L.M., Jung, P., Obando, J.A.** (1992). Closure of the Isthmus of Panama: the near-shore marine record of Costa Rica and western Panama. *Geological Society of America Bulletin, 104*(7), 814-828.
- D’Apolito, C., Silva-Caminha, S.A.F., Jaramillo, C., Dino, R., Soares, E.A.A.** (2019). The Pliocene–Pleistocene palynology of the Negro River, Brazil. *Palynology, 43*, Issue 2. <https://doi.org/10.1080/01916122.2018.1437090>
- De Porta, N.S. & Murillo-Pulido, M.T.** (2005). Estudio palino-botánico de algunas especies de Pteridophyta de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 29*(111), 183-219.
- De Porta, J.** (1974). Lexique Stratigraphique International Amerique Latine, Colombie (deuxieme partie), Tertiaire et Cuaternaire. *Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 5*, 1-643.
- Dueñas, H.** (1980). Palynology of Oligocene-Miocene strata of borehole Q-E-22, Planeta Rica, Northern Colombia. *Review of Palaeobotany and Palynology, 30*, 313-328.
- Dueñas-Jiménez, H.** (1986). Geología y palinología de la formación Ciénaga de Oro, región caribe colombiana, vol. 18. *Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas*, 1-51.
- Duque-Caro, H.** (1990). The Chocó Block in the northwestern corner of South America: structural, tectonostratigraphic and paleogeographic implications. *Journal of South American Earth Sciences, 3*, 71-84.
- EAFIT-ANH.** (2011). Valoración del potencial exploratorio CBM en la cuenca carbonífera de Amagá y Boyacá-Cundinamarca (Formación Guaduas), Anexo F2, Informe de laboratorio palinología cuenca Amagá, unpublished, 28 p.
- Escobar, L.E.** (1983) Estudio palinológico de la Formación Amagá. *Boletín de Ciencias de la Tierra, 7-8*, 117-129.
- Escobar, L.H.** (1990). Palinoestratigrafía de la Formación Amagá. Facultad de Minas. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

- Farris, D.W., Jaramillo, C., Bayona, G., Restrepo-Moreno, S.A., Montes, C., Cardona, A., Mora, A., Speakman, R.J., Glascock, M. D., Valencia, V.** (2011). Fracturing of the Panamanian Isthmus during initial collision with South America. *Geology*, 39(11), 1007-1010.
- Flinch, J.F.** (2003). Structural Evolution of the Sinú-Lower Magdalena Area (Northern Colombia), in Bartolini, C., Buffler, R.T., and Blickwede, J., (eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation, and Plate Tectonics: AAPG Memoir 79*, p. 776-796.
- Germeraad, J. H., Hopping, C. A., Muller, J.** (1968). Palynology of Tertiary sediments from tropical areas. *Review of Palaeobotany and palynology*, 6(3-4), 189-348.
- Gómez, J., Nivia, A., Montes, N. E., Jiménez, D. M., Tejada, M. L., Sepúlveda, M. J., Osorio, J. A., Gaona, T., Diederix, H., Uribe, H., Mora, M.** (2007). *Mapa Geológico de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.
- Gómez, J., Montes, N. E., Alcárcel, F. A., Ceballos, J. A.** (2015). Catálogo de dataciones radiométricas de Colombia en ArcGIS y Google Earth. En: Gómez, J. & Almanza, M.F. (Editores), *Compilando la geología de Colombia: Una visión a 2015*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 33, 63-419. Bogotá.
- Gómez, J., Montes, N.E.** (compiladores). (2020). *Mapa Geológico de Colombia en Relieve 2020. Escala 1:1 000 000*. Servicio Geológico Colombiano.
- González-Guzmán, A.E.** (1967). *A Palynologic Study on the Upper Los Cuervos and Mirador Formations (Lower and Middle Eocene); Tibú Area, Colombia*. E.J. Brill, Leiden.
- González, H.** (1980). Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). *Boletín Geológico Ingeominas*, 23, 174.
- González, H.** (2001). Mapa Geológico del Departamento de Antioquia Escala 1:400.000, Memoria Explicativa. Medellín: Ingeominas.
- Grosse, E.** (1926). El Terciario Carbonífero de Antioquia. *Das Kohlentertiär Antiquias*. Dietrich Reimer (Ernst Vohsen), Berlin.
- Guzmán, C., Sierra, G.** (1984). Ambientes sedimentarios en la Formación Amagá. Tesis de Pregrado. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Guzmán, C.A.** (1991). Condiciones de depositación de la Formación Amagá entre Amagá y Angelópolis. Tesis de Maestría. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Guzmán, C.A.** (1993). Revisión lexicostratigráfica de la Formación Amagá y análisis facial de la cuenca Amagá-Angelópolis, Memorias, VI Congreso Colombiano de Geología, Medellín, pp. 222-234.
- Guzmán, G., Gómez, E., Serrano, B.** (2004). Geología de los Cinturones Sinú, San Jacinto y Borde Occidental del Valle Inferior del Magdalena, Caribe Colombiano, Escala 1:300.000: Bogotá, Ingeominas.
- Hoorn, C.** (1993) Marine incursions and the influence of Andean tectonics on the Miocene depositional history of northwestern Amazonia: results of a palynostratigraphic study. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 105, 267-309.
- Huertas, G.** (1977). Una Melastomatacea fósil del Terciario Carbonífero de Antioquia (Eoceno). *Caldasia*, XII (56), 35-39.
- Jaramillo, C. A., Bayona, G., Pardo-Trujillo, A., Rueda, M., Torres, V., Harrington, G. J., Mora, G.** (2007). The palynology of the Cerrejón formation (upper Paleocene) of northern Colombia. *Palynology*, 31, 153-189. <https://doi.org/10.1080/01916122.2007.9989641>
- Jaramillo, C., Rueda, M.** (2023). *A Morphological Electronic Database of Cretaceous-Cenozoic and Extant pollen, spores and dinoflagellates from Northern South America*, v. 2023. <http://biogeodb.stri.si.edu/jaramillosdb/web/morphological/>
- Jaramillo, C. A., Dilcher, D. L.** (2001). Middle Paleogene palynology of Central Colombia, South America: a study of pollen and spores from tropical latitudes. *Palaeontographica Abteilung B*, 87, 1-259.
- Jaramillo, C. A., Rueda, M., Torres, V.** (2011). A palynological zonation for the Cenozoic of the Llanos and Llanos Foothills of Colombia. *Palynology*, 35(1), 46-84.
- Lara, M., Salazar-Franco, A.M., Silva-Tamayo, J.C.** (2018). Provenance of the Cenozoic siliciclastic intramontane Amagá Formation: Implications for the early Miocene collision between Central and South America. *Sedimentary Geology*, 373, 147-162.
- Lellinger, D. B.** (1989) The ferns and fern-allies of Costa Rica, Panamá, and the Chocó (Part 1: Psilotaceae through Dicksoniaceae). *Pteridologia*, 2A, 1-364.

- Lorente, M. A.** 1986. Palynology and palynofacies of the Upper Tertiary in Venezuela: *Dissertationes Botanicae*, 99, 1-222.
- Mantilla-Pimiento, A.M., Jentzsch, G., Kley, J., Alfonso-Pava, C.** (2009). Configuration of the Colombian Caribbean margin: Constraints from 2D seismic reflection and potential fields interpretation, in Lallemand, S., and Funicello, F., eds., *Subduction Zone Geodynamics*: Berlin, Springer.
- Marchant, R., Almeida, L., Behling, H., Berrio, J.C., Bush, M., Cleef, A., Duivenvoorden, J., Kappelle, M., De Oliveira, P., Teixeira de Oliveira-Filho, A., Lozano-García, S., Hooghiemstra, H., Ledru, M.-P., Ludlow-Wiechers, B., Markgraf, V., Mancini, V., Páez, M., Prieto, A., Rangel, O., Salgado-Labouriau, M.L.** (2002). Distribution and ecology of parent taxa of pollen lodged within the Latin American Pollen Database: *Review of Palaeobotany and Palynology*, 121, 1-75. [https://doi.org/10.1016/S0034-6667\(02\)00082-9](https://doi.org/10.1016/S0034-6667(02)00082-9)
- Martínez, C., Madriñán, S., Zavada, M., Jaramillo, C. A.** (2013) Tracing the fossil pollen record of *Hedyosmum* (Chloranthaceae), an old lineage with recent Neotropical diversification, *Grana*, 52(3), 161-180, <https://doi.org/10.1080/00173134.2012.760646>
- Mejía, M., Álvarez, E., González, H., Grosse, E.** (1983). Geología de la plancha 130 Santa Fé de Antioquia, escala 1:100.000. Ingeominas. Bogotá.
- Montes, C., Cardona, A., McFadden, R., Morón, S. E., Silva, C. A., Restrepo-Moreno, S., Ramírez, D. A., Hoyos, N., Wilson, J., Farris, D., Bayona, G. A., Jaramillo, C. A., Valencia, V., Bryan J., Flores, J. A.** (2012). Evidence for middle Eocene and younger land emergence in central Panama: Implications for Isthmus closure. *GSA Bulletin*, 124, 780-799.
- Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Pardo, A., Silva, J.C., Valencia, V., Ayala, C., Pérez-Ángel, L.C., Rodríguez-Parra, L.A., Ramírez, V., Niño, H.** (2015). Middle Miocene closure of the Central American seaway. *Science*, 348 (6231), 226-229.
- Mora, J. A., Oncken, O., Le Breton, E., Mora, A., Veloza, G., Vélez, V., de Freitas, M.** (2018). Controls on forearc basin formation and evolution: Insights from Oligocene to Recent tectono-stratigraphy of the Lower Magdalena Valley basin of northwest Colombia. *Marine and Petroleum Geology*, 97, 288-310.
- Muller, J., de Di Giacomo, E., Van Erve, A. W.** (1987). *A palynological zonation for the Cretaceous, Tertiary, and Quaternary of northern South America*. AASP.
- Osorio-Granada, E., Pardo-Trujillo, A., Restrepo-Moreno, S.A., Gallego, F., Muñoz, J., Plata, A., Trejos-Tamayo, R., Vallejo, F., Barbosa-Espitia, A., Cardona-Sánchez, F.J., Foster, D.A., Kamenov, G.** (2020). Provenance of Eocene–Oligocene sediments in the San Jacinto Fold Belt: Paleogeographic and geodynamic implications for the northern Andes and the southern Caribbean: *Geosphere*, 16 (1), 210–228, <https://doi.org/10.1130/GES02059.1>
- Pardo-Trujillo, A., Jaramillo, C., Oboh-Ikuenobe, F.** (2003). Paleogene palynostratigraphy of the eastern middle Magdalena Valley, Colombia. *Palynology*, 27, 155–178.
- Pardo-Trujillo, A., Sánchez, C. A.** (2009). Cyclusphaera en el Cenozoico de Colombia y su supuesto origen marino. *Caldasia*, 31, 105-121.
- Piedrahíta, V.A., Bernet, M., Chadima, M., Sierra, G. M., Marín-Cerón, M. I., Toro, G. E.** (2017). Detrital zircon fission-track thermochronology and magnetic fabric of the Amagá Formation (Colombia): Intracontinental deformation and exhumation events in the northwestern Andes. *Sedimentary geology*, 356, 26-42.
- Pindell, J. L., Kennan, L.** (2009). Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. *Geological Society, London, Special Publications*, 328(1), 1-55.
- Plata-Torres, A., Pardo-Trujillo, A., Vallejo-Hincapié, F., Trejos-Tamayo, R., Flores, J. A.** (2023a). Early Eocene (Ypresian) palynology of marine sediments from the Colombian Caribbean. *Journal of South American Earth Sciences*, 121, 104146.
- Plata-Torres A., Pardo-Trujillo A., Gómez-González C., Flores, J. A.** (2023b). Paleopalynology in Colombia: a review. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 47(183), 412-438. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1913>
- Porta, J.** (1974). *Lexique stratigraphique internationale americque latine, colombie (deuxime partie)*. Tertiare et Cuaternarie: Centre National de la Recherche Scientifique, Paris 5, 1-643.
- Punyasena, S. W., Jaramillo, C., De La Parra, F., Du, Y.** (2012). Probabilistic correlation of single stratigraphic samples: A generalized approach for biostratigraphic data. *AAPG bulletin*, 96 (2), 235-244.
- Qin, J., Wu, G., Zheng, H., Zhou, Q.** (2008). The palynology of the first hard clay layer (late Pleistocene) from the Yangtze delta, China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 149 (1-2), 63-72.

- Ramírez-Pinilla, E. A.** (2015). Edad y ambiente de la Formación Amagá (Cenozoico del Valle del Cauca, Sector de Santa Fé de Antioquia-Sopetrán) con base en evidencias palinológicas. Tesis de pregrado. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Caldas. Unpublished.
- Regali, M., Uesugui, N., da Silva, S. A.** (1974) Palinología dos sedimentos Meso-Cenozoicos do Brasil. *Boletim Tecnico da Petrobras*, 17, 177-191.
- Restrepo, J. J., Toussaint, J. F.** (1990). Cenozoic arc magmatism of northwestern Colombia. In: Kay, S. M. Rapela, C. W., *Plutonism from Antarctica to Alaska*. Geological Society of America Special Paper.
- Restrepo-Moreno, S.A., Foster, D.A., Stockli, D.F., Parra-Sánchez, L.N.** (2009,). Long-term erosion and exhumation of the “Altiplano Antioqueño”, Northern Andes (Colombia) from apatite (U-Th)/He thermochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 278, 1-12.
- Sánchez, C. A.** (2005). Determinación de la edad de la Formación Amagá. Programa Colciencias Jóvenes Investigadores. Convenio 001-2004 EAFIT-ICP. Unpublished.
- Schuler, M., Doubinger, J.** (1970). Observations palynologiques dans le Bassin d’Amagá (Colombia). *Pollen et Spores*, XII(3), 429-450.
- Selley, R.C.** (1985). *Ancient Sedimentary Environments and Their Sub-Surface Diagnosis*. Chapman and Hall Ltd.
- Sierra, G.I., Silva, J.C., Correa, L.** (2004). Estratigrafía secuencial de la Formación Amagá. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 15, 9-22.
- Sierra, G.M., Marín-Cerón, M.I.** (2011). Amagá, Cauca and Patía Basins. In: Cediél, F. (Ed.), *Petroleum Geology of Colombia*, 2, Fondo Editorial Universidad Eafit.
- Silva-Tamayo, J.C., Sierra, G.M., Correa, L.G.** (2008). Tectonic and climate driven fluctuations in the stratigraphic base level of a Cenozoic continental coal basin, northwestern Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 26, 369-382.
- Solé De Porta, N., Murillo-Pulido, M. T.** (2005). Estudio palino-botánico de algunas especies de Pteridophyta de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 29(111): 183-218.
- Sucerquia, P. A.** (2004). Uso de la materia orgánica sedimentaria como herramienta para la interpretación de ambientes sedimentarios en la Formación Amagá, sección Los Almendros, Municipio de Sopetrán, Antioquia, B.Sc. Thesis, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. 94 P.
- Tang, L., Mao, L., Lü, X., Ma, Q., Zhou, Z., Yang, C., Kong, Z., Batten, D. J.** (2013). Palaeoecological and palaeoenvironmental significance of some important spores and microalgae in Quaternary deposits. *Chinese Science Bulletin*, 58, 3125-3139.
- Traverse, A.** (2007). *Paleopalynology (Vol. 28)*. Springer Science & Business Media.
- Trujillo-González, J. M., Torres Mora, M. A., Santana-Castañeda, E.** (2011). La palma de Moriche (*Mauritia flexuosa* Lf.) un ecosistema estratégico. *Orinoquia*, 15(1), 62-70.
- U. Caldas-ANH Report.** (2020). Certificación de estratigrafía física y edad de los núcleos de perforación recuperados por la Agencia Nacional de Hidrocarburos-ANH en las Cuencas Sinú-San Jacinto y Cordillera (Informe final). Unpublished.
- Vallejo-Hincapié, F., Flores, J-A., Aubry, M-P., Pardo-Trujillo, A.** (2023). Contribution to the Cenozoic chronostratigraphic framework of the Caribbean Sinú-San Jacinto Belt of Colombia based on calcareous nannofossils. *Journal of South American Earth Sciences*, 127, 104419.
- van der Hammen, T.** (1958). Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y tectono-génesis de los Andes Colombianos. *Boletín Geológico Servicio Geológico Nacional*, 6 (1-3), 60-116.
- Zegarra, M.** (1993). Estudio palinológico de la Formación Amagá en la cuenca de Sopetrán. Undergraduate Thesis. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Unpublished.

Original article

Fossil leaves, woods, gastropods, and a crocodile tooth: Is the Amagá Formation worth exploring?

Fósiles de hojas, maderas, gasterópodos y un diente de cocodrilo, ¿vale la pena explorar la Formación Amagá?

✉ Andrés Cárdenas^{1,*}, ✉ José Daniel Giraldo¹, ✉ Daniel Monterrosa¹, ✉ Marion Weber²

¹ Semillero de Paleontología, Área de Sistemas Naturales y Sostenibilidad, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

² Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Medellín, Colombia

Abstract

We have generated a spatial framework for macrofossil searching based on the current knowledge of fossil localities and fossil beds reported for the Amagá Formation in the northwestern Andes in Colombia. Our results show that twenty-three fossil localities and ninety-five fossil beds are distributed along this sedimentary succession. Preservation potential is higher in the Lower Member, given the high accommodation space and the dominance of a meandering fluvial system, compared with the Upper Member, where there was less accommodation space with a braided fluvial system controlling it. Our findings show that even though paleontological studies are null in this area, there are several options to find terrestrial macrofossil assemblages that will allow us to investigate the possible biological role of global climatic changes and regional tectonics in the Neotropical biomes based on the Amagá Formation.

Keywords: Paleontology; Neotropics; Climate change; Biodiversity.

Resumen

Hemos generado un marco espacial para la búsqueda de macrofósiles basado en las localidades fósiles y las capas con contenido fósil reportadas hasta hoy en la Formación Amagá localizada en los Andes noroccidentales en Colombia. Nuestros resultados muestran veintitrés localidades fósiles y noventa y cinco capas con contenido fósil que se distribuyen a lo largo de esta sucesión sedimentaria. El potencial de conservación es mayor en el Miembro Inferior debido a un mayor espacio de acomodación y al control que ejerce el predominio de un sistema fluvial meandriforme, en comparación con el Miembro Superior donde había menos espacio de acomodación y un sistema fluvial trenzado. Nuestros hallazgos muestran que a pesar de que los estudios paleontológicos son nulos en esta área, existen varias posibilidades para encontrar asociaciones de macrofósiles terrestres que permitirán investigar el posible papel biológico de los cambios climáticos globales y la tectónica regional en los biomas neotropicales de la Formación Amagá.

Palabras claves: Paleontología; Neotropico; Cambio climático; Biodiversidad.

Introduction

Located between the Central and the Western cordilleras in the northernmost part of the Colombian Andes (**Figure 1**), the Amagá Formation is a late Oligocene to middle Miocene Neotropical fluvial siliciclastic succession deposited in a strike-slip intermontane basin associated with the obliquity interaction between the Farallon and the South American plates (**Figure 1**) (**Lara et al.**, 2018; **Silva-Tamayo et al.**, 2020). Stratigraphically, the base of the Amagá Formation is marked by an unconformity atop Pre-Cenozoic continental and oceanic basement, while the upper Miocene Combia Formation rests in unconformity

Citation: Cárdenas A, Giraldo JD, Monterrosa D, Weber M. Fossil leaves, woods, gastropods, and a crocodile tooth: Is the Amagá Formation worth exploring?. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185):943-951, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1896>

Guest editor: Carlos Jaramillo

***Corresponding autor:**
Andrés Cárdenas; acarde17@eafit.edu.co

Received: March 27, 2023

Accepted: May 23, 2023

Published on line: July 27, 2023



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

atop the strata of the Amagá Formation (Lara *et al.*, 2018; Silva-Tamayo *et al.*, 2020). Moreover, the Amagá Formation has been divided into two members. The Lower Member (~294 m) is characterized by a succession of poorly sorted quartzose conglomerates, well-sorted sublitharenites, massive grayish siltstones, and coal seams (Sierra & Marín-Cerón, 2011). On the other hand, the Upper Member (~228 m) is determined by a succession of lithic wackes, feldspathic litharenites, and greenish-to-reddish siltstones (Sierra & Marín-Cerón, 2011).

In his extensive geological work, Grosse (1926) pointed out that the Amagá Formation could potentially have terrestrial macrofossils (i.e., wood, gastropods, and vertebrates). Later, Schönfeld (1947) showed that the fossil wood specimens collected by Grosse (1926) were critical to understanding the Colombian Neogene floristic biomes. However, after Schönfeld's (1947) work, there are no paleontological studies based on the macrofossils of the Amagá Formation. However, under the current global warming scenario, it is worth displaying all possible efforts to find and study fossils in the Amagá Formation, given the geological time interval recorded in its rocks and its ancient Neotropical location.

The Lower and the Upper Members are dated between the Late Oligocene (~28 to ~23 Ma) and the Early-Middle Miocene (~23 to ~11 Ma) (Lara *et al.*, 2018), so the possible fossils recorded in the Amagá Formation could inform us about the late Oligocene Warming (~26.5 to 24 Ma) (Pekar *et al.*, 2006), followed by the Middle Miocene climatic optimum (~17 to 14 Ma) (Ji *et al.*, 2018), and finally, the Middle Miocene climate transition (~14

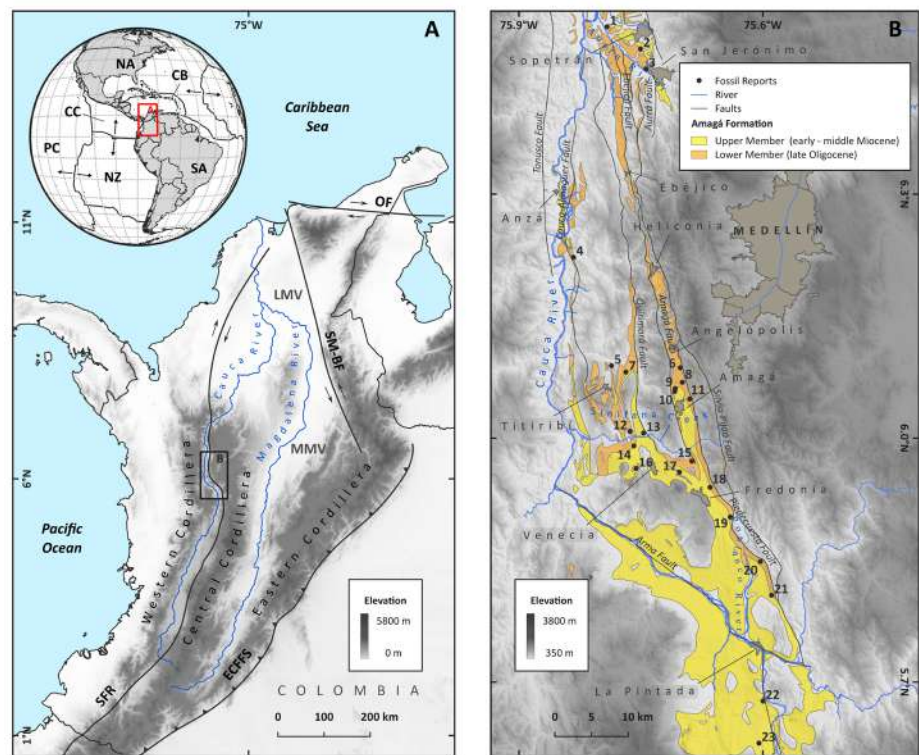


Figure 1. Location of the fossil localities in the Amagá Formation. **A.** General location map of the studied area in America and its major tectonic features (red rectangle in the upper right corner) and in the Colombian Andes and their major structural components (black rectangle in the center of the panel). **B.** Specific location of each fossil locality found in the Amagá Formation. Each number represents a fossil locality (e.g., 1 is fossil locality Schönfeld X1). For all the names of the localities and their respective numbers, please read **table 1**. The ochre color represents the Lower Member of the Amagá Formation and the yellow color represents the Upper Member of the Amagá Formation. The geological distribution of the Amagá Formation is based on Grosse's geological map (1926).

Ma) (Sosdian & Lear, 2020) in the Neotropic. Besides, given the location in northern South America, these fossils would also allow us to decipher the paleoenvironments of this basin and how they were related to the formation of the Isthmus of Panama (Montes *et al.*, 2015). In this context, we have compiled all the possible fossil localities and fossil beds reported in the Amagá Formation to develop a spatial framework for paleontologists who want to find and study macrofossils in this sedimentary succession.

Methods

We searched for all written sources, including peer-reviewed papers and undergraduate theses mentioning macrofossils in the Amagá Formation. With this information, we generated a map that includes all the macrofossil sites in the formation's Lower and Upper members (Figure 1). Then, using the R (R Core Team 2021) package SDAR (Ortiz *et al.*, 2020), we digitized all the measured sedimentary successions with macrofossils found in the Amagá Formation: Sinifaná (Silva-Tamayo *et al.*, 2008), Cinco-Venecia (Silva-Tamayo *et al.*, 2008), Palomos (Silva-Tamayo *et al.*, 2008), La Naranjala (Henao, 2012), Sabaleticas (Páez-Acuña, 2013), Sabaletas (Páez-Acuña, 2013), and Palmichala (Páez-Acuña, 2013) including the stratigraphic position of their fossil beds (Figure 2) (for a more detailed resolution see Appendix 1, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1896/3388>). Next, we determined the number of fossil beds in each fossil locality (Table 1). In the case of the El Plan locality, given that neither Grosse (1926) nor Schönfeld (1947) reported sedimentary logs, we counted two fossil beds because specimens were surveyed at two different sandstone beds (Grosse, 1926). On the other hand, each macrofossil reported by Schönfeld (1947) in the Amagá Formation is located at different coordinates (Figure 1); therefore, we assumed that every macrofossil was found in a separate bed. Next, using the sedimentary logs (when available) and the lithological information reported in all the works considered, we assigned the lithology to each fossil bed and recorded the type of fossil found (Table 2). Finally, we did a t-test to verify if there was a sampling bias in the number of fossil beds related to the differences in thickness among the used sedimentary logs measured in the Lower and the Upper members of the Amagá Formation.

Results

Reports of fossil beds in the Amagá Formation were found in three papers (Grosse, 1926; Schönfeld, 1947; Silva-Tamayo *et al.*, 2008) and two undergraduate theses (Henao, 2012; Páez-Acuña, 2013). Our results show 23 fossil localities in the Amagá Formation: 14 in the Lower Member and nine in the Upper Member (Figure 1, Table 1). We found at least 95 fossil beds throughout the Amagá Formation. Specifically, 79 are distributed through 14 fossil localities in the Lower Member. On the other hand, 16 fossil beds along the Upper Member are found in nine fossil localities (Table 1).

The fossil beds in the Lower Member are found mainly in three sedimentary successions: La Naranjala (32 fossil beds), Palomos (24 fossil beds), and Sinifaná (12 fossil beds) (Table 2). On the other hand, only four localities at the Upper Member have more than one fossil bed: Sabaleticas (5 fossil beds), Cinco-Venecia (2 fossil beds), El Plan (2 fossil beds), and Palmichala (2 fossil beds) (Table 2). Based on the sedimentary successions used here, the average thickness of the Lower and Upper member successions are 241.6 m and 249.4 m, respectively (for the thickness of each sedimentary succession, please consult Appendix 1, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1896/3388>). Therefore, there is no significant difference in thickness among the members of the Amagá Formation ($t = -0.14391$, $p\text{-value} = 0.88$).

Our results also evidenced that the fossil content in the Amagá Formation is composed of four main terrestrial macrofossil groups (Table 2): leaves (73%), wood (24%), gastropods (2%), and vertebrates (1%). Besides, macrofossils were found among three types of lithologies: sandstones (54%), coal beds (26%), and mudstones (20%) (Table 2). Fossil leaves were found mainly in sandstones (72%) and minor percentages in mudstones and

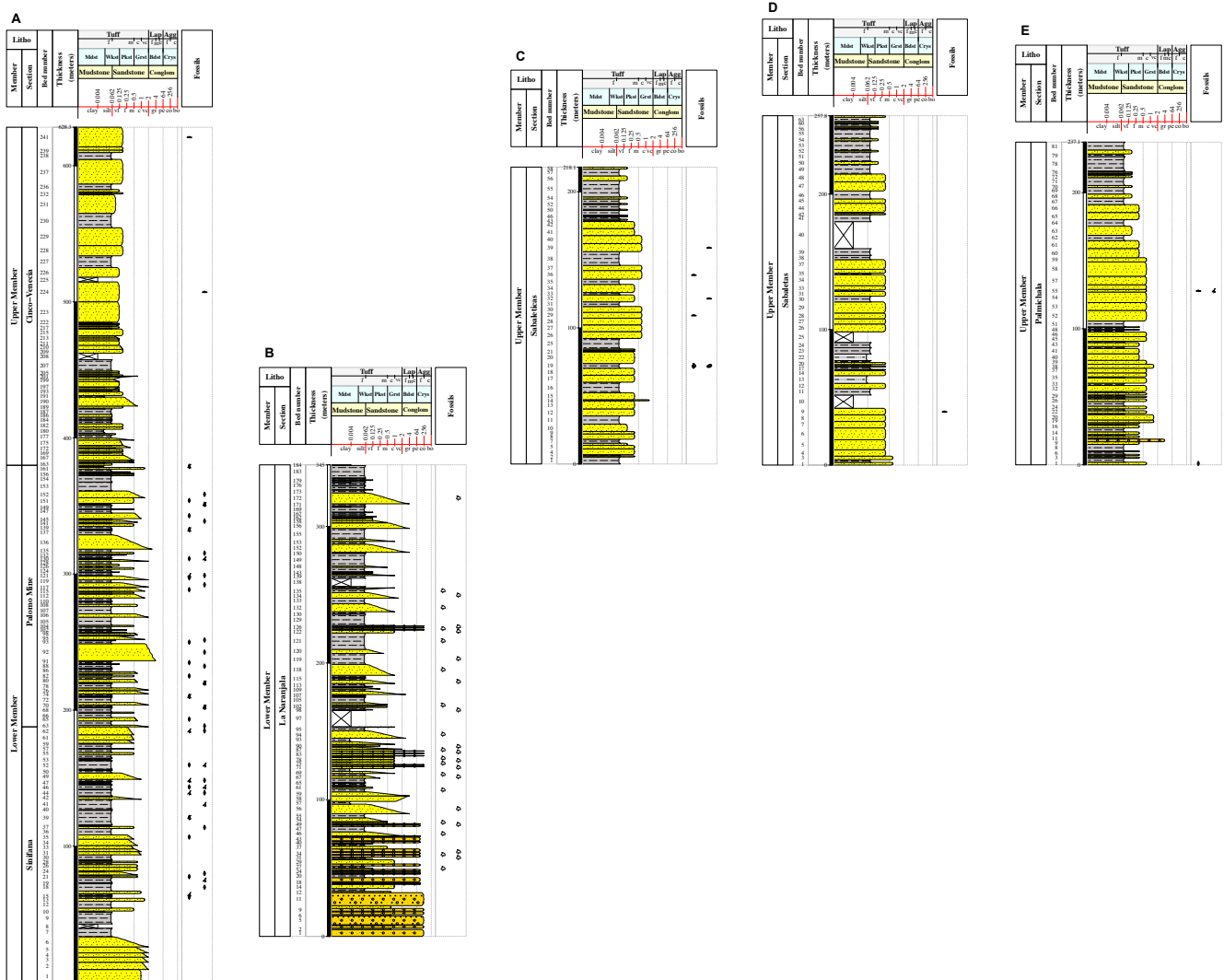


Figure 2. Sedimentary logs of the fossil localities of Sinifaná (Silva-Tamayo *et al.* 2008), Palomos (Silva-Tamayo *et al.* 2008), Cinco-Venech (Silva-Tamayo *et al.* 2008), La Naranjala (Henoa, 2012), Sabaleticas (Paéz-Acuña, 2013), Sabaletas (Paéz-Acuña, 2013), and Palmichala (Paéz-Acuña, 2012). The base of the Upper Member of the Amagá Formation was used to correlate the logs. For a detailed sedimentary log of each locality, please read Appendix 1.

coal layers (24% and 14%, respectively) (Table 2). Fossil wood was found in coal layers (65%) and sandstones (35%) (Table 2), gastropods and vertebrates in sandstones at the El Plan and Sabaleticas localities, and gastropods in mudstones (Table 2). Although the number of fossil localities and beds was higher in the Lower Member than in the Upper Member (Tables 1 and 2), the percentages of fossils located in the different lithologies among the Lower and the Upper Members were very similar: sandstones, 53% and 56%, respectively; coal layers 27% and 25%, respectively, and mudstones, 20% and 19%, respectively (Table 2).

Discussion

Why are there more fossil beds in the Lower Member?

In the Late Oligocene, the Lower Member recorded a depositional change regime among braided to meandering fluvial systems as the accommodation space increased likely caused

Table 1. Geographical and stratigraphical locations of the fossil localities and the fossil beds among the Amagá Formation.

Map code	Fossil locality	Authors	Lat	Long	Stratigraphic position	Fossil beds
1	Schonfeld X 1	Schonfeld (1947)	6.505788	-75.791763	Lower member	1
2	Schonfeld X 2	Schonfeld (1947)	6.478594	-75.750639	Lower member	1
3	Schonfeld X 3	Schonfeld (1947)	6.453942	-75.743829	Lower member	1
4	Schonfeld X 4	Schonfeld (1947)	6.222358	-75.833082	Lower member	1
5	Schonfeld X 5	Schonfeld (1947)	6.089032	-75.786298	Lower member	1
6	Schonfeld X 11	Schonfeld (1947)	6.086504	-75.701756	Lower member	1
7	Schonfeld X 6	Schonfeld (1947)	6.081238	-75.768577	Lower member	1
8	Schonfeld X 12	Schonfeld (1947)	6.068584	-75.699152	Lower member	1
9	Schonfeld X 13	Schonfeld (1947)	6.060974	-75.707914	Upper member	1
10	Schonfeld X 14	Schonfeld (1947)	6.057300	-75.708640	Upper member	1
11	Schonfeld X 15	Schonfeld (1947)	6.048100	-75.689959	Lower member	1
12	Sinifana	Silva-Tamayo <i>et al.</i> (2008)	6.008238	-75.763604	Lower member	12
13	Schonfeld X 7	Schonfeld (1947)	6.006255	-75.746909	Upper member	1
14	Schonfeld X 8	Schonfeld (1947)	5.990373	-75.758716	Lower member	1
15	Palomos	Silva-Tamayo <i>et al.</i> (2008)	5.971600	-75.687400	Lower member	24
16	Schonfeld X 9	Schonfeld (1947)	5.962603	-75.756019	Upper member	1
17	El cinco - Venecia	Silva-Tamayo <i>et al.</i> (2008)	5.958100	-75.702700	Upper member	2
18	El plan	Grosse (1926)	5.939550	-75.665000	Upper member	2
19	La Naranjala	Henaó (2012)	5.903012	-75.640209	Lower member	32
20	Schonfeld X 10	Schonfeld (1947)	5.848233	-75.603104	Lower member	1
21	Sabaleticas	Páez-Acuña (2013)	5.806800	-75.589400	Upper member	5
22	Sabaletas	Páez-Acuña (2013)	5.676600	-75.600000	Upper member	1
23	Palmichala	Páez-Acuña (2013)	5.624900	-75.604900	Upper member	2

by the breakup of the Farallon Plate. On the other hand, during the Early-Middle Miocene, the Upper Member evidenced a switch in the depositional pattern from meandering to braided fluvial systems, given the decrease in the accommodation space expected by the Early Miocene change from oblique to orthogonal convergence between the Nazca and South American plates and the docking of the Panamá-Chocó Block to northern South America (Lara *et al.*, 2018; Silva-Tamayo *et al.*, 2020). Therefore, the Lower Member had a higher fossil preservation potential considering the high burial capacity due to the combination of the accommodation space, the sediment supply, and a higher frequency of low-energy and low-oxygen environments (e.g., coal swamps, flood plains) developed in a meandering tropical system. Our results agree with the expected pattern, given that the number of fossil beds is five times higher in the Lower Member than in the Upper Member (Table 2). Besides, they show that the number of fossil beds is not biased by the thickness of the sedimentary successions since there is no significant difference between the measured extent of the Lower and the Upper members.

Table 2. Fossil content and lithological information about the fossil beds in each fossil locality.

Fossil locality	Fossiliferous beds	Leaves	Wood	Molluscs	Vertebrates	Sandstone	Coal	Mudstone	Stratigraphic position
Schonfeld X 1	1	0	1	0	0	0	1	0	Lower member
Schonfeld X 2	1	0	1	0	0	0	1	0	Lower member
Schonfeld X 3	1	0	1	0	0	0	1	0	Lower member
Schonfeld X 4	1	0	1	0	0	0	1	0	Lower member
Schonfeld X 5	1	0	1	0	0	0	1	0	Lower member
Schonfeld X 11	1	0	1	0	0	0	1	0	Lower member
Schonfeld X 6	1	0	1	0	0	0	1	0	Lower member
Schonfeld X 12	1	0	1	0	0	0	1	0	Lower member
Schonfeld X 13	1	0	1	0	0	0	1	0	Upper member
Schonfeld X 14	1	0	1	0	0	0	1	0	Upper member
Schonfeld X 15	1	0	1	0	0	0	1	0	Lower member
Sinifana	12	12	0	0	0	5	0	7	Lower member
Schonfeld X 7	1	0	1	0	0	0	1	0	Upper member
Schonfeld X 8	1	0	1	0	0	0	1	0	Lower member
Palomos	24	24	0	0	0	11	10	3	Lower member
Schonfeld X 9	1	0	1	0	0	0	1	0	Upper member
El cinco - Venecia	2	0	2	0	0	2	0	0	Upper member
El plan	2	0	0	1	1	2	0	0	Upper member
La Naranjala	32	32	0	0	0	26	0	6	Lower member
Schonfeld X 10	1	0	1	0	0	0	1	0	Lower member
Sabaleticas	5	0	4	1	0	4	0	1	Upper member
Sabaletas	1	0	1	0	0	1	0	0	Upper member
Palmichala	2	1	1	0	0	2	0	0	Upper member

Where were these fossil beds deposited?

Combining the stratigraphic position of the fossil beds in the Amagá Formation with the facies associations interpreted by **Silva-Tamayo *et al.*** (2008; 2020), it is possible to postulate that the fossil beds accumulated at the Lower Member in a meandering fluvial system are likely situated at crevasse (sandstones) facies associations and humid flood plains (mudstones) in the La Naranjala locality (**Appendix 1**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1896/3388>). Fossil beds at Sinifaná and Palomos localities are possibly related to crevasse facies associations (thick to very thick fine-medium sandstone with primary sedimentary structure beds), humid flood plains (laminated/massive mudstones), and swamps (coal layers) (**Appendix 1**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1896/3388>). On the other hand, fossil beds found in the Upper Member (Sabaleticas, Cinco-Venecia, Palmichala, and Sabaletas localities) are likely to be situated at facies associations interpreted as channel braided rivers (thick to very thick massive sandstone beds), crevasse (thick to very thick fine-medium sandstone with primary sedimentary structure beds), and humid floods (laminated/massive mudstones) in a braided fluvial system (**Appendix 1**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1896/3388>).

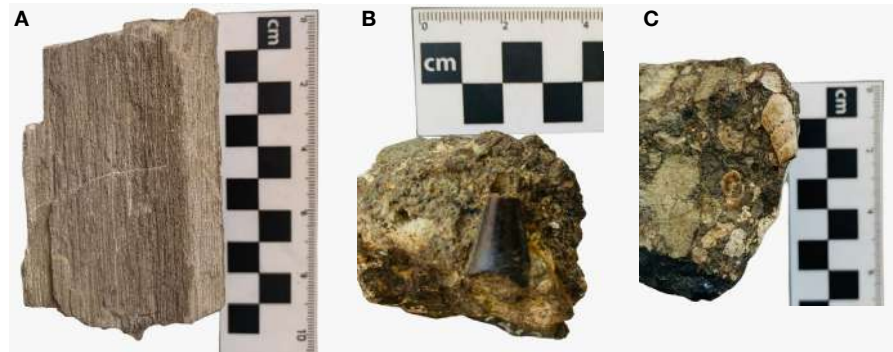


Figure 3. Photographs of some fossils collected by **Grosse** (1926). **A.** Fossil wood. **B.** Crocodile tooth, according to **Grosse** (1926). **C.** *Hemisinus* sp. (terrestrial gastropod) according to G. Steinmann (pers. comm. in **Grosse**, 1926). Not all the fossils collected by Grosse during his extensive fieldwork in Antioquia (**Grosse**, 1926) are taxonomically classified. Their repository is at the *Museo de Geociencias, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*.

The localities reported by **Grosse** (1926) and **Schönfeld** (1947) do not have detailed descriptions of the sedimentary successions. Therefore, inferring the depositional characteristics of the fossil beds at the El Plan and Schönfeld-X1 to -X15 localities is impossible.

Why should we care about the fossils of the Amagá Formation?

According to our results, the fossil assemblage at the Amagá Formation comprises leaves, wood, gastropods, and a crocodile tooth, listed from major to minor components.

Fossil leaves, wood, and terrestrial vertebrates have been fundamental to determining the type of forests, paleotemperatures, and CO₂ levels in the Neotropics (e.g. **Wing et al.**, 2009; **Head et al.**, 2009; **Carvalho et al.**, 2011; **Londoño et al.**, 2018; **Martínez et al.**, 2021; **Giraldo et al.**, 2021). Moreover, these empirical fossil data have constrained global and regional climatic models (e.g., **Martínez et al.**, 2020). Therefore, the systematic study of the fossil content of the Amagá Formation could enhance our knowledge of the floristic and faunistic composition and the biologic and paleoclimatic evolution of the Neotropical biomes during the Late Oligocene (~28 to ~23 Ma; Lower Member) and Early-Middle Miocene (~23 to ~11 Ma; Upper Member). Furthermore, terrestrial gastropods have also been essential for paleoenvironmental reconstructions in the Early Miocene (~18 to 14 Ma; Huesser Horizon) of the Neotropics (**Gómez et al.**, 2009). However, in the Amagá Formation, a further use could be to constrain the current uplift hypothesis of the Panamá Isthmus (**Montes et al.**, 2015). According to **Grosse** (1926) and **Paéz-Acuña** (2013), the gastropods found in the Upper Member of the Amagá Formation (El Plan and Sabaleticas localities, respectively) belong to the genus *Hemisinus* (*Longiverena*). This genus has also been found in the Oligocene of Colombia (Mugrosa Formation in the Middle Magdalena Valley) (**Pilsbry & Olsson**, 1935) and Panamá (Bohio Formation) (**Woodring**, 1957) and in the Miocene of Colombia (Castilletes Formation in the Cocinetas Basin, Guajira Peninsula) (**Hendy et al.**, 2015).

Conclusions

Although **Schönfeld's** (1947) work has been the only fossil report made by a trained paleontologist based on the Amagá Formation, here we show 23 fossil localities with 95 fossil beds along the Lower and the Upper members of this formation. Therefore, there is a tremendous potential for developing paleontological studies based on these rocks. Moreover, given that the sedimentary succession records an intramontane basin dominated by fluvial systems during the Late Oligocene (~28 to ~23 Ma) and the Early-Middle Miocene (~23 to ~11 Ma) (**Lara et al.**, 2018; **Silva-Tamayo et al.**, 2020), its

fossils could be critical to understanding the terrestrial biologic response of the Neotropics facing global climatic changes (i.e., Middle Miocene Climatic Optimum and the Middle Miocene climate transition) and regional tectonic changes (i.e., the formation of the Panama Isthmus). However, our study is an attention call to tropical paleontologists. It has been a century since **Grosse** (1926) showed that the Amagá Formation has exciting fossils (**Figure 3**), and still, paleontologists have not done the first systematic sampling of its fossil beds. We hope this paper will enhance the paleontological investigation of the Amagá Formation.

Supplementary material

See appendix 1 in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1896/3388>

Acknowledgments

We want to thank the *Semillero de Paleontología* at *Universidad EAFIT* and the *Museo de Geociencias* (MdG), at the *Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*, Laura Orozco for her help with the photos, and Daniel Quintana-Gaviria for his assistance at MdG. We also thank the anonymous reviewers.

Author contributions

A.C. designed and coordinated the research; J.D.G. and D.M. generated the dataset and performed the stratigraphic columns, and A.C. and M.W. led the writing process with the contribution of all co-authors.

References

- Carvalho, M. R., Herrera, F., Jaramillo, C., Wing, S. L., Callejas, R.** (2011). Paleocene Malvaceae from northern South America and their biogeographical implications. *American Journal of Botany*, 98(8), 1337-1355.
- Giraldo, L. A., Labandeira, C., Herrera, F., Carvalho, M.** (2021). Rich and specialized plant-insect associations in a Middle-Late Paleocene (58-60) Neotropical rainforest (Bogotá Formation, Colombia). *Ameghiniana*, 58(2), 75-99.
- Gómez, A. A., Jaramillo, C. A., Parra, M., Mora, A.** (2009). Huesser Horizon: A lake and a marine incursion in northwestern South America during the Early Miocene. *Palaios*, 24(4), 199-210.
- Grosse, E.** (1926). El Terciario Carbonífero de Antioquia. D. Reimer - E. Vohsen, Berlin.
- Head, J. J., Bloch, J. I., Hastings, A. K., Bourque, J. R., Cadena, E. A., Herrera, F., Polly, P. D., Jaramillo, C.** (2009). Giant boid snake from the Paleocene neotropics reveals hotter past equatorial temperatures. *Nature*, 457, 715-717.
- Henaó, J. E.** (2012). Estratigrafía y Petrografía de las Areniscas de la Secuencia Quebrada La Naranjala – Municipio de Fredonia Miembro Inferior de la Formación Amagá. Undergraduate Thesis. Universidad EAFIT. 61 pp.
- Hendy, A. J., Jones, D. S., Moreno, F., Zapata, V., Jaramillo, C.** (2015). Neogene molluscs, shallow marine paleoenvironments, and chronostratigraphy of the Guajira Peninsula, Colombia. *Swiss Journal of Palaeontology*, 134, 45-75.
- Ji, S., Nie, J., Lechler, A., Huntington, K. W., Heitmann, E. O., Breecker, D. O.** (2018). A symmetrical CO₂ peak and asymmetrical climate change during the middle Miocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 499, 134-144.
- Lara M., Salazar-Franco, A. M., Silva-Tamayo, J. C.** (2018). Provenance of the Cenozoic siliciclastic intramontane Amagá Formation: Implications for the early Miocene collision between Central and South America. *Sedimentary Geology*, 373, 147-162.
- Londoño, L., Royer, D. L., Jaramillo, C., Escobar, J., Foster, D. A., Cárdenas, A., Wood, A.** (2018). Early Miocene CO₂ estimates from a Neotropical fossil leaf assemblage exceed 400 ppm. *American Journal of Botany*, 105(11), 1929-1937.
- Martínez, C., Jaramillo, C., Correa-Metrío, A., Crepet, W., Moreno, J. E., Aliaga, A., ... Bush, M. B.** (20 autores) (2020). Neogene precipitation, vegetation, and elevation history of the Central Andean Plateau. *Science Advances*, 6(35), eaaz4724.

- Martínez, C., Jaramillo, C., Martínez-Murcia, J., Crepet, W., Cárdenas, A., Escobar, J., Moreno, F., Pardo-Trujillo, A., Caballero-Rodríguez, D.** (2021). Paleoclimatic and paleoecological reconstruction of a middle to late Eocene South American tropical dry forest. *Global and Planetary Change*, 205, 103617.
- 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.
- Ortiz, J., Jaramillo, C.** (2020). SDAR: Stratigraphic Data Analysis. R package version 0.9-55.
- Páez-Acuña, L. A.** (2013). Análisis Estratigráfico y de Proveniencia del Miembro Superior de la Formación Amagá en los Sectores de La Pintada y Valparaíso (Cuenca Amagá, Andes Noroccidentales). Undergraduate Thesis. Universidad EAFIT. 165 pp.
- Pekar, S. F., DeConto, R. M., Harwood, D. M.** (2006). Resolving a late Oligocene conundrum: Deep Sea warming and Antarctic glaciation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 231(1-2), 29-40.
- Pilsbry, H. A., Olsson, A. A.** (1935). Tertiary fresh-water mollusks of the Magdalena embayment, Colombia. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 87, 7-39.
- R Core Team.** (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Schönfeld, G.** (1947). Hölzer aus dem Tertiär von Kolumbien. *Abh. Senckenberg, Naturf. Ges.*, 475, 1-53.
- Sierra, G. M., Marín-Cerón, M. I.** (2011). Amagá Cauca and Patía basins. In F. Cediél (Ed.), *Petroleum Geology of Colombia* (pp. 1-104). Agencia Nacional de Hidrocarburos and Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Silva-Tamayo, J. C., Sierra, G. M., Correa, L. G.** (2008). Tectonic and climate driven fluctuations in the stratigraphic base level of a Cenozoic continental coal basin, northwestern Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 26(4), 369-382.
- Silva-Tamayo, J. C., Lara, M., Salazar-Franco, A. M.** (2020). Oligocene – Miocene Coal-Bearing Successions of the Amagá Formation, Antioquia, Colombia: Sedimentary Environments, Stratigraphy, and Tectonic Implications. In J. Gómez & D. Mateus-Zabala (Eds.), *The Geology of Colombia* (pp. 331-353). Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 37.
- Sosdian, S. M., Lear, C. H.** (2020). Initiation of the Western Pacific warm pool at the Middle Miocene Climate Transition? *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 35(12), e2020PA003920.
- Wing, S. L., Herrera, F., Jaramillo, C., Gómez-Navarro, C., Wilf, P., Labandeira, C. C.** (2009). Late Paleocene fossils from the Cerrejón Formation, Colombia, are the earliest record of Neotropical rainforest. *PNAS*, 106(44), 18627-19632.
- Woodring, W. P.** (1957). Geology and Paleontology of Canal Zone and Adjoining Parts of Panama. *United States Survey Professional Paper*, 306(A), 1-145.

Essay

Deciphering the footprint of Emil Grosse from Germany to Brazil: a brief review

Siguiendo la huella de Emil Grosse entre Alemania y Brasil: una breve reseña

✉ Felipe Velásquez-Ruiz^{1,2,*}, ✉ Marion Weber-Scharff², ✉ Federico Cuadros-Jimenez³

¹ Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas - FCFM, Universidad de Chile, Santiago, Chile,

² Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia

³ Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

Abstract

After the German geologist Emil Jakob Grosse concluded his work as head of the General Geological Commission of Colombia in April 1931, he lived and worked between Germany and Brazil, where his record has been largely unknown to the present date. In this contribution, we document some historical aspects of his life and briefly review Emil Grosse's trajectory from Germany to Brazil. The oldest record of Emil Grosse in Brazil dates from August 20, 1936, when he worked at the "Fábrica mine" until 1939. The Fábrica mine contains an iron deposit located southeast of the São Francisco Craton in what is now known as Quadrilátero Ferrífero, within the municipality of Ouro Preto. Grosse worked in a hematite ore site located in a banded iron formation (BIF), but there is no record of him having worked in the coal deposits. Years after, in 1946, the Fábrica mine changed owners and name to Ferteco, a subsidiary of the German corporation Industriegewerkschaft Bergbau, with headquarters in Bochum, Germany, where Grosse possibly worked to validate the deposit. In the 1940s, Grosse lived between the steelworks town of Peine, Germany, and Belo Horizonte, Brazil. There is a record of his trip in the middle of the Second World War on October 26, 1942. In 1946, his work on the Fábrica mine was finally published in Volume XI (No. 62) of the Brazilian journal *Mineração e Metalurgia*. Later, on August 18, 1949, Grosse obtained his permanent visa through the mediation of the Brazilian Military Mission and the German control council. Finally, he settled in Würzburg, Germany, where in 1971, he died at the age of 91.

Keywords: Geological heritage; Emil Grosse; Mining history; Brazil; Germany.

Resumen

Después de finalizar su trabajo como jefe de la Comisión Geológica General de Colombia en abril de 1931, el geólogo alemán Emil Jakob Grosse vivió y trabajó entre Alemania y Brasil, donde el registro de su presencia se había perdido hasta la actualidad. En este estudio documentamos algunos aspectos históricos de su vida y elaboramos una breve reseña de sus viajes entre Alemania y Brasil. El registro más antiguo de Emil Grosse en Brasil data del 20 de agosto de 1936, en la mina Fábrica donde trabajó hasta 1939. La mina Fábrica contiene un depósito de hierro situado al sureste del Cratón São Francisco, en lo que ahora se conoce como Quadrilátero Ferrífero, dentro del municipio de Ouro Preto. Grosse trabajó en un depósito de hematita localizado en una formación de hierro bandeado (BIF), pero no se tiene registro de que haya trabajado en los depósitos de carbón de la zona. Después de 1946 la mina Fábrica cambió de propietario y de nombre, a Ferteco (abreviación portuguesa de hierro y carbón), que era una subsidiaria de la corporación alemana Industriegewerkschaft Bergbau, con sede en Bochum, Alemania Occidental, donde Grosse probablemente trabajaba para validar el depósito. En la década de 1940, Grosse vivió entre la ciudad de Peine, en Alemania, conocida por su industria siderúrgica, y Belo Horizonte, Brasil, donde hay un registro de su viaje en plena Segunda Guerra Mundial, el 26 de octubre de 1942. En 1946 el estudio que realizaba en la mina Fábrica

Citation: Velásquez-Ruiz F, Weber-Scharff M, Cuadros-Jimenez F. Deciphering the footprint of Emil Grosse from Germany to Brazil: a brief review. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 47(185):952-961, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1908>

Guest editor: María Isabel Marín

***Corresponding autor:**
Felipe Velásquez-Ruiz Email;
fevelasquezru@gmail.com

Recibido: April 21, 2023

Aceptado: July 24, 2023

Published on line: August 22, 2023



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

finalmente se publicó en el volumen XI (N° 62) de la revista brasileña *Mineração e Metalurgia*. Posteriormente, el 18 de agosto de 1949, Grosse obtuvo su visa permanente por intermediación de la misión militar brasileña y el consejo de control alemán. En la posguerra se estableció en Wurzburg, Alemania, donde en 1971 falleció a la edad de 91 años.

Palabras clave: Patrimonio geológico; Emil Grosse; Historia de la minería; Brasil; Alemania.

Introduction

Emil Jakob Grosse was a German geologist who worked in Colombia during the early 1920s. His seminal work in the country was the *Estudio geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la cordillera Central de Colombia, entre el río Arma y Sacaoyal* (Grosse, 1926). The study (hereinafter referred to as TCA) is one of Colombia's most important mapping works at the beginning of the 20th century, and it was considered at that time a wide-ranging, rigorous, and systematic geologic work (Velásquez Ruiz *et al.*, 2021). Later, Emil Grosse was appointed as head of the Colombian General Geological Commission until 1931 (Espinosa Baquero, 2016; Zuluaga, 2005), when he left the country with no known records of return. After Emil Grosse's stay in Colombia, the track of his activities was almost lost, with some news of a possible visit to Brazil, which for the date, and due to the situation during World War II (1939 – 1945), was obviously difficult to establish for sure. Nevertheless, relatively little is known of Grosse's life outside Colombia. Here we present recent research on Emil Grosse's life and work in Brazil after leaving our country.

Grosse's family background and life in Germany before 1920

At an early age, Emil Grosse's childhood and youth in Germany were closely linked to iron and coal mining, but before we embark on his early life, it is relevant to inquire into his family origins. Both Emil Grosse's paternal and maternal grandparents were from what today is the Neunkirchen region, located in Saarland, southwestern Germany, near the border with France. This is an iron and coal mining region where these strategic minerals started to be intensively produced after the industrial revolution (Deutsche Welle - DW, 2007). The paternal grandparents were Christian Grosse (born 1813) and Katharina Margarethe Ahlemann (born 1818) (Figure 1); they were married in Völklingen, Saarland,

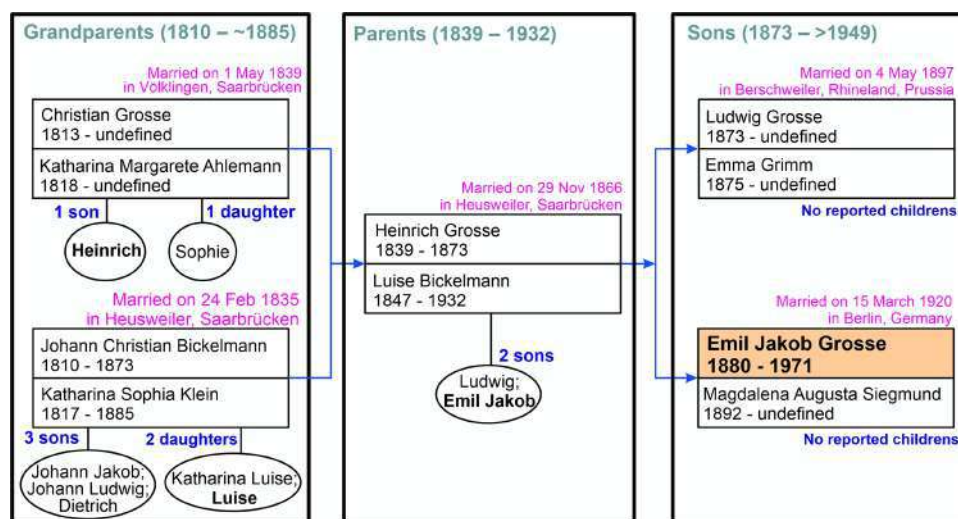


Figure 1. Grosse family tree. Three generations of Grosses are presented along with the age of birth and, in some cases, of death as well. The date and location of the marriage are also recorded (Family Search, 2023).

on May 1, 1839, and had two children, Heinrich (Emil Grosse's father) and Sophie Grosse (**Figure 1**). Grosse's maternal grandparents were Johann Christian Bickelmann (1810 - 1873) and Katharina Sophia Klein (1817 - 1885), who married on February 24, 1835, in Heusweiler, Saarland and had three sons (Johann Jakob, Johann Ludwig, and Dietrich), and two daughters (Katharina Luise and Luise, Emil Jakob's mother). Emil Grosse's middle name, Jakob, may be a reference to the older maternal uncle, Johann Jakob Bickelmann.

Emil Grosse's parents, Heinrich Grosse and Luise Bickelmann, married in Heusweiler on November 29, 1866 (**Figure 1**); later, they moved to the Saar region, where their two children, Ludwig and Emil Jakob Grosse, were born. Emil was born on December 6, 1880, in Heiligenwald, Rheinprovinz (today Saarland), where his father Heinrich worked as a mining foreman (**Grosse, 1908**), possibly in the local coal mines. Very likely, here, Emil Grosse became familiar from a very young age with iron mining and geology. He worked as a miner for half a year before starting his academic studies (**Grosse, 1908**). However, the mining heritage probably came from his grandparents, who settled in extractive areas where coal was mined.

After his school years at the Königliche Oberrealschule zu Saarbrücken (Royal Secondary School of Saarbrücken), Emil Grosse studied mining engineering at the Königlichen Bergakademie zu Berlin (Royal Mining Academy of Berlin) where he graduated in 1905 (**Grosse, 1908**). He did his military service for one year at the Garde-Pionier-Bataillon, and then he obtained his postgraduate degree and doctorate on June 5, 1908 (**Figure 2**) at Friedrich Wilhelm's Universität zu Berlin. Grosse's Ph.D. dissertation is titled "*Petrographische Untersuchungen jüngerer Ergussgesteine Mittelitaliens*" (Petrographic study of younger effusive rocks in central Italy) (**Figure 2a**). This may be evidence that despite his experience in mining, Grosse had a strong investigative sense for

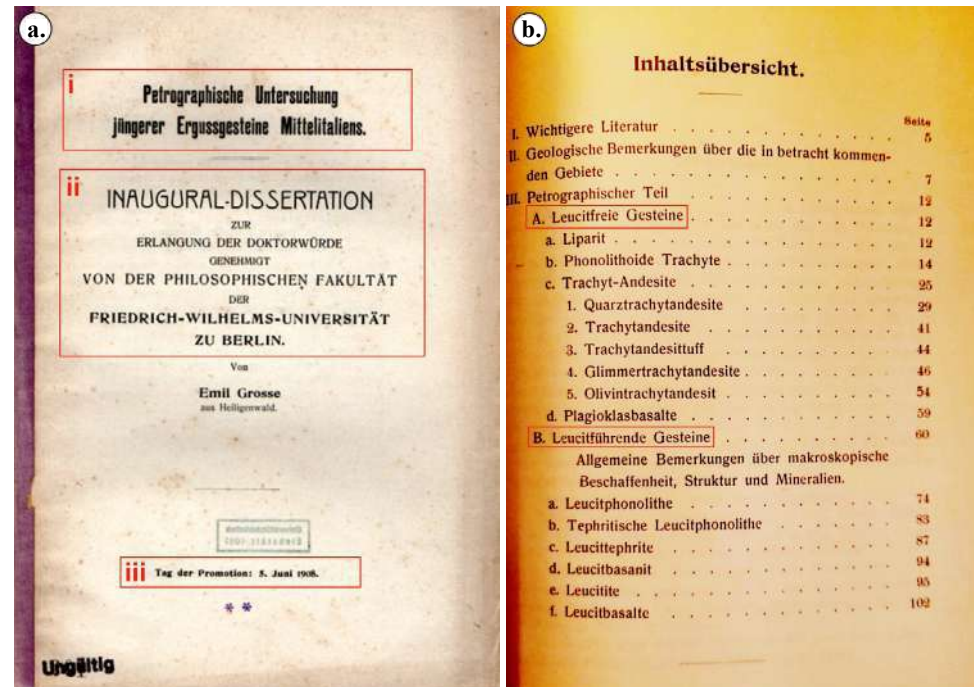


Figure 2. (a) Front page of Emil Grosse's doctoral dissertation thesis. Translation of key points: i-) Title "Petrographic study of younger volcanic extrusive rocks in Central Italy". ii-) Inaugural dissertation for obtaining the doctorate approved by the Philosophical Faculty of the Friedrich Wilhelm Universität zu Berlin. iii-) Day of his graduation: June 5, 1908. (b) Table of contents where the analyzed rocks in the doctorate thesis are mentioned subdivided into (A) rocks free of leucite and (B) rocks with leucite.

geology. The petrographic analysis of volcanic rocks in Grosse's doctoral thesis refers to rocks with and without leucite (**Figure 2b**). Leucite is a mineral phase of the feldspathoid group; due to its rarity, it is a petrogenetic indicator in potassic and ultrapotassic volcanic rocks (Velásquez Ruiz *et al.*, 2022) that outcrop in Italy as kamafugite lavas. The volcanic rocks he studied are perhaps what we know today as the central Apennine chain, where there is a variety of leucite-bearing kamafugite lavas from the San Venanzo volcanic complex, such as venanzites, mafurites, and melilitolite (Lustrino *et al.*, 2020).

After his doctorate degree, Grosse gained geological mapping experience in Africa, which he published in a report: *Grundlinien der Geologie und Petrographie des östlichen Katanga* (Baselines for the geology and petrography of eastern Katanga) resulting from a geological and mining expedition in 1911 and 1912 in what today is the Democratic Republic of the Congo.

Probably during his stay in Berlin, Emil Grosse met Magdalena Augusta Siegmund, a telephone operator, born in 1892 in Kreuzburg, Upper Silesia (today Poland); they married in Berlin on March 15, 1920 (**Figure 3**), just five months before arriving in Medellín, on

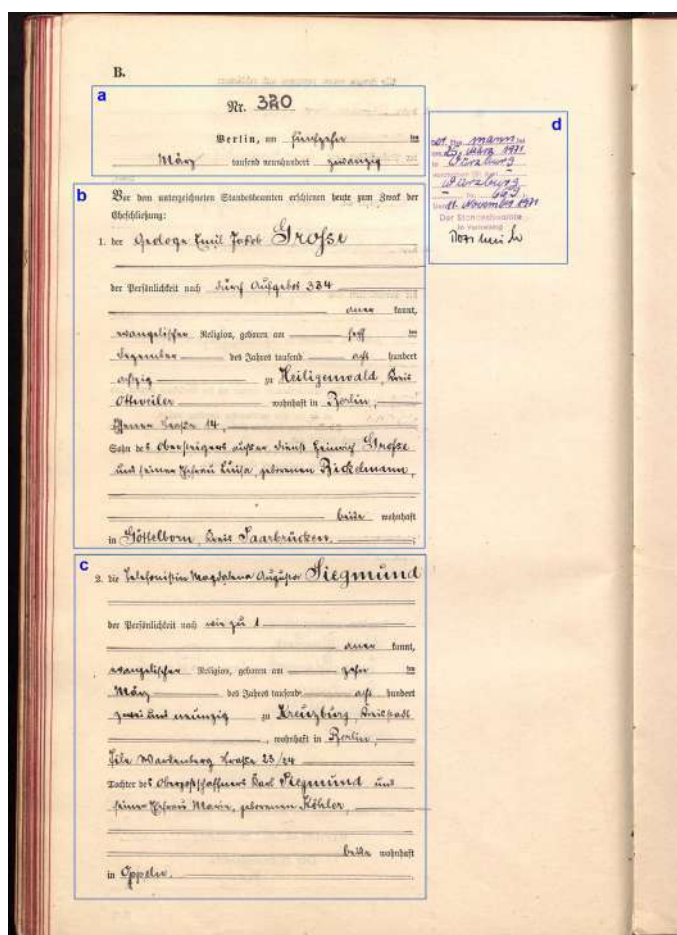


Figure 3. Marriage certificate of Emil Grosse and Magdalena Augusta Siegmund. Key points from the English transcription state: **(a)** Date of the wedding: March 15, 1920. **(b)** Personal details of Emil Grosse: Geologist, protestant, born on December 5, 1880, in Heiligenwald, Ottweiler District, son of a retired mining foreman, Heinrich Grosse, and his wife Luise Bickelmann, both living in Göttelborn, Saarbrücken District. **(c)** Personal details of Magdalena Auguste Siegmund: telephone operator, protestant, born on March 10, 1892, in Kreuzburg, daughter of postman Karl Siegmund and his wife, Marie Köhler, both living in Oppereln. **(d)** The husband passed away on March 25, 1971, in Würzburg (Family Search, 2023).

August 23, 1920 (Zuluaga, 2005). Grosse's stay in Colombia between 1920 and 1931 is not part of the scope of this article, so it will not be examined in depth. However, it is necessary to mention that Professor Dr. Robert Scheibe, who was one of his lecturers at the *Königlichen Bergakademie zu Berlin*, recommended Emil Grosse to the Honorable Departmental Assembly of Antioquia to carry out geological studies in Antioquia as stated in the Ordinance No. 16 of April 6, 1918 (Velásquez Ruiz *et al.*, 2021). Thus, between 1920 and 1923, Emil Grosse carried out the field work for his classic study on Colombian geology, which was published in 1926 (Grosse, 1926). Then he was appointed as the head of the General Geological Commission of Colombia until 1931 (Espinosa Baquero, 2016; Zuluaga, 2005).

Grosse's life in Brazil between 1936 and 1939

The first record of the arrival of Emil Grosse in Brazil is documented in the maritime registry sealed by the State of Rio de Janeiro (Figure 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1908/3404>). The registry, issued by the Rio de Janeiro Foreigners Registration Service, is dated October 26, 1942, and states that: "the German passport No. 291R/293/36 is issued in Berlin on July 16, 1936, given the visa No. 1067 in the consulate of the United States of Brazil in Berlin on July 20, 1936, and arrives in Rio de Janeiro on August 20, 1936, translated under decree CE 3232 of the Ministry of Justice and Internal Affairs, issued on October 5, 1939, in photostatic copy" (referring to Grosse's passport and visa). The document also states that: "He has an identity card mode 19, issued under the terms of article 24 c/c 150 §1° of decree 3010/38, n° 868/206.314, by the authorities of Belo Horizonte, where he resided, in Anginhas do Campo" (Figure 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1908/3404>). Finally, it says: "On the respective Minas Gerais ID card the following annotation was made: it was presented the decree No. CE/3232, issued on October 5, 1939, by the Ministry of Justice, which bestows upon the bearer a permanent permission".

This information gives us a clearer picture of Emil Grosse's track between Germany and Brazil in the 1930s: He arrived for the first time on August 20, 1936, in Rio de Janeiro with permission to stay legally in Brazil until October 5, 1939. Once there, he is transferred to the State of Minas Gerais, where he worked between 1937 and 1939 at Fábrica Mine, an iron mine located in the jurisdiction of Ouro Preto Municipality. There is evidence of his stay there in volume XIV, No. 79 (May to July 1949) of the Brazilian journal *Mineração e Metalurgia* (Figure 4), where figure 6 on page 6 mentions that "this material was discovered between 1937 and 1939 by the German geologist Emil Grosse, in charge of the research studies of these iron ores". On the other hand, Barbosa (1949) also points out that "on the occasion, the Second Panamerican Congress of Geology and Mining Engineering was being held. During this event, the results of Grosse's studies were presented as mentioned in the *Mineração e Metalurgia* journal (No. 62, Vol. XI, August 1946) (Figure 4).

Grosse had a temporary visa with legal permission to be in Brazil until October 5, 1939, so he returned to Germany that year. The fact that his wife Magdalena Augusta Siegmund obtained her German passport on January 25, 1938, in Berlin and, later, on March 29, 1939, a temporary visa to Brazil at this country's consulate in Berlin is also documented (Figure 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1908/3404>). Magdalena probably arrived in Brazil for the first time with Grosse (Grosse's second visit) after March 29, 1939. It is not clear if they were there before or during the beginning of World War II. Emil Grosse had at least one son (information from the "Obituaries, Main-Post Number 72, Sunday 27th of March 1971, Stadtarchiv Würzburg, Germany), although Magdalena did not report any in the Brazilian visa where she states having no children under the age of 18 (Magdalena being 46 years old).



Figure 4. Volume XIV, No. 79 of the *Mineração e Metalurgia* journal (Barbosa, 1949) describes the geology of the Congonhas do Campo Region. In one of the footnotes, we can read that “this material was discovered between 1937 and 1939 by the German geologist E. Grosse, who was in charge of the research studies of these iron ores”.

Background of the Fábrica/Ferteco Mine work

The results of Emil Grosse’s work between 1937 and 1939 at the Fábrica Mine were published in volume XI, No. 62 of the *Mineração e Metalurgia* journal (Mello & Grosse, 1946) under the title “Iron ore of the Fábrica Property of the Ferro e Carvão company S/A, District of São Julião, Municipality of Ouro Preto, State of Minas Gerais” (Figure 5). The Fábrica mine changed ownership after 1946, and the company also changed its name to *Ferteco* (Portuguese abbreviation for iron and coal). Ferteco was a subsidiary of the German *Industriegewerkschaft Bergbau*, a trade union established after de Second World War and headquartered in Bochum; Grosse probably worked there to validate the Ferteco deposit in Minas Gerais as a “Qualified Person” (QP). The issue also recorded that Grosse specifically worked the iron mineralization and, despite the fact that there was also coal, there is no record of additional work on this strategic material.

The Fábrica/Ferteco Mine is inserted in the Congonhas do Campo region, which has an area of 20 x 30 km, and is located southeast of the São Francisco craton (Cavalcanti *et al.*, 2023), in what is now known as the Quadrilátero Ferrífero (Iron Quadrilateral), a high-grade iron ore province (>64% Fe) with 600 million metric tons (Mt) reserves and inferred resources of 2100 Mt (Rosière *et al.*, 2008). The São Francisco Craton corresponds to an Archean-Proterozoic portion of a larger proto-craton called Paramirim (Almeida *et al.*, 1981). This piece of crust has stabilized since the beginning of the Phanerozoic (Heilbron *et al.*, 2017). Stratigraphically, the Quadrilátero Ferrífero groups the Minas Supergroup and includes three main subgroups: Piracicaba, Itabira, and Caraça, which are interpreted as a volcano-sedimentary sequence from a rift that changed to a passive margin basin (Dopico *et al.*, 2017). Emil Grosse studied the Itabira Group between 1937 and 1939. In Grosse’s time, the iron ore was called *itabirito*, which is a specific Brazilian designation for a banded iron formation (bif). According to Barbosa (1949), the name *itabirito* was used by V. Eschwege due to its proximity to the town of Itabira.

After Grosse’s publication in 1946 about the metallogenesis of iron ore from the Fábrica deposit, there are only a few records of papers citing Grosse’s work in Brazil (Barbosa, 1949; Dorr & Miranda, 1963; Guild, 1957). This Brazilian work was accomplished to



Figure 5. Volume XI, No. 62 of the *Mineração e Metalurgia* journal (Mello & Grosse, 1946) including the article entitled “Iron ore of the Fábrica Property of the Ferro e Carvão company S/A, District of São Julião, Municipality of Ouro Preto, State of Minas Gerais “. In the journal, Grosse’s name was mistyped as Grosse, which made it difficult to track him through Brazil.


calculate the amounts of iron mineralization, mainly hematite, hosted by a BIF of the Itabira Group. The calculated iron amount reaches a digit of 63.5 Mt of ore. Moreover, Grosse and his coauthor conclude that “of these reserves, according to numerous and systematic sieving tests carried out during the course of the survey, around 36.5 million tons correspond to ore in fragments larger than 5 mm, and 27.5 million tons to fine ore, less than 5 mm, which requires agglomeration.” (Mello & Grosse, 1946).

Hypothesis about Grosse’s experience in Germany and Brazil in the 1940s

The records show that Emil Grosse made at least two overseas trips during World War II (1939 – 1945). The first trip was from Brazil to Germany in the second semester of 1939 when his Brazilian visa ended (Figure 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1908/3404>). His wife traveled to Brazil on March 29, 1939, with a temporary visa (Figure 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1908/3404>). The second trip, on October 26, 1942, took Grosse from Germany to Brazil (Figure 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1908/3404>). Subsequently, in 1949, in the postwar period, he was granted a permanent visa. As shown in the documents in figure 6, the Allied authorities occupying Germany in the post-war did not find a reason to retain Emil Grosse in Germany. In the 1940s, Grosse’s address in Peine was Am Sackpfeifenberg 18, a miners’ housing development. Peine is known for its steel industry and nearby iron ore mines, and it is likely that Grosse worked in this industry. Lastly, the permanent visa in Brazil was granted in Berlin by the Brazilian Military Mission and the German Control Council on August 18, 1949, which means he traveled to Brazil after August 1949. Sometime after 1949, Grosse moved to Würzburg, Germany, where he died in 1971 at the age of 91. His wife survived him, as evidenced in the Obituaries section of the Main Post, Number 72, from Sunday, March 27, 1971 (Stadtarchiv Würzburg, Germany).

Thus, we have generated a map tracking Emil Grosse’s life (Figure 7), from his birth in Heiligenwald, Germany, on December 6, 1880, and his transfer to Berlin, where he finished his undergraduate studies on the volcanic rocks of Central Italy from 1904 to 1908, and gained mapping experience between 1911 and 1912. Later, he married Magdalena Siegmund on March 15, 1920, and made several trips to Colombia between 1920 and 1931, initially to work on the TCA and later at the Colombian Geological Commission.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA



ARQUIVO NACIONAL

FAMILYSEARCH

DIVISÃO POLÍCIA, MARÍTIMA, AÉREA E DE FRONTEIRAS
DPMAF – RJ

FICHAS CONSULARES

MAÇO Nº 15

NOTAÇÃO: BR.AN.RIO.OL.0.FCN,TMP. 180. 15. 1/190

REPÚBLICA DOS ESTADOS UNIDOS DO BRASIL
FICHA CONSULAR DE QUALIFICAÇÃO

Esta ficha, expedida em duas vias, será entregue à Polícia Marítima e à Imigração no porto de destino

Nome por extenso Emil Jakob GROSSE

Admitido em território nacional em caráter permanente ^{“ext^o 9”} (temporário ou permanente)

em virtude de recomendação nominal OR. autorização do Ministério das Relações Exteriores.

Lugar e data de nascimento 6-12-80 Heiligenwald/Saar

Nacionalidade alemã Estado civil casado

Filiação (nome do Pai e da Mãe) Heinrich Grosse e Louise nata Bickelmann Profissão geólogo

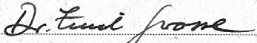
Residência no país de origem Am Sackpfeifenberg 18, Peine

NOME	IDADE	SEXO

FILHOS MENORES DE 16 ANOS

Temporary Travel Document n. 0038919 expedido pelas autoridades aliadas de ocupação da Alemanha na data de 28-6-49, Exit Permit n. N-65469

ASSINATURA DO PORTADOR



Missão Militar Brasileira junto ao Conselho de Controle da Alemanha

Berlim, em 18-8 de 19 49

NOTA - Esta ficha deve ser preenchida à máquina pela autoridade consular sendo as duas vias em original.

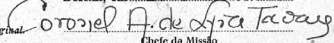


Figure 6. Consular record of the maritime entry of Emil Grosse to Brazil. It was sealed by the Brazilian military mission and the German control council in Berlin on August 18, 1949. The temporary Travel Document No. 0038919 was issued by the Allied authorities occupying Germany on June 28, 1949. The German passport (No. N-65469) was no longer used at that time; instead, an exit permit issued by the Allies was required.

Finally, from 1936 to 1971 he made at least three trips to Brazil, in 1939, in 1942, in the midst of World War II, and the last one in 1949, when he obtained a permanent resident visa. He later returned to Germany where he died in 1971 (**Figure 7**).

Conclusions

Emil Grosse's stay in Colombia had great scientific importance for his contribution to the study of "The Carboniferous Tertiary of Antioquia" while his work in Brazil was more oriented to industry. Historical records show that Grosse arrived in Rio de Janeiro on August 20, 1936, and made at least two trips in the midst of World War II, between 1939 and 1942. A likely hypothesis is that having worked at the iron deposits of Minas Gerais, where iron ore proved to be a strategic raw material for pre- and postwar times,

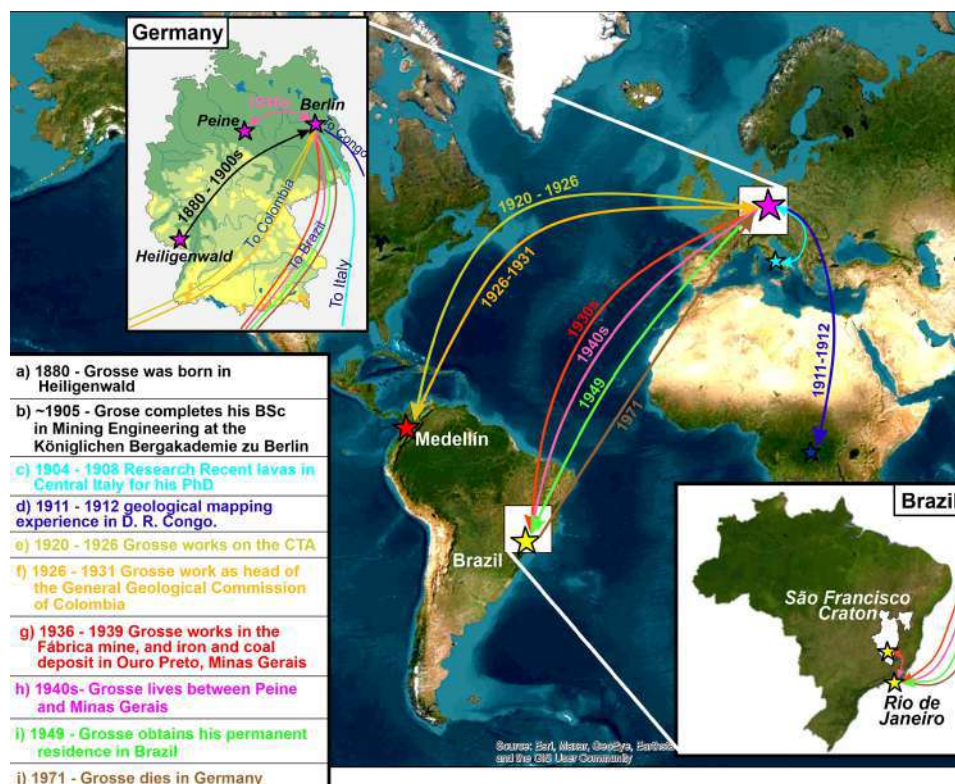


Figure 7. A summary of Emil Grosse’s track of routes between Germany, Italy, Congo, Colombia, and Brazil.

Emil Grosse was one of the few Germans that had the opportunity to travel in business missions. The fact that Grosse got a permanent visa on August 18, 1949 and that his post-war document was issued by the Allied Authorities occupying Germany means they had no reason to deny Grosse’s departure from Germany. It can be inferred, therefore, that there were no investigations for war crimes pending on him. Emil Grosse spent his final years in southern Germany, where he died in 1971.

Supplementary Information

See the supplementary information in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1908/3404>

Aknowledgements

The authors would like to thank Pablo Sierra Calderón for finding the first known photograph of Emil Jakob Grosse, finally giving a face to the name. We also thank Luis Hernán Sánchez for organizing this 100-year celebration, which has renewed our interest in studying Emil Grosse’s life. We would like to thank, as well, the editors of this special issue for inviting us to contribute. We are thankful to E. and W. Weber for their help in the translation of the Sütterlin Font. We would also like to thank the personnel at the Stadtarchiv Würzburg for their valuable and friendly help.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no financial or personal interest that may have influenced this work.

Authors' contributions

FVR, MES, and FCJ declare that they contributed equally to the bibliographic compilation and the drafting of the manuscript.

References

- Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., Fuck, R. A.** (1981). Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth Science Reviews*, 17(1-2), 1-21.
- Barbosa, O.** (1949). Contribuição à Geologia do Centro de Minas Gerais. *Mineração e Metalurgia*, XIV(79), 3-32.
- Cavalcanti, J. A. D., Silva, M. S., Schobbenhaus, C., Atencio, D., Lima, H. M.** (2023). Geoconservation of geological and mining heritage related to the banded iron formation of Itabira Group, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: A challenging issue. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 11, 118-148. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.12.002>
- Dopico, C. I. M., Lana, C., Moreira, H. S., Cassino, L. F., Alkmim, F. F.** (2017). U-Pb ages and Hf-isotope data of detrital zircons from the late Neoproterozoic Minas Basin, SE Brazil. *Precambrian Research*, 291, 143-161.
- Dorr, J. V. N., Miranda, A. L.** (1963). Geology and Ore Deposits of the Itabira District Minas Gerais, Brazil. Geological Survey Professional Paper 341-C.
- Deutsche Welle, DW.** (2007). The Rise and Fall of Germany's Coal Mining Industry. Deutsche Welle (DW). <https://www.dw.com/en/the-rise-and-fall-of-germanys-coal-mining-industry/a-2331545>.
- Espinosa-Baquero, A.** (2016). El Servicio Geológico Colombiano 1916 - 2016: Cien años al servicio de Colombia / Armando Baquero Espinosa. Servicio Geológico Colombiano (SGC).
- Family Search.** (2023). Genealogical chart of the Grosse-Bickelmann family. <https://www.familysearch.org/tree/pedigree/landscape/GDH7-YGN>.
- Grosse, E.** (1908). Petrographische Untersuchung jüngerer Ergussgesteine Mittelitaliens. Ph.D. Thesis, Friedrich Wilhelm Universität zu Berlin, German.
- Grosse, E.** (1926). *Estudio geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia, entre el río Arma y Sacaoyal, ejecutado en los años de 1920-1923.* Dietrich Reimer.
- Guild, P. W.** (1957). *Geology and Mineral Resources of the Congonhas District Minas Gerais, Brazil.* Geological Survey, 290.
- Heilbron, M., Cordani, U. G., Alkmim, F.** (2017). The São Francisco Craton and its margins. In Heilbron (Eds.), *Craton São Francisco, Eastern Brazil: Tectonic genealogy of a miniature continent.* Springer.
- Lustrino, M., Ronca, S., Caracausi, A., Ventura Bordenca, C., Agostini, S., Faraone, D.B.** (2020). Strongly SiO₂-undersaturated, CaO-rich kamafugitic Pleistocene magmatism in Central Italy (San Venanzo volcanic complex) and the role of shallow depth limestone assimilation. *Earth-Science Reviews*, 208 103256. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103256>
- Melo, A. V., Grosse, E.** (1946). O Minério de ferro da fazenda Fábrica da Companhia de Mineração de Ferro e Carvão S/A, Distrito de São Julião, Município de Ouro Preto, estado de Minas Gerais. *Mineração e Metalurgia*, XII (62), 105-115.
- Posada, J. C.** (1936). Bosquejo geológico de Antioquia. *Anales de la Escuela Nacional de Minas*, 38, 1-50.
- Rosière, C. A., Spier, C. A., Rios, F. J., Suckau, V. E.** (2008). The stabilities of the Quadrilátero Ferrífero and related high-grade iron ore deposits. *Reviews in Economic Geology*. pp. 223-254.
- Stadtarchiv Würzburg,** Neubaustraße 12 97070 Würzburg, Germany. Adressbücher 1960-1986 and Main-Post.
- Velásquez-Ruiz, F., Cordeiro, P., Reich, M., Motta, J.G., Ribeiro, C.C., Angerer, T., Bernardes, R.B.** (2023). The genetic link between kamacite magmatism and alkaline-carbonatite complexes in the Late Cretaceous Alto Paranaíba Igneous Province, Central Brazil, *International Geology Review*, 65(13), 2148-2170. <https://doi.org/10.1080/00206814.2022.2127127>
- Velásquez-Ruiz, F., Weber-Scharff, M., Botero-Fernández, V.** (2021). Historical Memory of the Geology of Antioquia: Emil Grosse and The Carboniferous Tertiary of Antioquia. *Boletín Geológico*, 48(2), 7-39. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.48.2.2021.570>
- Zuluaga, D., Castro, P., Weber, M., Tobón, J. I., Reyes, G.** (2005). *El Dr. Emil Grosse y la elaboración de un texto geológico en Antioquia.* Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (ACCEFYN). <https://repositorio.acefyn.org.co/handle/001/287>

Artículo original

Carbono en el Pacífico sudamericano: reservas en comunidades vegetales de un humedal costero en Perú

Carbon in the South American Pacific: discovering the reserves in vegetal communities of a coastal wetland in Perú

✉ Ronal Chavez¹, ✉ Héctor Aponte²

¹ Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

² Carrera de Biología Marina, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

Resumen

Los humedales costeros brindan diversos servicios ecosistémicos, entre ellos, el almacenamiento de carbono. En este estudio se cuantificó la reserva de carbono en las principales comunidades vegetales del humedal de Santa Rosa (Lima, Perú). Para ello, se hicieron 36 parcelas de 0,25 m² en las que se recolectó biomasa vegetal aérea y suelo en dos profundidades (0-10 cm; 10-20 cm). Posteriormente se cuantificó el porcentaje de carbono en las muestras y se escaló en función del área de cada formación vegetal. La cantidad de carbono almacenado en las comunidades de *Thypha domingensis* (totoral), *Schoenoplectus americanus* (juncal) y de vega mixta fueron 76,61 ± 26,87 TnC/ha, 75,29 ± 39,85 TnC/ha y 63,96 ± 25,81 TnC/ha, respectivamente, con un total entre estas tres comunidades de 2.703,02 TnC, que equivalen a 9,920,07 TnCO₂, valorizadas entre \$4960 y \$496.000 en el mercado voluntario mundial de carbono. Los resultados obtenidos, muestran la importancia ambiental y económica que este humedal tiene.

Palabras claves: Reserva de carbono; Servicios ecosistémicos; Comunidades vegetales; Valoración económica, mercado de carbono.

Abstract

Coastal wetlands provide several ecosystem services, among them carbon storage. In the present study, we quantified the carbon stock from the principal vegetal communities in the Santa Rosa wetland in Lima (Perú). We set 33 quadrats of 0.25 m² each, where we sampled aerial plant biomass and soil at two depths (0-10 cm; 10-20 cm). Then, we quantified the percentage of carbon based on the area of every plant community. The amount of carbon stored in the cattail, vega mix, and reed bed communities was 76.61 ± 26.87 TnC/ha, 75.29 ± 39.85 TnC/ha, and 63.96 ± 25.81 TnC/ha, respectively, for a total stock of 2,703.02 tons of carbon equaling 9,920.07 TnCO₂ whose value in the voluntary global market ranges from \$4,960 to \$496,000. These results show the environmental and economic importance of this wetland.

Keywords: Carbon stock; Ecosystem services; Plant communities; Economic value; Carbon market.

Introducción

Los humedales son ecosistemas intermedios entre el medio terrestre y el acuático (Paredes-García *et al.*, 2021) que brindan diversos servicios ecosistémicos como la provisión de hábitat, el control de la contaminación, la mitigación de inundaciones y tormentas, el mantenimiento de sedimentos y la regulación del clima por medio del almacenamiento y el secuestro de carbono (Sadat-Noori *et al.*, 2021). Este último servicio se logra principalmente por la acumulación de CO₂ atmosférico en la biomasa de la vegetación y en los suelos (Howard *et al.*, 2014). Las tasas de captura de carbono que presentan los ecosistemas de los humedales costeros (4,8 – 87,2 millones de TnC/año) son elevadas en comparación con los bosques tropicales (Howard *et al.*, 2017; Moritsch *et al.*, 2021). Debido a estas características,

Citación: Chavez R, Aponte H. Carbono en el Pacífico sudamericano: reservas en comunidades vegetales de un humedal costero en Perú. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185):962-976, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1925>

Editor: Sonia Moreno Guáqueta

***Correspondencia:**

Yan Ronal Chavez Soto;
ronalchavezso@gmail.com

Recibido: 8 de junio de 2023

Aceptado: 2 de octubre de 2023

Publicado en línea: 8 de noviembre de 2023



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

y gracias al Acuerdo de París, muchos países han incluido los humedales costeros en sus actividades de mitigación de gases de efecto invernadero (**Herr & Landis**, 2016). Más de la mitad (55 %) del carbono biológico captado en el mundo es capturado por los organismos vivos marinos (**Lovelock & Duarte**, 2019); este carbono se conoce como carbono azul y sus sitios de captura incluyen ecosistemas costeros como los manglares, los humedales costeros, las marismas, los pastos marinos y los arrecifes de coral (**Howard et al.**, 2017).

Estudios recientes indican que en el periodo entre 1970 y 2015 la superficie global cubierta por humedales naturales se redujo en un 35 %, a una tasa de -0,78 % (**Murray et al.**, 2019). Dicha pérdida se debe, principalmente, a actividades humanas como la agricultura, la acuicultura, la expansión urbana y el pastoreo, las cuales modifican los usos del suelo (**Adame et al.**, 2018). Todo ello desemboca en la pérdida de estos ecosistemas, con la consecuente alteración del carbono almacenado en sus suelos y el aumento de las emisiones de CO₂ a la atmósfera en tasas anuales que fluctúan entre el 3 y el 19 % (**Lovelock & Duarte**, 2019). El difícil acceso para los muestreos y la reducida área total de los humedales costeros (5-8 % de la superficie del planeta) (**Mitsch & Gosselink**, 2015) comparada con la de los ecosistemas de bosques, así como la falta de datos, explican que hayan sido excluidos durante tanto tiempo de las evaluaciones de almacenamiento de carbono en el paisaje (**Moritsch et al.**, 2021). En este contexto, es fundamental que se haga el inventario de los humedales existentes para cuantificar las reservas de CO₂ y adoptar estrategias de conservación, protección o restauración de estos ecosistemas naturales, con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (**Herr & Landis**, 2016).

El Perú cuenta con una variedad de humedales a lo largo de su territorio, los cuales comprenden lagos, lagunas y cochas, bofedales, humedales costeros, aguajales y pantanos amazónicos (**Ministerio del Ambiente**, 2015). Sólo los humedales costeros abarcan 12.173 ha según el mapa de la Autoridad Nacional del Agua del 2012; se conocen 95 humedales en el litoral peruano, que albergan una gran diversidad de flora y fauna (**Aponte & Cano**, 2013; **ProNaturaleza**, 2010). Tales ambientes coexisten con poblaciones humanas, las cuales usan los recursos de los humedales de forma sustentable solo en algunos casos (**Aponte & Ramírez**, 2011; **Aponte et al.**, 2014). Dicha coexistencia los expone a la degradación, pues la mayoría se encuentran en áreas urbanas con un crecimiento poblacional constante que no está sujeto al ordenamiento territorial (**Castillo & Huamantínco**, 2020), lo que pone en peligro su conservación y sus servicios (**Kandus et al.**, 2010).

La valoración económica del carbono en comunidades de plantas y sedimentos puede facilitar la rehabilitación de estos ecosistemas con potencial de mitigar el aumento de la concentración del CO₂ en la atmósfera que, como se sabe, acelera el cambio climático (**Ullman et al.**, 2013). El concepto de pagar por la conservación de las reservas de carbono en los ecosistemas costeros ha sido objeto de distintos informes de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, el Banco Mundial y diversas instituciones en distintas regiones del mundo (**Murray et al.**, 2019). Ello ha resultado en el interés creciente en torno a la formulación de mecanismos de retribución económica por su conservación y restauración (**Ullman et al.**, 2013).

En los últimos años, el humedal de Santa Rosa, ubicado al norte de Lima, ha suscitado considerable interés. En este ecosistema se han hecho estudios de caracterización de la vegetación en los que se han identificado 57 especies de plantas vasculares, lo que lo convierte en uno de los humedales más ricos en vegetación de la costa central peruana (**Gonzales et al.**, 2019; **Ramírez et al.**, 2010). Un estudio sobre sus comunidades vegetales evidenció cómo su estructura cambia por la incidencia de las actividades humanas, lo que ha desembocado en la formación de comunidades únicas como la vega mixta (**Aponte & Ramírez**, 2011). Este humedal se encuentra amenazado principalmente por el cambio en los usos del suelo para la agricultura y la ganadería (**Aponte & Cano**, 2013; **Castillo & Huamantínco**, 2020; **Ramírez et al.**, 2010); ello ha reducido el área de la vegetación que secuestra y almacena carbono, lo que luego se traduce en emisiones de toneladas de

CO₂ al ambiente (Hiraishi *et al.*, 2014). Para que este ecosistema siga contribuyendo a la captura y almacenamiento del CO₂ atmosférico y, en consecuencia, a evitar su emisión, es fundamental su conservación, protección y restauración (Howard *et al.*, 2017; Lovelock & Duarte, 2019). La evaluación de la vegetación y la valoración del servicio de captura de CO₂ permiten generar herramientas e información técnica para una gestión eficaz del área, que responda, además, a las necesidades de desarrollo económico de la región costera peruana (McKinley *et al.*, 2018).

En este sentido, el objetivo del presente trabajo fue estimar y valorar la reserva de carbono almacenada en las formaciones vegetales dominantes del ecosistema del humedal de Santa Rosa. Asimismo, los resultados obtenidos se compararon con otros ecosistemas del territorio nacional para así evaluar la importancia de este y otros humedales del desierto costero del Pacífico suramericano.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en el humedal de Santa Rosa, ubicado en el distrito de Chancay, provincia de Huaral, zona norte de la región de Lima (11°36'01,4"S – 77°15'54,0"W). El área limita por el norte y el noroeste con el cerro El Cascajo, por el oeste y el sur con el océano Pacífico (playa El Cascajo), por el sureste con las zonas agrícolas de Peralvillo y Salinas Alta, y por el este con pequeñas elevaciones del Cerro Salinas (Ramírez *et al.*, 2010) (Figura 1). En la zona central del humedal se encuentra un cuerpo de agua donde abundan plantas acuáticas como *Pistia stratiotes* L. y *Eichhornia crassipes* (Mart.); el humedal se abastece de agua a través de varios canales y fuentes subterráneas formadas por el excedente del agua que llega directamente a los acuíferos por filtración debido al suelo arenoso (Ramírez *et al.*, 2010; Verones *et al.*, 2012). El humedal tiene 77,78 ha y se constituyó en área de conservación ambiental (ACA) desde el 25 de septiembre de 2020 mediante la Ordenanza Municipal N° 013-2020-MPH-CM.

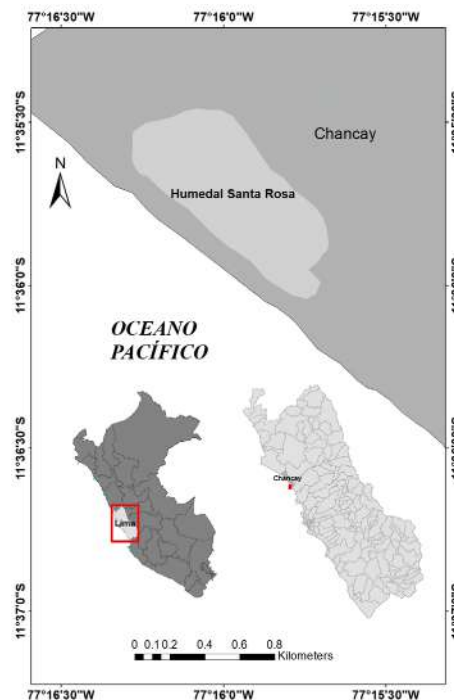


Figura 1. Ubicación del Humedal Santa Rosa (arriba), y los detalles de su ubicación en el Perú (inferior izquierda) y en el Distrito de Chancay (inferior derecha). La escala presentada corresponde al humedal. (Elaborado con el software Arcgis).

Delimitación de comunidades vegetales y ubicación de puntos de muestreo

Se evaluaron tres comunidades vegetales terrestres predominantes en el humedal según las descripciones de **González et al.** (2019) y **Ramírez et al.** (2010): a) totoral, donde predominan las especies *Thypha domingensis* Pers y *Enhydra sessilifolia* Cabrera; b) juncal, compuesto principalmente por *Schoenoplectus americanus* (Pers.) Volkart ex Schinz & R. Keller, y c) vega mixta, caracterizada por su porte bajo y compuesta por *Cyperus laevigatus* L, *Eleocharis geniculata* (L.) Roem. & Schult., *Bacopa monnieri* (L.) Edwall, *Hydrocotyle ranunculoides* L.F., *Paspalum vaginatum* Sw. y *Distichlis spicata* P.M. Peterson & Romasch.

Las comunidades vegetales en todo el humedal se delimitaron usando GPS (Garmin GPSMAP 64s). Posteriormente, los puntos se trasladaron a Google maps para establecer los polígonos (kml) y calcular el área de cada uno. Por último, a partir de los polígonos (shp) se elaboró el mapa de la distribución vegetativa del humedal con el programa ArcGis 10,3.

Una vez caracterizadas las comunidades vegetales, se procedió con la recolección de la biomasa siguiendo las técnicas empleadas en **Ampuero & Aponte** (2020), **Aponte et al.** (2021), **Howard et al.** (2014) y **Rügnitz et al.** (2009), con algunas modificaciones: se establecieron de manera dirigida tres transectos lineales (10 m) por comunidad vegetal; en cada transecto se ubicaron de manera aleatoria cuatro parcelas de 0,25 m² (0,5m x 0,5m) para un total de 36 parcelas en las que se hizo la recolección de la biomasa aérea (fresca y seca) y el suelo; para corroborar que el número de parcelas fuera representativo se utilizó una curva de rendimiento (**Elzinga et al.**, 2015). La recolección de las muestras se hizo en octubre del 2020.

Recolección de muestras

En cada parcela se evaluó la cantidad de carbono en dos compartimentos: a) la biomasa aérea, que comprende la biomasa vegetal fresca (BAF) y la seca (BAS) sobre el suelo, y b) el suelo a 0-10 cm y 10-20 cm de profundidad; las raíces se consideraron como parte del suelo.

Para la evaluación de la biomasa aérea se cortó a ras de suelo toda la vegetación que se encontraba en cada parcela; luego se registró por separado el peso de la fracción seca y de la fresca con una balanza digital previamente calibrada. En cada parcela se tomó una submuestra de 200 g de plantas secas y frescas para el posterior análisis de peso seco en el laboratorio y el cálculo de carbono (**Howard et al.**, 2014; **Rügnitz et al.**, 2009). En la vega mixta no se separó la vegetación seca de la fresca, ya que no fue posible hacerlo por su composición (pastos y ciperáceas principalmente), porte bajo y formación en macollos.

Para el estudio del carbono en el suelo se recolectaron cuatro muestras en cada parcela con ayuda de un barreno; luego se separaron en submuestras (en total 16 submuestras por comunidad) según la profundidad: 0-10 cm. y 10-20 cm. Estas submuestras se almacenaron y rotularon por profundidad para analizar la densidad aparente y calcular el carbono orgánico en el laboratorio.

Determinación del peso seco de las muestras

El peso seco de las muestras vegetales (BAS y BAF) se determinó mediante la técnica gravimétrica (**Howard et al.**, 2014); para ello, las muestras se pesaron antes y después del secado en estufa a 60 °C durante 96 horas (o hasta obtener un peso constante) en el laboratorio de ingeniería ambiental de la Universidad Científica del Sur.

Para calcular el porcentaje de humedad (H) de las muestras de BAF y BAS se utilizó la siguiente fórmula:

$$1. \dots\dots\dots \%H_x = (PS.100)/PH,$$

donde PS y PH son el peso seco y el húmedo de las muestras de vegetación.

El peso seco por parcela (PS_x) se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$2. \dots\dots\dots PS_x = (PF_x.\%H_x)/100,$$

donde PF_x es el peso de las BAF y las BAS en cada parcela y %H_x es su porcentaje de humedad en la respectiva parcela.

Densidad aparente del suelo

Para el cálculo del carbono en el suelo, fue necesario determinar la densidad aparente de este. Para ello, las muestras se secaron en una estufa a 105 °C durante 96 horas para obtener el peso seco y, posteriormente, se aplicó la siguiente fórmula:

$$3. \dots \dots \dots \rho_{\text{aps}} = m/V,$$

donde ρ_{aps} es la densidad aparente del suelo, expresada en kilogramos por metro cúbico; m es la masa de la muestra del peso seco expresada en kilogramos y V es el volumen de la muestra extraído en 10 cm del barreno (41,5 cm³).

Determinación del porcentaje de carbono orgánico (%C_x) de las muestras

Para determinar el %C_x en la vegetación y en el suelo, las muestras se enviaron al laboratorio de análisis de suelos, plantas de agua y fertilizantes de la Universidad Agraria la Molina, donde se analizaron mediante el método de Walkley y Black. Este método consiste en la oxidación húmeda de la materia orgánica utilizando dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) en presencia de ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado, proceso en el que se desprende calor por la reacción del H₂SO₄, lo que favorece la acción del K₂Cr₂O₇ para que oxide la materia orgánica. Por medio de la titulación se calcula el dicromato de potasio excedente y a partir de ello se estima el carbono orgánico fácilmente oxidable para, finalmente, obtener una medida del carbono orgánico total (**Palomino & Cabrera, 2008**).

Dicho método ha sido utilizado en estudios de captación de carbono en diferentes ecosistemas: comunidades de macroalgas, humedales andinos, bosques, manglares, turberas amazónicas y humedales costeros, entre otros (**Aponte et al., 2021; Chuquizuta et al., 2016; Crispin, 2015; Medrano et al., 2012**), lo que permitió comparar los valores de las existencias de carbono entre los distintos ecosistemas.

Reserva de carbono orgánico en cada formación vegetal

La reserva de carbono (Cx) de las comunidades vegetales se calculó con la siguiente fórmula:

$$4. \dots \dots \dots Cx \text{ (kg/m}^2\text{)} = PSx \text{ (kg)} \cdot \% Cx,$$

donde PSx es el peso seco de las muestras de BAF y BAS en cada parcela expresado en kilogramos por metro cuadrado y %Cx es el porcentaje de carbono de la vegetación correspondiente determinado en laboratorio.

La cantidad de carbono en el suelo se calculó a partir de la densidad aparente con la siguiente fórmula:

$$5. \dots \dots \dots DC_{\text{su}} \text{ (g/m}^3\text{)} = \rho_{\text{aps}} \text{ (g/m}^3\text{)} \cdot \% C,$$

donde DC_{su} es la densidad del carbono en el suelo expresada en gramos por metro cúbico; es la densidad aparente de la muestra seca del suelo expresada en gramos por metro cúbico y %C es el porcentaje del carbono hallado en la muestra del suelo en el laboratorio.

Luego se calculó el carbono almacenado en el suelo (C_{su}) con la siguiente fórmula:

$$6. \dots \dots \dots C_{\text{su}} \text{ (g/m}^2\text{)} = DC_{\text{su}} \text{ (g/m}^3\text{)} \times h \text{ (m)},$$

donde DC_{su} es la densidad del carbono en el suelo expresada en gramos por metro cuadrado y h es la profundidad de la muestra de suelo (0,1m).

Carbono total almacenado

Para obtener el carbono total almacenado se sumó el carbono de la biomasa aérea y el almacenado en el suelo; luego se multiplicó por el área que ocupa cada comunidad vegetal para obtener las toneladas totales. Para convertir las unidades de carbono en unidades de CO₂ acumulado, se multiplicaron los valores obtenidos por 3,67 (**Lohberger et al., 2018**), lo que equivale al peso de CO₂ que debe capturarse para obtener un gramo de carbono.

Análisis estadístico

Se realizaron análisis estadísticos descriptivos (promedios y coeficientes de variación). Posteriormente, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro Wilks y la prueba de Levene para verificar la homocedasticidad de varianzas; ambas pruebas se cumplieron (p>0,05) en

todos los casos. Posteriormente, se aplicó la prueba de ANOVA (si $p < 0,05$) y la prueba de Tukey para evaluar si había diferencia entre los compartimentos (BAF, BAS y suelo) de cada comunidad vegetal. Todas las pruebas se hicieron en el programa Past (**Hammer et al.**, 2001).

Cálculo del valor económico del CO₂ secuestrado por las comunidades vegetales evaluadas

El estudio buscó valorar económicamente el servicio de captura de carbono orgánico en el humedal de Santa Rosa con un método directo (**Portela & Rivero**, 2019), que consiste en la cuantificación del servicio ambiental para luego expresarlo en términos de su valor monetario según los mercados de carbono existentes (**Zuluaga & Castro**, 2018).

Para la estimación del valor económico del CO₂ secuestrado por las comunidades vegetales se multiplicó la cantidad de dióxido de carbono total calculada como reserva del área por el precio de mercado sugerido para la emisión de CO₂ equivalente para cada tonelada (**Sapkota & White**, 2020; **Trinidad & Jakob**, 2019).

Resultados

La **figura 2** muestra la distribución y la extensión de las comunidades vegetales evaluadas; se aprecia que la vega mixta abarcó 18,46 ha; el totoral, 12,62 ha, y el juncal, 5,41 ha; el área total de las tres comunidades vegetales estudiadas fue de 36,49 ha.

La representatividad de las mediciones de biomasa se verificó mediante las curvas de desempeño (**material suplementario 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1925/3598>). En la **tabla 1** se registra la cantidad promedio de carbono almacenado en cada comunidad vegetal por unidad de área. El totoral registró la mayor cantidad de carbono almacenado, con $76,61 \pm 26,87$ TnC.ha⁻¹, seguido de la vega mixta, con $75,29 \pm 39,85$ TnC.ha⁻¹ y, por último, el juncal con $63,96 \pm 25,81$ TnC.ha⁻¹. El carbono almacenado en el total del área de cada comunidad vegetal fue de 1 390,21 TnC en la vega mixta; 966 TnC en el totoral y 346,31 TnC en el juncal. En las tres comunidades vegetales estudiadas el carbono almacenado fue de 2.703,02 TnC, las cuales equivalen a 9.920,07 TnCO₂.

La **figura 3** muestra la cantidad de carbono almacenado en las comunidades vegetales por compartimento (suelo y biomasa aérea); no se encontró diferencia significativa en el carbono total almacenado entre las tres comunidades ($p > 0,5$). Puede apreciarse que el suelo de 0-10 cm de profundidad almacenó la mayor cantidad de carbono en las tres comunidades vegetales comparado con los otros compartimentos estudiados (suelo de 10-

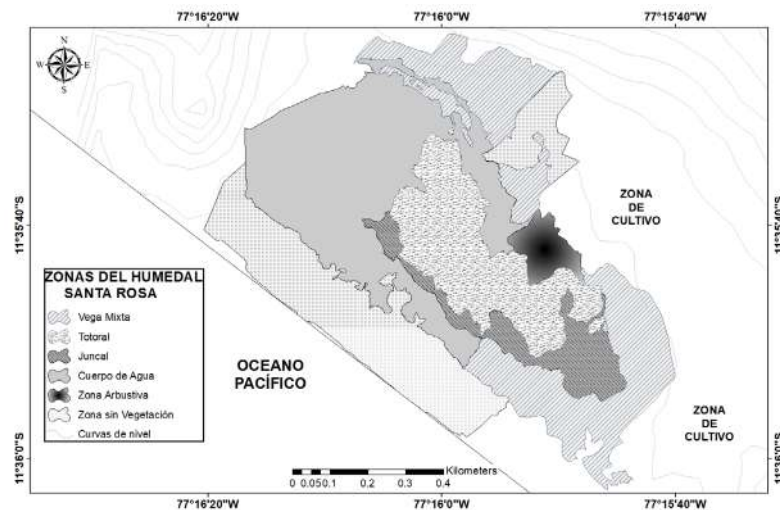


Figura 2. Mapa del humedal Santa Rosa y las comunidades vegetales (Totoral, juncal y vega mixta), junto con el cuerpo de agua. (Elaboración propia en ArcGis)

Tabla 1. Carbono almacenado en los compartimentos de las comunidades vegetales (totoral, juncal y vega mixta) y carbono total almacenado en el área de cada comunidad y su conversión a dióxido de carbono. Para cada estrato se muestra el promedio \pm coeficiente de variación.

Comunidad Vegetal	Compartimento	TnC/ha	Total de C por compartimento (TnC/ha)	Área (ha)	Carbono total almacenado (TnC)	Dióxido de carbono secuestrado (TnCO ₂)
Vega mixta	Biomasa vegetal	3,82 \pm 69,17	75,29 \pm 39,85	18,46	1 390,21	5 102,07
	Suelo de 0-10 cm	42,94 \pm 69,46				
	Suelo de 10-20 cm	28,53 \pm 28,07				
Totoral	Biomasa vegetal	27,90 \pm 26,23	76,61 \pm 26,87	12,62	966,50	3 547,05
	Suelo de 0-10 cm	34,25 \pm 58,52				
	Suelo de 10-20 cm	14,46 \pm 37,62				
Juncal	Biomasa vegetal	24,10 \pm 28,8	63,96 \pm 25,81	5,41	346,31	1 270,95
	Suelo de 0-10 cm	25,70 \pm 28,14				
	Suelo de 10-20 cm	14,16 \pm 63,57				

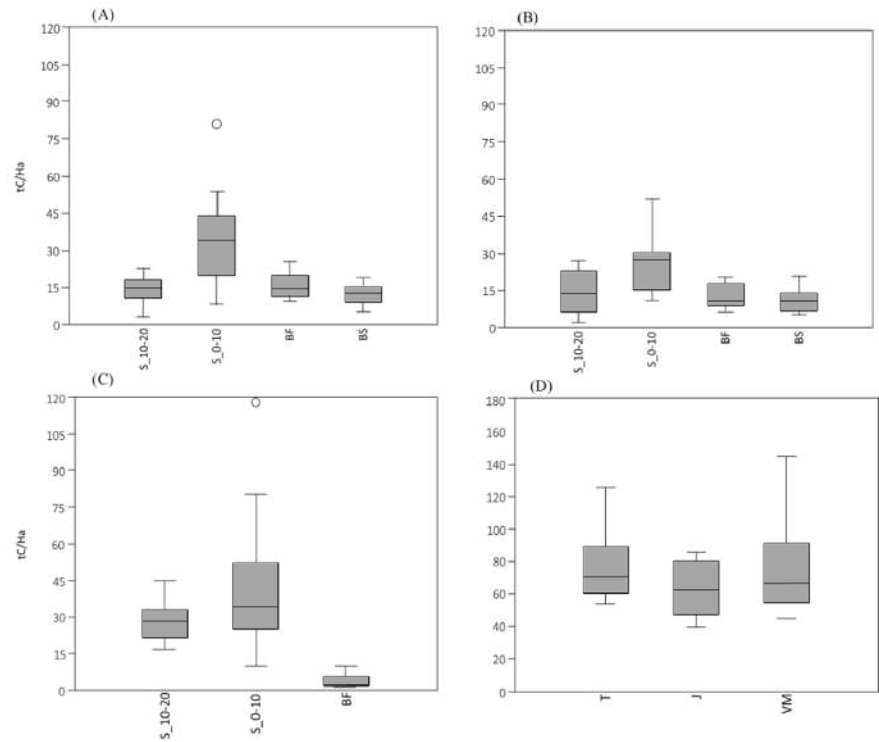


Figura 3. Reservas de Carbono en los diferentes compartimentos de las tres comunidades vegetales (tC/ha) y comparación de tC/ha totales en las comunidades vegetales. (A)= Totoral, (B)= Juncal, (C) Vega Mixta y (D) comparación de tC/ha de las 3 comunidades vegetales (T=Totoral, J=Juncal y VM= Vega mixta); S_10-20 = Suelo de 10cm – 20cm, S_0-10 = Suelo de 0cm – 10cm, BF= Biomasa fresca, BS= Biomasa seca.

20 cm, BAF y BAS; $p < 0,05$). En la vega mixta se observó que el 95 % del carbono se almacenaba en el suelo y sólo el 5 % se encontró en la biomasa aérea de dicha comunidad; en el juncal, el carbono almacenado en el suelo representó el 62 % con respecto al carbono almacenado en la biomasa aérea (38 %); por último, en el totoral el carbono almacenado en el suelo representó el 64 %, en tanto que el 36 % se encontró en la biomasa aérea.

Valor económico del CO₂ secuestrado

Considerando el precio en el mercado voluntario de carbono, que oscila entre 0,50 y 50 dólares por TnCO₂, con un promedio global de tres dólares por TnCO₂ (Sapkota & White, 2020), la reserva de carbono en el humedal de Santa Rosa tendría un valor entre los 4.879 y los 487.852 dólares. El Perú contempla un precio implícito del carbono de 6,39 dólares, el cual expresa su costo social (Trinidad & Jakob, 2019). Aplicándolo a las reservas de carbono equivalente en el humedal de Santa Rosa, el precio ascendería a 62.347 dólares.

Discusión

Comparación de las reservas de carbono de los humedales con otros ecosistemas

El humedal de Santa Rosa presenta variación en la cantidad de carbono almacenado por comunidad vegetal, lo cual depende de la estacionalidad, el gradiente de salinidad, la composición de especies, la fertilidad del suelo y las formas estructurales de la vegetación como lo anotan Owers *et al.* (2018) y Perera *et al.* (2022), ya que en campo se pudo observar que el totoral y el juncal presentaban una densidad vegetal mayor a la vega mixta, lo que explica que se capturara más carbono aéreo en estas comunidades (Elsley-Quirk *et al.*, 2011). El almacenamiento de carbono en el suelo en las tres comunidades fue mayor al almacenado en la parte aérea; llama la atención que la vega mixta almacenó más que las otras dos comunidades, lo que se explicaría por la diferencia de densidades de los suelos, ya que en aquellos con grano de arena grueso los procesos de aireación y drenaje mejoran y ello facilita la descomposición (Elsley-Quirk *et al.*, 2011). En campo se pudo observar que la estructura del suelo de la vega mixta era más arenosa, lo que posiblemente influyó en la variación en el secuestro de carbono.

Diversos autores han estimado las reservas de carbono orgánico en humedales costeros peruanos, resultados que se presentan resumidos en la **tabla 2**. El ACA del humedal de Santa Rosa presenta una menor reserva de carbono total almacenado que el Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa (RVSLPV) (Ampuero & Aponte, 2020; Aponte *et al.*, 2021). Esta diferencia podría deberse a que el LPV es un área natural protegida que cuenta con actividades de conservación que podrían favorecer el crecimiento vegetal de sus comunidades (Pulido-Capurro & Bermúdez-Díaz, 2018), lo que se suma a la poca intervención humana en comparación con el humedal de Santa Rosa (Aponte & Cano, 2013; Castillo & Huamantínco, 2020; Ramírez *et al.*, 2010). Comparado con otros humedales como Ventanilla (Cieza, 2014), Puerto Viejo (Palomino & Cabrera, 2008), Albuferas de Medio Mundo (Gutiérrez, 2017; Velásquez, 2017) y Villa María (Pérez *et al.*, 2015), el humedal de Santa Rosa almacena mayor cantidad de carbono por área. Las diferencias en las reservas y el almacenamiento de carbono pueden deberse al esfuerzo y condiciones de muestreo de los anteriores estudios; por ejemplo, Palomino & Cabrera (2008) sólo establecieron cinco puntos de muestreo, con un bajo esfuerzo de muestreo. En el estudio realizado de Gutiérrez (2017) en la Albufera de Medio Mundo se muestrearon comunidades vegetales de distintas edades, lo cual podría haber influenciado la cantidad

Tabla 2. Carbono almacenado en los compartimentos de la biomasa vegetal fresca (BAF) y la seca (BAS) de las comunidades vegetales

Comunidad vegetal	Compartimento	TnC/ha	Total de C por compartimento (TnC/ha)	Área (ha)	Carbono total almacenado (TnC)	Dióxido de carbono secuestrado (TnCO ₂)
Vega mixta	Biomasa aérea fresca	3,82 ± 69,17	3,82 ± 39,85	18,46	70,62	258,48
	Biomasa aérea seca	- -				
Totoral	Biomasa aérea fresca	15,51 ± 30,20	27,90 ± 26,87	12,62	351,96	1,288,18
	Biomasa aérea seca	12,39 ± 44,09				
Juncal	Biomasa aérea fresca	12,72 ± 42,54	24,10 ± 25,81	5,41	130,50	477,64
	Biomasa aérea seca	11,38 ± 44,75				

de biomasa y el consecuente cálculo de la reserva de carbono en dicho humedal; por ello, es importante acompañar las estimaciones con un indicador de representatividad, tal como se ha hecho en este estudio con las curvas de desempeño (**material suplementario 1**, <https://www.raccefn.co/index.php/raccefn/article/view/1925/3598>). Otros factores que influyen en el almacenamiento de carbono son la productividad primaria, la descomposición de la materia orgánica y la acumulación de sedimentos (**Hayes et al.**, 2017), lo que significa que cada humedal tiene una complejidad particular que se agudiza con las actividades antrópicas de las localidades circundantes (**Aponte & Ramírez**, 2011). Varios investigadores señalan que las diferencias entre las especies también son un factor importante que influye en el secuestro de carbono, porque las tasas de descomposición de la materia orgánica (**Dong et al.**, 2022; **Yao et al.**, 2019) y el porcentaje de carbono en sus tejidos (**Aldave & Aponte**, 2019) difieren entre especies. Como consecuencia de todo lo descrito, el carbono almacenado en las comunidades vegetales en Santa Rosa difiere de una a otra y de los otros humedales, lo que evidencia la gran variabilidad que puede existir en un mismo humedal y en ecosistemas similares.

Los datos sobre la reserva de carbono de otros ecosistemas del territorio peruano, como los bofedales, los lagos altoandinos, los bosques, aguajales y tillandsiales (**Tabla 2**), coinciden en que el almacenamiento de carbono se da en mayor porcentaje en el suelo. Los valores obtenidos en este estudio se asemejan a los del tillandsial Piedra Campana (Mala, Lima), donde el carbono almacenado en el suelo representó el 83,77 % (**Arévalo & Aponte**, 2020), así como en los bofedales del centro poblado Alto Perú en Tacna y los de la laguna de Conococha en Ancash, donde el carbono almacenado en el suelo representó el 73,6 y el 83 % del total, respectivamente (**Mita**, 2020; **Sequeiros & Cazorla**, 2020). Una situación similar se registró en un bosque montano de neblina del Perú en Cajamarca, donde el carbono almacenado en el suelo representó el 86,3 % del total calculado en los compartimentos (**Dilas-Jiménez & Huaman**, 2020).

Al comparar la reserva de carbono en la biomasa aérea del humedal de Santa Rosa (24,10 – 27,9 TnC/ha), puede constatar que superó la de los bofedales (20,48 TnC/ha), las lagunas altoandinas (5,72 – 30,65 TnC/ha) y los sotobosques (17,36 TnC/ha) (**Tabla 2, tabla 3**), lo que se debería a que la vegetación del humedal tiene mayor biomasa aérea, pues el tamaño de las totoras sobrepasa los tres metros de altura. Sucede lo contrario al comparar la cantidad de carbono almacenado en el suelo del humedal: los valores obtenidos fueron bajos en comparación con los otros ecosistemas, lo que se debería a las diferencias en la hidrodinámica, la composición y densidad de las especies vegetales, los parámetros fisicoquímicos, las tasas de descomposición, las condiciones climáticas, la textura del suelo (**Hayes et al.**, 2017) y la propia técnica utilizada (en nuestro caso se evaluó únicamente hasta los 20cm de profundidad).

Nuestros resultados muestran la importancia del almacenamiento de carbono de este humedal, incluso al compararlo con los valores más altos reportados en otros humedales y ecosistemas. Es necesario que en estudios futuros se evalúe a profundidad el flujo de carbono en el tiempo, con el fin de entender bien la dinámica del CO₂ y otros gases de efecto invernadero (como el metano) que también son liberados en el medio y contribuyen al cambio climático. El presente estudio sienta las bases para elaborar instrumentos de gestión del servicio de captura de carbono que ayudarán a elevar la categoría del humedal a ACA, lo que garantiza su mayor protección, y aporta valiosa información técnica para futuras investigaciones.

Valoración económica

Los estudios de valoración económica del servicio de captura de carbono orgánico en humedales costeros son muy escasos: en este se hace una aproximación a la valoración económica a partir del precio del carbono en el mercado voluntario de carbono establecido entre \$0,5 y \$50 por TnCO₂ (**Sapkota & White**, 2020). En otro estudio realizado en el humedal de la Laguna de Mejía se utilizó el método que calcula el costo del daño evitado a nivel global a partir de un costo social de 15\$/ha, lo cual asciende a \$4.425/ha por el

Tabla 3. Cuadro comparativo de carbono almacenado en el presente estudio y en otros humedales costeros y distintos ecosistemas

Lugar de estudio	Comunidad vegetal/Usos de suelo	Compartimento	TnC/ha	TnCO ₂ /ha	Referencia
<i>Humedales costeros</i>					
Humedal de Santa Rosa - Chancay	Juncal	Biomasa aérea	24,10	88,45	Presente estudio
		Suelo	39,86	146,29	
	Totoral	Biomasa aérea	27,90	102,39	
		Suelo	48,71	178,77	
	Vega mixta	Biomasa aérea	3,82	14,02	
		Suelo	71,47	262,29	
Pantanos de Villa	Juncal	Biomasa aérea	53,23	195,35	Ampuero & Aponte (2020)
		Suelo	252,14	925,35	
	Totoral	Biomasa aérea	63,05	231,39	Aponte <i>et al.</i> (2021)
		Suelo	61,66	226,29	
	Gramadal	Biomasa aérea	48,07	176,41	
		Suelo	37,39	137,22	
Puerto Viejo	Juncal	Biomasa aérea	11,10	40,74	Palomino & Cabrera (2008)
		Suelo	106,50	390,86	
	Totoral	Biomasa aérea	20,10	73,77	
		Suelo	18,37	67,41	
	Salicornial	Biomasa aérea	3,30	12,11	
		Suelo	8,41	30,86	
	Gramadal	Biomasa aérea	11,00	40,37	
		Suelo	17,55	64,41	
Albufera de Medio Mundo	Totoral	Biomasa aérea	15,25	55,96	Velásquez (2017)
		Suelo	13,87	50,90	
	Juncal	Biomasa aérea	11,50	42,21	Gutiérrez (2017)
		Suelo	49,46	181,52	
Humedal de Ventanilla	Totoral	Biomasa aérea	18,53	68,00	Cieza (2014)
		Raíz	13,00	47,71	
	Juncal	Biomasa aérea	13,77	50,54	
		Raíz	9,41	34,53	
	Gramadal	Biomasa aérea	14,89	54,65	
		Raíz	7,89	28,96	
	Salicornial	Biomasa aérea	13,49	49,51	
		Raíz	10,10	37,07	
Humedal de Villa María, Ancash	Totoral	Biomasa aérea	16,83	61,77	Pérez <i>et al.</i> , (2015)
		Raíz	6,09	22,35	

Lugar de estudio	Comunidad vegetal/Usos de suelo	Compartimento	TnC/ha	TnCO ₂ /ha	Referencia
<i>Ecosistemas distintos a los humedales costeros</i>					
Lago Chinchaycocha	Totoral	Biomasa aérea	30,65	112,49	Medrano (2012)
	Pajonal	Biomasa aérea	7,02	25,76	
		Raíz	8,41	30,86	
Bofedales del centro poblado Alto Perú, Tacna	Cobertura vegetal	Biomasa aérea	41,53	152,42	Sequeiros & Cazorla (2020)
		Suelo	272,83	1 001,29	
Bofedales de la laguna Conocha-Recuay - Ancash	Vegetación predominante bofedal 2	Biomasa aérea	63,14	231,72	Mita (2020)
		Suelo	330,87	1 214,29	
	Vegetación predominante bofedal 2	Biomasa aérea	20,48	75,16	
		Suelo	367,00	1 346,89	
Bosque Montano de neblina - San Ignacio Cajamarca	Sotobosque y hojarasca	Biomasa aérea	17,36	63,71	Dilas-Jiménez & Jiménez (2020)
		Suelo	108,97	399,92	
Piedra Campana - Lima	Tillandsial	Biomasa aérea	0,59	2,17	Arévalo & Aponte (2020)
		Suelo	3,05	11,19	

servicio de captura de carbono de tres especies de flora (**Alencastre & Zafra, 2020**) y difiere de la valorización en Santa Rosa, la cual ascendería a \$1.708 por hectárea. En otro estudio realizado en un humedal altoandino de Chalhuanca (Arequipa) se utilizó el costo social establecido por el Ministerio de Economía y Finanzas (\$7,1 por TnC), y se obtuvo un valor de \$ 6.462,18 por hectárea (**Alvis-Ccoropuna et al., 2021**). La valoración se hace con base en el cálculo de la reserva de carbono orgánico cuantificada en el ecosistema y el precio por TnCO₂ según el método y el mercado que se elija. Dicha valoración puede revelar la importancia de las estructuras y procesos naturales para la salud de estos ecosistemas y aumentar la eficiencia en la toma de decisiones en las zonas costeras (**Zamboni et al., 2021**)

En los últimos años Perú ha implementado diversas políticas relacionadas con la energía y el clima, incluso contamos con la Ley Marco de Cambio Climático; sin embargo, ninguna de estas considera explícitamente el precio del carbono como una medida de mitigación (**Trinidad & Jakob, 2019**). La mayor parte de la financiación climática se da a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) que se formalizó a través del Protocolo de Kioto (**Yamin, 2012**), pero más del 80 % de su cartera se concentra en proyectos que buscan mejorar la eficiencia energética, en tanto que los proyectos de forestación y reforestación representan menos del 1 % de la financiación (**Vanderklift et al., 2019**). Es necesario que se fomente una economía basada en el carbono azul en los lugares cercanos a las costas, con el fin de generar fondos significativos para la protección y restauración de estos ecosistemas (**Wan et al., 2021**) utilizando metodologías estandarizadas de estimación de servicios ecosistémicos y con un inventario definido para que los inversionistas puedan estimar las compensaciones de carbono azul.

Nuestro estudio en el humedal de Santa Rosa evidenció que se trata de un ecosistema importante como sumidero de CO₂, con más de 9.000 toneladas de CO₂. El cambio en los usos del suelo en la zona y la degradación y pérdida que ello representa implica un riesgo de emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Nuestros análisis son de suma importancia, ya que evidencian el valor económico de uno de los servicios ecosistémicos

de suma importancia para la mitigación y adaptación frente al cambio climático. Asimismo, aportan herramientas de gestión para los responsables de las decisiones que permiten incorporarlo en los mercados voluntarios de carbono. En un estudio reciente (**Valles-Maravi et al.**, 2020) se identificaron 14 alternativas de financiamiento para la conservación del LPV entre las cuales se destacan los mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos y los mercados de carbono; los primeros cuentan con un marco legal (Ley 30215) directamente relacionado con el secuestro y almacenamiento de carbono azul y carbono neutral. El humedal Santa Rosa puede aprovechar estos mecanismos de financiación para su preservación y conservación; en este sentido, el presente estudio facilita el soporte para aplicarlos al resaltar la importancia de la diversidad que alberga (**Apeño**, 2022; **Gonzales et al.**, 2019; **Ochoa Balbacea et al.**, 2022; **Ramírez et al.**, 2010).

Conclusiones

El humedal de Santa Rosa constituye un ecosistema de gran valor por su capacidad de secuestro y almacenamiento de carbono (2.703,02 TnC, equivalentes a 9.920,07 TnCO₂). Nuestros resultados se suman al inventario de otros humedales costeros peruanos en estudios similares que han demostrado el gran potencial de estos ecosistemas como almacenes de carbono. Estos estudios sirven de base científica para generar herramientas que los responsables de las decisiones pueden emplear para lograr la conservación de los humedales costeros y evitar que se pierdan sus servicios ecosistémicos.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1925/3598>

Agradecimientos

A la Dirección General de Investigación, Desarrollo e Innovación - D.G.I.D.I. de la Universidad Científica de Sur por el financiamiento de la investigación; al Comité de Vigilancia del humedal de Santa Rosa por las facilidades brindadas en el lugar; a los laboratorios de ingeniería ambiental y biología marina por facilitarnos materiales para el muestreo y el uso de sus instalaciones, y a Leslie Carmen Alberca por el apoyo en el muestreo de campo.

Contribución de los autores

RCh realizó el muestreo en campo, los ensayos en laboratorio, el procesamiento de datos y la redacción del manuscrito. HA brindó apoyo en el procesamiento de datos, verificó el análisis estadístico, y participó en la redacción del manuscrito.

Referencias

- Adame, M. F., Zakaria, R. M., Fry, B., Chong, V. C., Then, Y. H. A., Brown, C. J., Lee, S. Y.** (2018). Loss and recovery of carbon and nitrogen after mangrove clearing. *Ocean and Coastal Management*, 161, 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.04.019>
- Aldave, T. & Aponte, H.** (2019). Estudio comparativo del porcentaje de carbono entre especies de flora vascular de los Pantanos de Villa (Lima-Perú). *Arnaldoa*, 26(2), 751-760. <https://doi.org/10.22497/ARNALDOA.262.26216>
- Alencastre, L. & Zafra, J.** (2020). *Evaluación económica del servicio ambiental de captura de carbono de tres especies de flora del Humedal de la Laguna de Mejía, Distrito de Mejía – Islay, 2019* [Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/58201>
- Alvis-Ccoropuna, T., Villasante-Benavides, J. F., Pauca-Tanco, G. A., Quispe-Turpo, J. del P., Luque-Fernández, C. R.** (2021). Cálculo y valoración del almacenamiento de carbono del humedal altoandino de Chalhuanca, Arequipa (Perú). *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 23(3), 139-148. <https://doi.org/10.18271/RIA.2021.314>
- Ampuero, W. & Aponte, H.** (2020). Estimación del carbono almacenado en un juncal de *Schoenoplectus americanus* en el humedal costero Los Pantanos de Villa (Lima-Perú). *Arnaldoa*, 27(1), 267-282. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.271.27117>

- Apeño, A. & Aponte, H.** (2022). Caracterización de la diversidad de aves en un humedal altamente intervenido del Pacífico suramericano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(179), 380-392. <https://doi.org/10.18257/racefyn.1605>
- Aponte, H. & Cano, A.** (2013). Estudio florístico comparativo de seis humedales de la costa de Lima (Perú): Actualización y nuevos retos para su conservación. *Revista Latinoamericana de Conservación* 3(2), 15-27. http://aplicaciones.cientifica.edu.pe/repositorio/catalogo/_data/5.pdf
- Aponte, H., Corvacho, M. F., Lertora, G., Ramírez, D. W.** (2021). Reserva de carbono en un humedal del desierto costero de Sudamérica. *Gayana Botánica*, 78(2), 184-190. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432021000200184>
- Aponte, H. & Ramírez, D.** (2011). Humedales de la costa central del Perú: Estructura y amenazas de sus comunidades vegetales. *Ecología Aplicada*, 10 (1). <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v10n1/a04v10n1>
- Arévalo, J. & Aponte, H.** (2020). Almacenamiento de carbono y agua en *Tillandsia latifolia* Meyen en un sector del Tillandsial de Piedra Campana (Lima/Perú). *Ecología Aplicada*, 19(1), 9-15. <https://doi.org/10.21704/REA.V19I1.1441>
- Castillo, R. M. & Huamantínco, A. A.** (2020). Spatial variation of the aquatic macroinvertebrates community in the littoral zone of the Santa Rosa Coastal Wetland, Lima, Peru. *Revista de Biología Tropical*, 68(1), 50-68. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i1.35233>
- Chuquizuta, P. D., Ruiz, G. F., Salas, C. T., López, L. A.** (2016). Carbono almacenado en cinco sistemas de uso de tierra, en la región San Martín Perú. *RINDERESU*, 1(2), 57-67. <http://www.rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/22/06>
- Cieza, M.** (2014). Estimación de la captura de dióxido de carbono por la flora del Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla. [Universidad Federico Villareal]. In *Universidad Federico Villareal*. <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/716>
- Crispin, M.** (2015). Valoración económica ambiental de los bofedales del distrito de Pilpichaca Huancavelica Perú [Universidad Nacional Agraria La Molina]. *Universidad Nacional Agraria La Molina*. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1584>
- Dilas-Jiménes, J. O. & Huaman, A. O.** (2020). Captura de carbono por un bosque montano de neblina del Perú. *Alpha Centauri*, 1(3), 13-25. <https://doi.org/10.47422/ac.v1i3.16>
- Dong, L., Li, J., Liu, Y., Hai, X., Li, M., Wu, J., Wang, X., Shangguan, Z., Zhou, Z., Deng, L.** (2022). Forestation delivers significantly more effective results in soil C and N sequestrations than natural succession on badly degraded areas: Evidence from the Central Loess Plateau case. *CATENA*, 208, 105734. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2021.105734>
- Elsey-Quirk, T., Seliskar, D. M., Sommerfield, C. K., Gallagher, J. L.** (2011). Salt marsh carbon pool distribution in a mid-Atlantic Lagoon, USA: Sea level rise implications. *Wetlands*, 31(1), 87-99. <https://doi.org/10.1007/S13157-010-0139-2>
- Elzinga, C., Salzer, D., Willoughby, J.** (2015). *MEASURING & MONITORING Plant Populations*. Bureau of Land Management National Business Center. https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/490a.pdf
- González, S., Aponte, H., Cano, A.** (2019). Actualización de la flora vascular del humedal Santa Rosa - Chancay (Lima, Perú). *Arnaldoa*, 26(3), 867-882. <https://doi.org/10.22497/ARNALDOA.263.26303>
- Gutiérrez, C.** (2017). Estimación de la captura de CO₂ en el Juncal del área de conservación regional La Albufera de Medio Mundo (ACRAMM) - Huaura, Lima Perú. [Universidad Católica Sedes Sapientae]. *Universidad Católica Sedes Sapientae*. <https://repositorio.uccs.edu.pe/handle/20.500.14095/303>
- Hammer, Ø., Harper, D., Ryan, P.** (2001). Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4-(1), 178. http://palaeo-electronica.orghttp://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- Hayes, M. A., Jesse, A., Hawke, B., Baldock, J., Tabet, B., Lockington, D., Lovelock, C. E.** (2017). Dynamics of sediment carbon stocks across intertidal wetland habitats of Moreton Bay, Australia. *Global Change Biology*, 23(10), 4222-4234. <https://doi.org/10.1111/gcb.13722>
- Herr, D. & Landis, E.** (2016). *Coastal blue carbon ecosystems Opportunities for Nationally Determined Contributions. Policy brief*. IUCN and TNC. www.bluecsolutions.org
- Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N.** (eds) (2014). *2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands*. IPCC.
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M., Pidgeon, E.** (eds). (2014). *Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses*. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature; International Union for Conservation of Nature (IUCN). <https://www.cifor.org/knowledge/publication/5095/>

- Howard, J., Sutton-Grier, A., Herr, D., Kleypas, J., Landis, E., Mcleod, E., Pidgeon, E., Simpson, S.** (2017). Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15 (1), 42–50. <https://doi.org/10.1002/fee.1451>
- Kandus, P., Morandeira, N., Schivo, F.** (2010). Bienes y servicios ecosistémicos de los humedales del Delta del Paraná. *Wetlands International*, 1, 32. http://www.produccion-animal.com.ar/regiones_ganaderas/27-Ecosist_del_Delta-2010.pdf
- Lohberger, S., Stängel, M., Atwood, E. C., Siegert, F.** (2018). Spatial evaluation of Indonesia's 2015 fire-affected area and estimated carbon emissions using Sentinel-1. *Global Change Biology*, 24 (2), 644–654. <https://doi.org/10.1111/GCB.13841>
- Lovelock, C. E. & Duarte, C. M.** (2019). Dimensions of blue carbon and emerging perspectives. In *Biology Letters* (Vol. 15, Issue 3). Royal Society Publishing. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0781>
- McKinley, E., Aller-Rojas, O., Hattam, C., Germond-Duret, C., San Martín, I. V., Hopkins, C. R., Aponte, H., Potts, T.** (2018). Charting the course for a blue economy in Peru: a research agenda. *Environment, Development and Sustainability*, 21 (5), 2253–2275. <https://doi.org/10.1007/S10668-018-0133-Z/TABLES/1>
- Medrano, R., Chupan, L., Vila, M.** (2012). Almacenamiento de carbono en especies predominantes de flora en el lago Chinchaycocha. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 02 (02), 110–117. <https://doi.org/10.18259/acs.2012013>
- Ministerio del Ambiente.** (2015). *Estrategia Nacional de Humedales*. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/01/Anexo-Decreto-Supremo-Nº-004-2015-MINAM2.pdf>
- Mita, M.** (2020). Evaluación de la captura de carbono en los bofedales de la laguna de conococha en base a la especie de flora predominante del área de estudio - provincia de Recuay - departamento de Ancash – 2018 [Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. *Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo*. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/4145>
- Mitsch, W. & Gosselink, J.** (2015). Wetlands Fifth Edition. *Wi Ley*, 91 (5), 721.
- Moritsch, M. M., Young, M., Carnell, P., Macreadie, P. I., Lovelock, C., Nicholson, E., Raimondi, P. T., Wedding, L. M., Lerodiacou, D.** (2021). Estimating blue carbon sequestration under coastal management scenarios. *Science of the Total Environment*, 777, 145962. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145962>
- Murray, N. J., Phinn, S. R., DeWitt, M., Ferrari, R., Johnston, R., Lyons, M. B., Clinton, N., Thau, D., Fuller, R. A.** (2019). The global distribution and trajectory of tidal flats. *Nature*, 565(7738), 222-225. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0805-8>
- Ochoa-Balbacea, D., Gonzáles, S., Apeño, A., Aponte, H.** (2022). Hábitats prioritarios en un humedal costero del Pacífico: Propuesta de un índice basado en servicios ecosistémicos. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(178), 182-191. <https://doi.org/10.18257/raccefy.1569>
- Owers, C. J., Rogers, K., Woodroffe, C. D.** (2018). Spatial variation of above-ground carbon storage in temperate coastal wetlands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 210, 55–67. <https://doi.org/10.1016/J.ECSS.2018.06.002>
- Palomino, D. & Cabrera, C.** (2008). Estimación del servicio ambiental de captura del CO₂ en la flora de los humedales de Puerto Viejo. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 10(2007), 49-59. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bivirtualdata/publicaciones/geologia/vol10_n20/a07.pdf
- Paredes-García, S. S., Moreno-Casasola, P., de la Barrera, E., García-Oliva, F., Lindig-Cisneros, R.** (2021). Biomass and carbon storage in a continental wetland in Cuitzeo, Michoacán, Mexico. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 12 (2), 416–441. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2021-02-09>
- Pérez, P., Luccini, E., Herrera, L., Parodi, M., Matar, M., Barrera, L., Mechni, M., Masramón, E.** (2015). Cuantificación de la captura de CO₂ por la flora nativa de totora en un humedal costero en Perú. *Energeia*, 13 (13), 73–80. <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/revistas/cuantificacion-captura-co2-flora-nativa.pdf>
- Portela, L. & Rivero, A.** (2019). Valoración económica de bienes y servicios ecosistémicos en montañas de Guamuha, Cienfuegos, Cuba. *Universidad y Sociedad*, 11(2019), 47-57. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202019000300047
- ProNaturaleza.** (2010). *Documento base para la elaboración de una estrategia de conservación de los humedales de la costa peruana*. GyG Impresores SAC. <https://docplayer.es/69539307-Humedales-de-la-costa-peruana.html>

- Pulido-Capurro, V. M. & Bermúdez-Díaz, L.** (2018). Estado actual de la conservación de los hábitats de los Pantanos de Villa, Lima, Perú. *Arnaldoa*, 25 (2), Article 2. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.252.25219>
- Ramírez, D., Aponte, H., Cano, A.** (2010). Flora vascular y vegetación del humedal de Santa Rosa (Chancay, Lima). *Revista Peruana de Biología*, 17(1), 105-110. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1727-99332010000100012&script=sci_arttext
- Rügnitz, M., Chacón M., Porro, R.** (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consórcio Iniciativa Amazônica (IA). http://www.katoombagroup.org/documents/tools/ICRAF_GuiaDeterminacionCarbono_esp.pdf
- Sadat-Noori, M., Rankin, C., Rayner, D., Heimhuber, V., Gaston, T., Drummond, C., Chalmers, A., Khojasteh, D., Glamore, W.** (2021). Coastal wetlands can be saved from sea level rise by recreating past tidal regimes. *Scientific Reports*, 11 (1), 1196. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-80977-3>
- Sapkota, Y. & White, J. R.** (2020). Carbon offset market methodologies applicable for coastal wetland restoration and conservation in the United States: A review. *Science of The Total Environment*, 701, 134497. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.134497>
- Sequeiros, D. & Cazorla, J.** (2020). Servicio ambiental de captura de carbono de los bofedales del Centro Poblado Alto Perú, Tacna. *Ingeniería Investiga*, 2 (2), 357–375. <https://doi.org/10.47796/ING.V2I2.411>
- Trinidad, C. & Jakob, M.** (2019). *Precio al carbono en América Latina tendencias y oportunidades* (Vol. 1). SPDA. https://spda.org.pe/wpfb-file/precio-al-carbono-en-al_digital_6nov_2-pdf/
- Ullman, R., Bilbao-Bastida, V., Grimsdi TnCh, G.** (2013). Including Blue Carbon in climate market mechanisms. *Ocean and Coastal Management*, 83, 15–18. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.02.009>
- Valles-Maravi, P. A., Cabrera-Dionicio, C., Quispe-Alvay, A. A.** (2020). Identificación de potenciales fuentes económicas para el humedal de los Pantanos de Villa. *South Sustainability*, 3 (1), e045–e045. <https://doi.org/10.21142/SS-0301-2022-E045>
- Vanderklift, M. A., Marcos-Martínez, R., Butler, J. R. A., Coleman, M., Lawrence, A., Prislán, H., Steven, A. D. L., Thomas, S.** (2019). Constraints and opportunities for market-based finance for the restoration and protection of blue carbon ecosystems. *Marine Policy*, 107, 103429. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2019.02.001>
- Velásquez, V.** (2017). *Captura y almacenamiento de carbono relacionado con la totora Schoenoplectus californicus del Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo-Végueta 2017*. Universidad Nacional Jose Faustino Sanchez Carrión.
- Verones, F., Bartl, K., Pfister, S., Vilchez, R. J., 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 and Technology*, 46 (9), 4966–4974. <https://doi.org/10.1021/ES204155G>
- Wan, X., Li, Q., Qiu, L., Du, Y.** (2021). How do carbon trading platform participation and government subsidy motivate blue carbon trading of marine ranching? A study based on evolutionary equilibrium strategy method. *Marine Policy*, 130, 104567. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2021.104567>
- Yamin, F.** (2012). *Climate Change and Carbon Markets: A Handbook of Emissions Reduction Mechanisms*. Routledge. https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=gWWsBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=I2mnANKqcu&sig=kNOV1qgc3906rVCvnMnkXH06mGQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Yao, Y., Ge, N., Yu, S., Wei, X., Wang, X., Jin, J., Liu, X., Shao, M., Wei, Y., Kang, L.** (2019). Response of aggregate associated organic carbon, nitrogen and phosphorous to re-vegetation in agro-pastoral ecotone of northern China. *Geoderma*, 341, 172–180. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2019.01.036>
- Zamboni, N. S., Noletto Filho, E. M., Carvalho, A. R.** (2021). Unfolding differences in the distribution of coastal marine ecosystem services values among developed and developing countries. *Ecological Economics*, 189, 107151. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2021.107151>
- Zuluaga, L. & Castro, E. S.** (2018). Valoración de servicios ambientales por captura de CO2 en un ecosistema de Bosque seco Tropical en el municipio de El Carmen de Bolívar, Colombia. *Luna Azul*, 47, 01–20. <https://doi.org/10.17151/luaz.2019.47.1>

Artículo original

Dinámicas espacio-temporales de la deforestación en los municipios de Riosucio y Río Quito, Chocó, Colombia

Spatial and temporal dynamics of deforestation in Riosucio and Río Quito municipalities, Chocó, Colombia

 Jhon Restrepo^{1,*},  Natalia Hoyos²,  Juan Restrepo³

¹ Geólogo, investigador independiente

² Departamento de Historia y Ciencias Sociales, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia

³ Grupo de investigación en Geociencias-GEO4, Departamento de Física y Geociencias, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia

Resumen

La deforestación tiene efectos globales y locales que incluyen las emisiones de gases de efecto invernadero, la erosión de los suelos, los cambios en el ciclo hidrológico y la pérdida de biodiversidad. Este estudio tuvo como objetivo analizar los patrones espaciales y temporales de la deforestación en los municipios de Riosucio y Río Quito en la región del Pacífico colombiano en el periodo de 2015 a 2020 y modelar un escenario de la tendencia de la deforestación para el periodo 2020-2025. El análisis de la deforestación histórica (2015-2020) se hizo a partir de la base de datos de Global Forest Change, en tanto que el escenario futuro (2020-2025) se modeló a partir de la plataforma Dinamica EGO que también se usó para evaluar los efectos de múltiples variables en la deforestación. Los resultados indicaron que las distancias reducidas con respecto a áreas previamente deforestadas, a zonas de explotación de oro de aluvión, a cuerpos de agua y a ríos, así como las pendientes bajas, favorecen la deforestación en ambos municipios. La proximidad a cuerpos de agua fue la variable que más influyó en la deforestación en Riosucio, mientras que la proximidad a áreas de explotación de oro de aluvión fue la más relevante en Río Quito. La simulación de la deforestación para el año 2025 arrojó un aumento de 3,1 % en Riosucio y de 7,3 % en Río Quito comparada con la del periodo 2015-2020. Nuestros resultados difieren parcialmente de lo encontrado en otros estudios nacionales y regionales, lo que se explica por la diferencia en la definición y resolución espacial de ciertas variables. Por ello se requieren estudios locales que sirvan de insumo para las estrategias de control y reducción de la deforestación.

Palabras clave: Deforestación; Chocó; Dinámica EGO.

Abstract

This study aims to analyze the spatial and temporal deforestation patterns in Riosucio and Río Quito municipalities in the Colombian Pacific region from 2015 to 2020 and to model a trend deforestation scenario for 2020-2025. The historical deforestation analysis (2015-2020) was done using the Global Forest Change database, while the future scenario (2020-2025) was modeled through Dinamica EGO, which was also used to evaluate the effect of multiple variables on deforestation. Our results indicate that short distances to previously deforested areas, alluvial gold mining areas, water bodies and rivers, and low slopes have promoted deforestation in both municipalities. Proximity to water bodies was the variable that most influenced deforestation in Riosucio, while proximity to alluvial gold mining areas was the most relevant in Río Quito. The deforestation simulation for 2025 indicated an increase of 3,1% in deforested areas for Riosucio and of 7,3% for Río Quito compared to the findings for 2015-2020. Our results partially differ from other national and regional studies due to differences in the definition and spatial resolution of certain variables; this highlights the need for local studies as input for the implementation of deforestation control and reduction strategies.

Keywords: Deforestation; Chocó; Dinamica EGO.

Citación: Restrepo J, Hoyos N, Restrepo J. Dinámicas espacio-temporales de la deforestación en los municipios de Riosucio y Río Quito, Chocó, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185):977-995, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1961>

Editor: Camila Rodríguez

***Correspondencia:**

Jhon Restrepo; drestrepoj06@gmail.com

Recibido: 31 de julio de 2023

Aceptado: 7 de noviembre de 2023

Publicado en línea: 27 de noviembre de 2023



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

Introducción

En el marco de los procesos de transformación de la cobertura vegetal, la deforestación tiene efectos globales y locales como las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el cambio climático, la erosión de los suelos, los cambios en el ciclo hidrológico y la pérdida de biodiversidad (Kissinger *et al.*, 2012; Powers & Jetz, 2019; Winkler *et al.*, 2021). La deforestación en los bosques tropicales es especialmente crítica, puesto que estos representan el 45 % de la extensión de bosques a nivel global y cumplen un papel fundamental para la preservación de la biodiversidad, la regulación hídrica, la mitigación del cambio climático, el control de inundaciones y las concentraciones de CO₂ (Guimberteau *et al.*, 2017; Yu, 2017; Salazar *et al.*, 2018; Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO, 2020). En Colombia, el 71,04 % del territorio continental está cubierto por bosques y áreas seminaturales donde el bosque húmedo tropical es el ecosistema con la mayor biodiversidad del país (IDEAM, 2016). Esta diversidad está amenazada por procesos de cambio en el uso del suelo asociados con la deforestación (Chaves *et al.*, 2021). A nivel nacional se han determinado múltiples factores biofísicos y socioeconómicos relacionados con la deforestación, entre ellos, la intensidad de las precipitaciones, la temperatura, la pendiente del terreno, la presencia de cuerpos de agua, la distancia de áreas previamente deforestadas, la densidad de la población rural, la ganadería, los cambios en el producto interno bruto, la persistencia del conflicto armado, y los títulos y solicitudes mineras. El efecto de estos factores en la deforestación varía entre regiones (Armenteras *et al.*, 2013; Fagua *et al.*, 2019; González-González *et al.*, 2021).

La región del Pacífico colombiano tiene una extensión considerable de bosque húmedo tropical en el denominado Chocó biogeográfico (Fagua *et al.*, 2019), región caracterizada por una gran diversidad ecosistémica y número de especies endémicas de plantas, aves, anfibios y mariposas (Domínguez, 2011). En términos de deforestación, en el 2019 esta región representaba el 9 % (14.120 ha) del total de áreas deforestadas a nivel nacional, ubicándose después de las regiones de la Amazonía y la Andina (IDEAM, 2020). Los factores asociados a la deforestación en esta región incluyen la expansión de la frontera agrícola, la minería ilegal de aluvión, la presencia de centros urbanos, la densidad de vías y gobiernos locales débiles (González-González *et al.*, 2021; Fagua *et al.*, 2019; IDEAM, 2018). Se estima que los dos primeros factores han generado más de la mitad de la pérdida de bosque en las últimas dos décadas (Anaya *et al.*, 2020). Particularmente en el departamento de Chocó (extremo norte de la región del Pacífico colombiano), la deforestación es causada, en orden de relevancia, por los incendios (naturales y antrópicos), la minería ilegal, la agricultura, y en menor medida, la construcción de obras civiles (CODECHOCÓ, 2022). Los municipios chocoanos de Riosucio y Río Quito hacen parte de los núcleos de alta deforestación del Pacífico Norte y Centro, respectivamente (Departamento Nacional de Planeación, 2020). Riosucio se encuentra entre los primeros 25 municipios a nivel nacional con mayor área deforestada (IDEAM, 2020) y es representativo de la deforestación asociada con la expansión de la frontera agrícola (IDEAM, 2018). Río Quito, por su parte, es uno de los municipios con mayor proporción de área afectada por la minería ilegal de oro de aluvión (MinEnergía, 2020). Estas características hacen de estos dos municipios excelentes casos de estudio para analizar el efecto local de las múltiples variables asociadas con la deforestación y establecer diferencias con estudios previos a escala nacional y regional (Armenteras *et al.*, 2013; Fagua *et al.*, 2019; Anaya *et al.*, 2020; González-González *et al.*, 2021).

En este contexto, en el presente trabajo se analizaron los patrones espaciales y temporales de la deforestación en Riosucio y Río Quito del periodo 2015-2025 y se evaluó el efecto de la presencia de vías, las áreas de explotación minera de oro de aluvión, los centros urbanos, las áreas previamente deforestadas, los cuerpos de agua, los ríos, la pendiente del terreno y las áreas protegidas en la deforestación. Aunque el efecto de dichos factores ha sido evaluado en estudios anteriores a escala nacional y regional (Armenteras

et al., 2013; Fagua *et al.*, 2019; Anaya *et al.*, 2020; González-González *et al.*, 2021), su comportamiento a nivel local es incierto, ya que las relaciones entre los patrones y los procesos espaciales pueden variar dependiendo de la escala del análisis (Turner, 1989; Turner *et al.*, 1989; Wu, 2004; Šímová & Gduvolá, 2012). Dadas las actividades antrópicas que ocasionan la deforestación en estos municipios, nuestra hipótesis de trabajo es que la variable con mayor incidencia en la deforestación en Riosucio sería la proximidad de áreas previamente deforestadas, en tanto que en Río Quito lo sería la proximidad de áreas de explotación minera de oro de aluvión (DANE, 2018^a; Anaya *et al.*, 2020; UNODC, 2022). Además, proyectamos que el área deforestada aumentará entre el 2020 y el 2025 debido a la categorización de estos municipios como pertenecientes a núcleos de deforestación.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio incluyó los municipios de Riosucio y Río Quito, ubicados en el norte y centro del departamento del Chocó, respectivamente (Figura 1). Riosucio se localiza en la zona del bajo río Atrato conocida como el Darién chochoano (CLOPAD, 2011); tiene

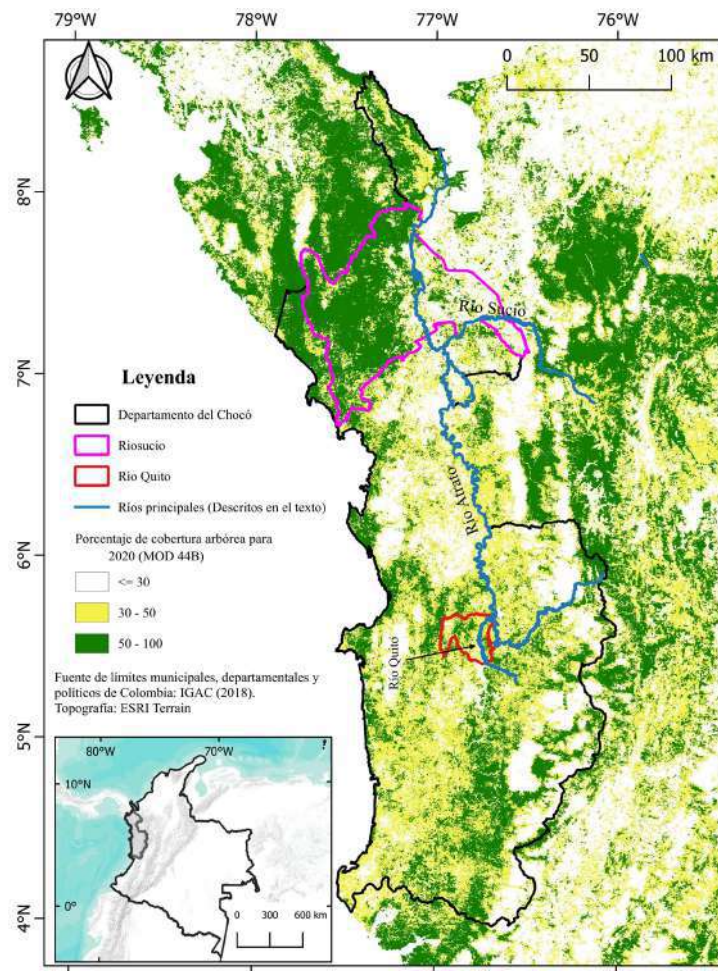


Figura 1. Localización del área de estudio, municipios de Riosucio y Río Quito, y cobertura arbórea para el año 2020 del producto MOD44B VCF (*Vegetation Continuous Fields*) de MODIS con una resolución espacial de 250 m (DiMiceli *et al.*, 2015). Los valores de cobertura arbórea > 30 % representan la cobertura de bosque de acuerdo con la definición de Hansen *et al.* (2013) y se presentan como contexto regional.

7.046 km² de área, 4 m s.n.m. de elevación promedio, 28 °C de temperatura media y una precipitación media anual de 7.774 mm (CLOPAD, 2011). Su población es de 28.000 habitantes, con una densidad poblacional de 4 habitantes/km² y un índice de pobreza multidimensional de 70,9 %; sus actividades económicas principales son la explotación agrícola, forestal y pecuaria (DANE, 2018a, 2018b). Las áreas protegidas más cercanas a Riosucio son los parques nacionales naturales de Los Katíos, Paramillo y Las Orquídeas.

El municipio de Río Quito se encuentra en la zona alta del río Atrato, tiene una extensión de 700 km² y una elevación promedio de 45 m s.n.m. (Alcaldía de Río Quito, 2018). Su población es de 9.292 habitantes, con una densidad poblacional de 12,81 habitantes/km² y un índice de pobreza multidimensional de 66,8 %; las actividades económicas predominantes son la minería ilegal de oro de aluvi6n, la agricultura, la pesca y la explotaci6n maderera (DANE, 2018a, 2018b). Las áreas protegidas más cercanas a Río Quito son los parques nacionales naturales de Utría y Tatamá. Allí, la extracci6n ilegal de oro se hace con maquinaria en tierra (retroexcavadoras) que provoca cambios en el paisaje circundante tales como alteraciones en los cuerpos de agua, deforestaci6n y afloramiento de suelos por degradaci6n de la cobertura vegetal (UNODC, 2022).

Variaci6n espacial y temporal de la deforestaci6n

Esta se estimó a partir de los datos anuales de la *Global Forest Change* (GFC) (Hansen *et al.*, 2013) sobre la cobertura del bosque entre el 2000 y el 2021, registrados a partir de las imágenes de Landsat TM/ETM+/OLI, y que ya se han empleado en estudios sobre la deforestaci6n en la regi6n de interés (Fagua & Ramsey, 2019; Anaya *et al.*, 2020). En nuestro análisis usamos los datos de pérdida de bosque (*forest loss*) entre el 2015 y el 2020 de forma que coincidieran temporalmente con las otras variables consideradas para modelar el cambio de cobertura del bosque.

Los datos de la base de datos del GFC se tomaron de su portal en Internet (Hansen *et al.*, 2013), restringiéndolos a los límites municipales seleccionados, para obtener la extensión del área deforestada en cada año entre el 2015 y el 2020. Estos datos evidenciaron la pérdida de bosque, es decir, puntos en donde la cobertura de bosque disminuyó a menos del 30 %, con una resoluci6n espacial de 30 m en el Ecuador (Hansen *et al.*, 2013). Posteriormente, se calculó el porcentaje anual deforestado en relaci6n con el área total de cada municipio (Ecuaci6n 1):

$$\% \text{ deforestado del área del municipio} = \frac{\text{Área deforestada}}{\text{Área total del municipio}} \times 100 \quad (1)$$

A partir de esta base de datos también se crearon los mapas de entrada para el modelo de Dinámica EGO (*Environment for Geoprocessing Objects*).

Generaci6n de variables predictoras

Se generaron las variables espaciales para las zonas de estudio determinadas en estudios previos como relevantes para la deforestaci6n (Armenteras *et al.*, 2013; Fagua *et al.*, 2019; González-González *et al.*, 2021). De todas estas variables, excepto la pendiente y las áreas previamente deforestadas, se generaron mapas de distancia euclidiana con una resoluci6n de 30 m coincidente con la de los ráster de elevaci6n y áreas deforestadas (Tabla 1). Las áreas deforestadas funcionaron como variable dinámica y de respuesta en el modelo, ya que fueron actualizadas en cada año considerado (Soares-Filho *et al.*, 2009).

Para incluir los efectos de las variables predictoras, incluso si se encontraban por fuera del municipio, se estableció una zona adicional de 30 km a partir del límite municipal. Se usaron datos de libre acceso, en su mayoría de fuentes gubernamentales (Tabla 1) (Figura S1, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>), excepto los relacionados con vías y drenajes. En el caso de las vías, se usaron fuentes oficiales (IGAC, 2018; INVIAS, 2020), así como no oficiales (HOTOSM, 2022), ya que las vías secundarias y terciarias no estaban completamente cubiertas en la cartografía oficial. En el caso de los ríos, se usó la base de datos Global River Database (Lehner & Grill, 2013), ya que los drenajes

Tabla 1. Principales características de las variables predictoras y de respuesta para el análisis de deforestación

Variable	Escala/ resolución	Formato	Fuente ¹	Variable derivada ³
Vías primarias	1:25.000	Vector	IGAC (2018), INVIAS (2020), HOTOSM (2022)	Distancia
Vías secundarias	1:25.000	Vector	HOTOSM (2022)	Distancia
Áreas de EVOA	1:25.000	Vector	MinEnergía (2020)	Distancia
Centros urbanos	-	Vector	IGAC (2018)	Distancia
Cuerpos de agua ²	30 m	Vector	IGAC (2018)	Distancia
Ríos	1:25.000	Vector	Lehner & Grill (2013)	Distancia
Modelo de elevación digital	30 m	Ráster	USGS (2018)	Pendiente
Áreas protegidas	1:25.000	Vector	IGAC (2020)	Distancia
Áreas deforestadas	30 m	Ráster	Hansen et al. (2013)	Variable dinámica y de respuesta

¹ IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, HOTOSM: *Humanitarian Open Street Map*, USGS: *United States Geological Survey*, MinEnergía: Ministerio de Minas y Energía

² Incluyen ciénagas, lagunas, pantanos, madrevejas y otros cuerpos de agua registrados en la base de datos del IGAC (2018).

³ Las variables derivadas de distancia representan la distancia en metros desde cada píxel hasta el elemento respectivo más cercano (por ejemplo, hasta la vía primaria más cercana).

consignados en la cartografía oficial presentaban errores de topología, por ejemplo, la falta de conexión entre segmentos. Por último, se usó la variable de áreas de explotación de oro de aluvión (EVOA) reportadas en lugar de los títulos mineros (**González-González et al., 2021**), pues su existencia no necesariamente indica actividad minera.

El procesamiento de datos espaciales se hizo con el programa QGIS v. 3.22.7 (**QGIS Development Team, 2022**). Antes de ejecutar el modelo en Dinámica EGO se comprobó la independencia de las variables predictoras mediante un análisis de correlación paramétrica a partir de los resultados de los coeficientes de Cramer y de probabilidad conjunta de la información (**Bonham-Carter, 1994**) (**Tabla S1**, <https://raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1961/3655>).

Modelo Dinamica EGO

Se empleó el modelo Dinamica EGO v. 7.3.0 (**Dinamica EGO Development team, 2022**) para modelar el efecto de las variables predictoras en la deforestación. El procedimiento de ejecución del modelo fue modificado a partir de la guía propuesta por **Soares-Filho et al. (2009)** para los modelos de deforestación en ecosistemas tropicales (**González-González et al., 2021; Maeda et al., 2011; Piontekowski et al., 2019**), proceso que incluye los siguientes pasos (**Figura 2**):

1. Cálculo de la matriz de cambio de uso y cobertura del suelo (*Land Use Land Cover*, LULC) considerando únicamente dos usos: forestado y deforestado. Según **Soares-Filho et al. (2009)**, la matriz de cambio cuantifica la transformación de un sistema en un periodo de tiempo dado mediante la fórmula (**Soares-Filho et al., 2002**):

$$P^t = HV^t H^{-1} \quad (2),$$

donde H es la matriz que resulta de la tabulación de los mapas iniciales y finales, H^{-1} es la matriz transpuesta, P^t es la probabilidad de transición, V son los valores propios

(*eigenvalues*) de P^t y t es el periodo discreto de los mapas de paisaje. Aquí aplicamos la matriz de transición para obtener los cambios en mapas de deforestación entre el 2015 y el 2020 a partir de los datos de pérdida de bosque del GFC (Hansen *et al.*, 2013).

2. Cálculo de los pesos de evidencia (*Weights of Evidence*, WoE). La probabilidad de transición se determinó con el método de pesos de evidencia (Soares-Filho *et al.*, 2009), el cual requiere de variables espacialmente explícitas en forma de mapas de distancia euclidiana que se categorizan en Dinámica EGO estableciendo rangos de valores cuyo efecto se calcula de manera independiente. La magnitud del peso de evidencia determina qué tanto incide una variable en la deforestación asumiendo que los valores positivos favorecen la deforestación y los negativos la retardan. Por último, si los pesos de evidencia son cercanos a cero, la variable no ejerce influencia significativa en la deforestación. En nuestro caso, para determinar la distancia hasta la cual una variable favorecía o retardaba la deforestación, se seleccionó el valor de distancia en que se presentaba un cambio de pesos positivos a negativos, o viceversa, de tal manera que este se interpretara como umbral (Soares-Filho *et al.*, 2009). No se tuvieron en cuenta las variaciones por debajo de la resolución espacial de los mapas de variables (30 m).
3. Calibración de los parámetros internos. La simulación de cambios en LULC se hizo mediante un proceso de autómatas celulares partiendo de dos funciones de probabilidad de transición: *Expander* y *Patcher*. La función *Expander* se usa para analizar la expansión o contracción de parches antiguos con una cierta clase de patrón de LULC, mientras que la función *Patcher* sirve para generar o formar nuevos parches (Soares-Filho *et al.*, 2002). Ambas funciones consideran métricas espaciales, como el tamaño del parche promedio y la varianza y la isometría de área, que son calibradas para reproducir fielmente los patrones del paisaje (González-González *et al.*, 2021) (Tabla S2, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>). Estos parámetros se definieron a partir de los archivos ráster de entrada del modelo para cada municipio (Tabla S2, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>).
4. Validación del modelo. En este paso se usa una función de decaimiento como parte del procedimiento de cálculo de la similitud recíproca. El método compara el mapa simulado con el real y mediante la función exponencial de decaimiento se compara el estado de la celda simulada y el de la observada en diferentes tamaños de ventana (es decir, 3x3 celdas, 5x5 celdas, etc.). En este proceso sólo es necesario evaluar la idoneidad del modelo en relación con los lugares de cambios (Soares-Filho *et al.*, 2009) en los que los valores superiores a 0,5 (50 %) sugieren una gran similitud (Nascimento *et al.*, 2019; Soares-Filho *et al.*, 2002). Los resultados del mapa simulado se verificaron a partir del gráfico de la curva ROC y su área bajo la curva (*area under curve*, AUC), la cual muestra la relación entre la razón de aquellos píxeles modelados como falsos eventos (píxeles que fueron deforestados en la simulación, pero que en el mapa real corresponden a bosque), y aquellos modelados correctamente (píxeles que fueron deforestados tanto en la simulación como en el mapa real) (Mas *et al.*, 2013). La medida del área bajo la curva (AUC) en un análisis ROC permite determinar la consistencia del modelo: las áreas mayores a 0,5 indican que este es significativamente mejor que un modelo aleatorio (Mas *et al.*, 2013).
5. Proyección de las dinámicas de deforestación hasta 2025. Se hizo una proyección a 5 años tomando como punto de partida el mapa real de deforestación del 2020 y empleando los pesos de evidencia y las métricas obtenidas en los pasos anteriores. Además, se realizaron 100 simulaciones para cada municipio con el fin de obtener su porcentaje de coincidencia (es decir, el número de veces que un píxel aparecía deforestado), dividido entre el total de simulaciones (100). Cabe anotar que las áreas deforestadas para el 2025 se calcularon con base en los píxeles que fueron simulados como deforestados en más de la mitad de las 100 simulaciones (es decir, con un porcentaje de coincidencia superior al 50 %).

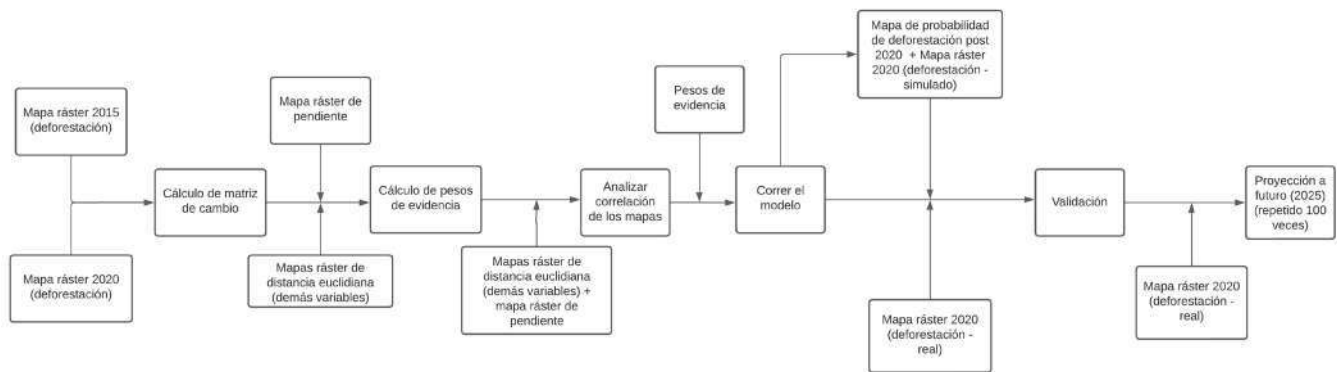


Figura 2. Pasos esquemáticos para modelar la deforestación en Dinámica EGO a partir de las variables seleccionadas

Resultados

Variación espacial y temporal de la deforestación

En Riosucio, los datos del GFC (Hansen *et al.*, 2013) indicaron que el área deforestada anual tuvo una variación entre un valor mínimo de 1.288,8 ha en el 2015 y uno máximo de 11.301,4 ha en el 2016, en tanto que en todo el periodo (2015-2020) sumó 28.573,5 ha (Figura 3). Entre el 2015 y el 2020 la tasa promedio anual de deforestación fue de 4.762 ha/año (Figura 3), lo que equivale a una pérdida promedio anual de bosque de 0,7 % y una pérdida total de 3,8 %. En ese periodo las áreas deforestadas se ubicaban predominantemente en la margen oriental del río Atrato, en el límite entre áreas de bosque y sin bosque (Figura 4); en comparación, la margen occidental del río Atrato aparecía dominada por una cobertura de bosque con áreas deforestadas dispersas (Figura 4). Se observó un aumento significativo de áreas deforestadas en ambas márgenes del río Atrato, particularmente en la occidental (Figura 4).

En Río Quito la extensión de área deforestada anual varió entre un mínimo de 7,6 ha en el 2020 y un máximo de 159,1 ha en el 2017, con una pérdida total de 516 ha entre el 2015 y el 2020 (Figura 3). La tasa promedio anual de deforestación para dicho periodo fue de 86 ha/año, lo que equivale a 0,11 % al año, arrojando una pérdida total de 0,74 % de la superficie boscosa del municipio. En el 2015, el municipio estaba cubierto casi totalmente por bosque (Figura 4); en ese año, la deforestación ocurrió principalmente a lo largo del río Quito, patrón que persistió durante el periodo 2015-2020 (Figura 4).

Efecto de las variables predictoras en la deforestación

Los resultados del modelo Dinámica EGO señalan que las distancias cortas de áreas previamente deforestadas y cuerpos de agua y ríos, así como las pendientes bajas, favorecieron la deforestación en ambos municipios, tal como lo indican los pesos de evidencia positivos (Tabla 2) (Figura S2, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>). Por ejemplo, en Riosucio las distancias menores a 0,57 km de cuerpos de agua favorecieron la deforestación, mientras que este valor fue de 1,89 km en Río Quito (Tabla 2). Por otro lado, hay variables cuyo efecto fue opuesto en cada municipio, es el caso de las vías primarias y secundarias y los centros urbanos, cuyas cortas distancias retardaron la deforestación en Riosucio, pero la favorecieron en Río Quito (Tabla 2) (Figura S2, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>). Una muestra de ello es que las distancias de vías primarias menores a 22,8 km retardaron la deforestación en Riosucio, mientras que las menores de 4,92 km de vías primarias favorecieron la deforestación en Río Quito (Tabla 2). Por último, el único factor que retardó la deforestación en ambos municipios fue la corta distancia de las áreas protegidas (Tabla 2).

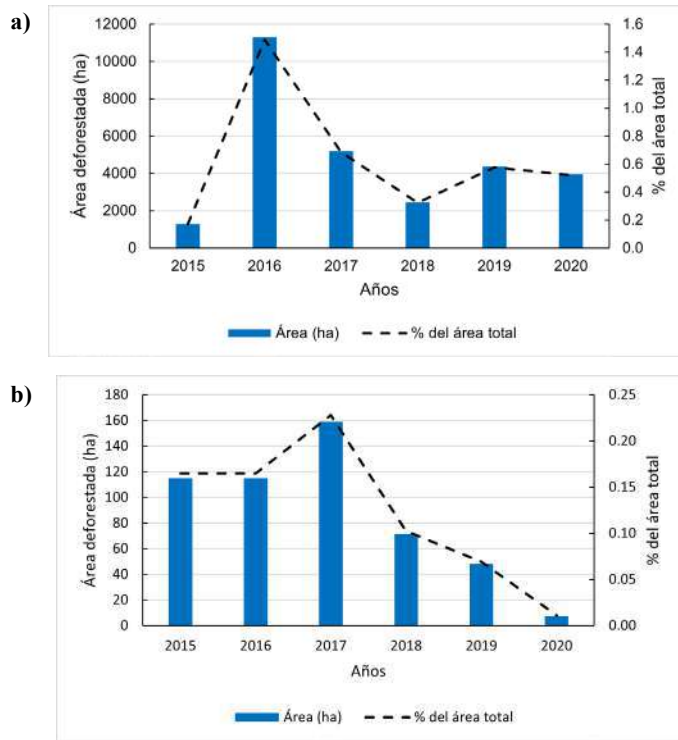


Figura 3. Área deforestada anual para el periodo 2015-2020 y su porcentaje con respecto al área total del municipio: a) Riosucio, b) Río Quito. Valores obtenidos a partir del conjunto de datos de GFC (Hansen *et al.*, 2013).

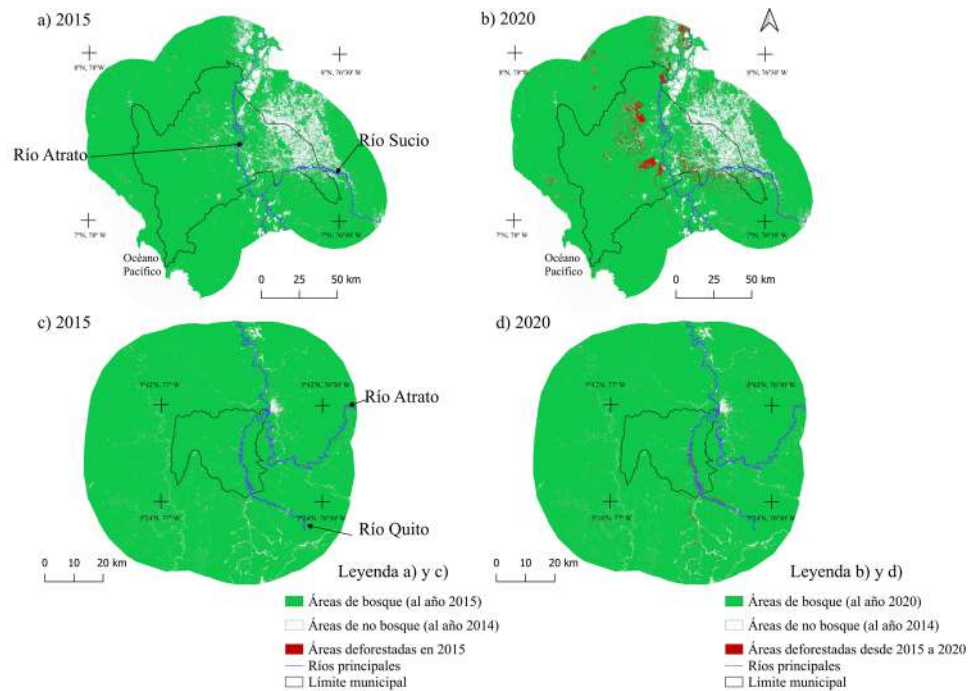


Figura 4. Mapas de las áreas de bosque, no bosque y áreas deforestadas en Riosucio, años 2015 y 2020 (a y b) y Río Quito, años 2015 y 2020 (c y d). Datos de GFC (Hansen *et al.*, 2013). Estos mapas se usaron como los mapas iniciales en el modelo Dinámica EGO.

Tabla 2. Resumen de los pesos de evidencia de las variables predictoras. Los números corresponden al umbral que ejerce efecto en la deforestación, expresado en las unidades de la variable. Los valores indican si la variable retarda (**en negrilla**) o favorece (sin negrilla) la deforestación. Por ejemplo, en Riosucio las distancias <1,71 km de áreas deforestadas favorecieron la deforestación, mientras que las distancias < 22,8 km de las vías primarias la retardaron.

Municipio	Distancia a (Km)								Grados
	Áreas deforestadas	Vías primarias	Vías secundarias	Cuerpos de agua	Ríos	Centros urbanos	Áreas protegidas	Áreas de EVOA	
Riosucio	1,71	22,8	0,12	0,57	3,63	2,28	0,66	12,42	7
Río Quito	2,31	4,92	5,49	1,89	1,2	3	6,6	0,06	6

En Riosucio, los cuerpos de agua constituyeron la variable que promovió la deforestación a distancias más cortas (< 0,57 km), seguida de las áreas previamente deforestadas (< 1,71 km), los ríos (< 3,63 km) y, por último, las áreas de EVOA (<12,42 km) (**Figura S2**, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>).

En Río Quito, las áreas de EVOA fueron el factor que más favoreció la deforestación en distancias cortas (<0,06 km), seguidas de los ríos (<1,2 km), los cuerpos de agua (<1,89 km), las áreas previamente deforestadas (<2,31 km), la cercanía a centros urbanos (<3 km) y vías primarias (<4,92 km) y, por último, a las vías secundarias (<5,49 km) (**Figura S2**, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>).

Verificación del modelo

La comparación de los mapas de deforestación simulados con los reales del año 2020 indicó que en Riosucio se alcanzó una similitud de 50,2 % para una ventana de 11×11 píxeles (165 m de resolución), en tanto que en Río Quito se alcanzó una similitud de 40 % para una ventana de 35×35 píxeles (525 m de resolución) (**Figura 5**). Estos valores de similitud tuvieron incrementos marginales por encima de las resoluciones mencionadas.

En cuanto a los patrones espaciales, la comparación entre los mapas reales y los simulados evidenció que el modelo tuvo una mayor precisión en áreas donde la deforestación cubría una mayor extensión o estaba cerca a áreas previamente deforestadas (**Figura 6A, B**), mientras que la precisión fue menor en áreas de deforestación dispersa que cubrían una extensión menor (**Figura 6C**).

En el caso de las curvas ROC, se obtuvo que el área bajo la curva (AUC) fue de 0,79 para Riosucio y de 0,78 para Río Quito, siendo ambas significativamente mayores a las áreas que arrojarían modelos aleatorios (**Figura 7**).

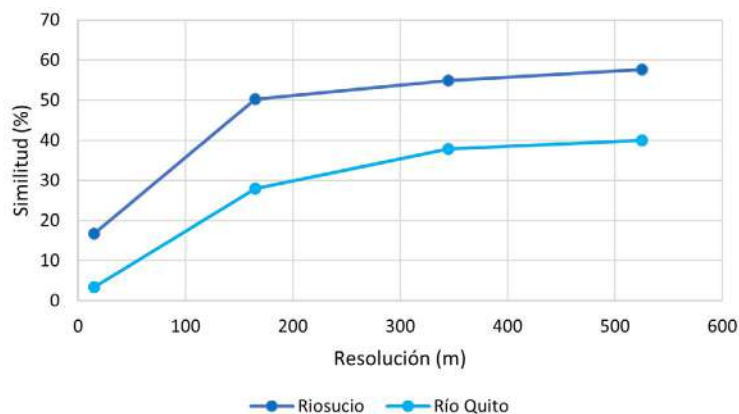


Figura 5. Porcentaje de similitud en función de la resolución espacial en los mapas simulados y reales de 2020 de Riosucio y Río Quito

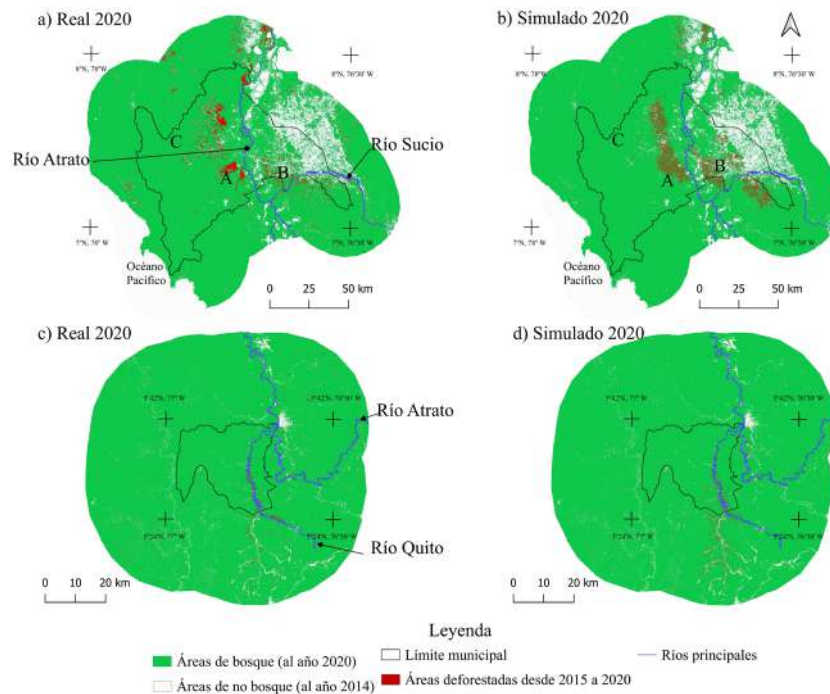


Figura 6. Comparación espacial de los mapas de deforestación reales y simulados: **a)** Mapa real de Riosucio 2020. **b)** Mapa simulado de Riosucio 2020. **c)** Mapa real de Río Quito 2020. **d)** Mapa simulado de Río Quito 2020. Los mapas reales se generaron con datos de GFC (Hansen *et al.*, 2013) y los simulados con el modelo Dinamica EGO.

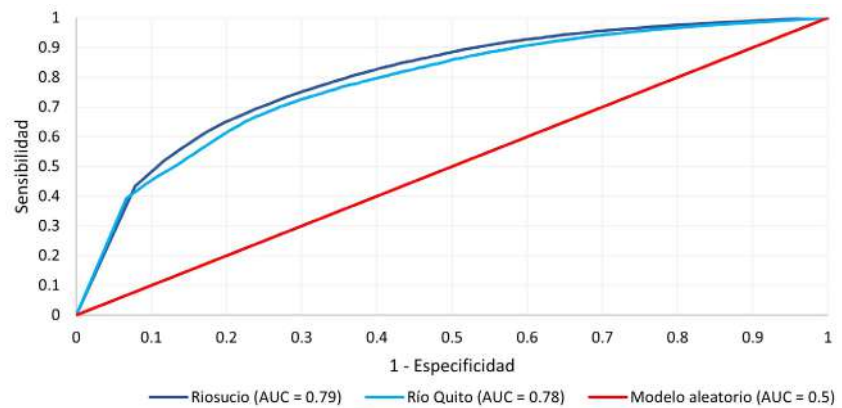


Figura 7. Curva ROC obtenida a partir de la comparación de la probabilidad de deforestación posterior al 2020 comparada con la observada entre 2015 y 2020 en ambos municipios usando 100 intervalos y el método de incremento de igual probabilidad

Simulación del escenario de tendencia de la deforestación

Los resultados indicaron que para el periodo 2020-2025, se deforestarían en Riosucio 29.639,6 ha, superando en 886,11 ha (+3,1 %) lo deforestado entre 2015 y 2020 (28.753,50 ha). En Río Quito, por su parte, se deforestarían 553,7 ha, superando en 37,66 ha (+7,3 %) lo deforestado entre 2015 y 2020 (516,02ha) (Figura 8). Es importante anotar que estas áreas se calcularon con base en los píxeles simulados como deforestados en más de la mitad de las 100 simulaciones, es decir, aquellos con un porcentaje de coincidencia superior al 50 % (Figura 8).

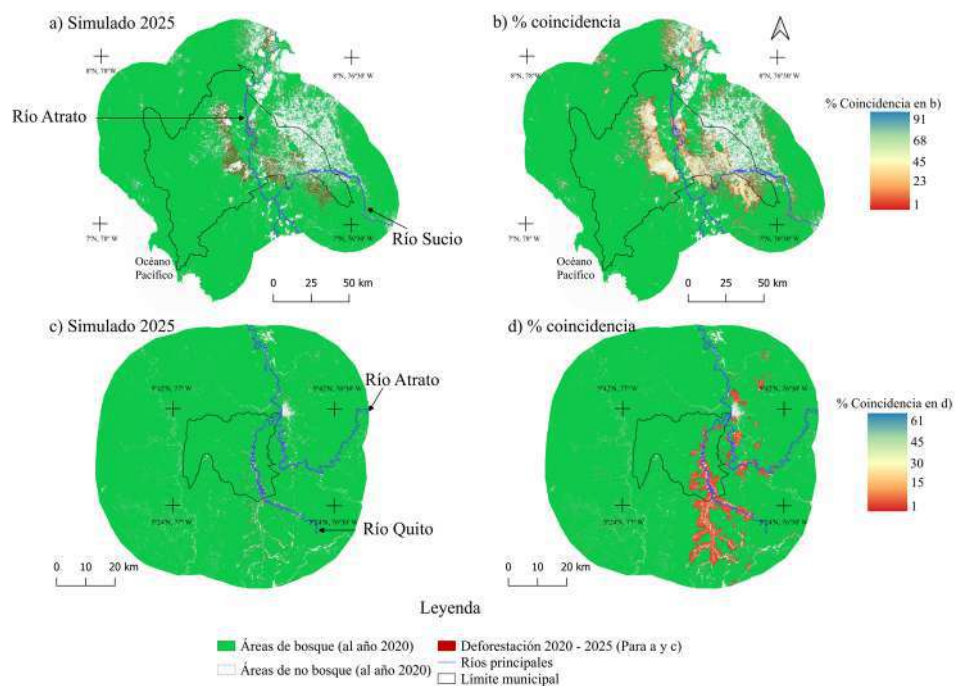


Figura 8. Simulación de la deforestación para el año 2025 en **a)** Riosucio y **c)** Río Quito, y porcentaje de coincidencia para 100 simulaciones en **b)** Riosucio y **d)** Río Quito. En **a)** y **c)** el área deforestada está representada por píxeles con un porcentaje de coincidencia > 50 %. En **b)** y **d)** el porcentaje de coincidencia se indica para cada píxel simulado como deforestado en al menos una simulación, por ejemplo, un píxel con un valor de coincidencia de 50 % indica que en 50 de 100 simulaciones se lo simuló como deforestado.

Los patrones espaciales de la deforestación simulada para el año 2025 indicaron que en Riosucio la deforestación se presentará predominantemente hacia la margen occidental del río Atrato y en la margen sur del río Sucio, zonas donde se observó la mayor deforestación entre el 2015 y el 2020 (**Figuras 4 y 8**). Por su parte, en Río Quito las áreas deforestadas simuladas para el 2025 siguieron el curso del río principal del municipio, tal como se comportó espacialmente la deforestación entre el 2015 y el 2020. Sin embargo, se evidenció un aumento en las áreas deforestadas en zonas más alejadas del río (**Figuras 4 y 8**).

La consistencia en la predicción de la deforestación registró valores entre 1 y 91 % en Riosucio, y entre 1 y 61 % en Río Quito (**Figura 8**). Los porcentajes más altos se presentaron cerca de las áreas previamente deforestadas y disminuyeron gradualmente a medida que aumentaba dicha distancia (**Figura 8**).

Discusión

Variación espacial y temporal de la deforestación en el contexto nacional y regional

La comparación del área deforestada anual en cada municipio y la de nivel nacional evidenció que el máximo en Río Quito ocurrió en el mismo año (2017) en que se dio a nivel nacional (**Global Forest Watch, 2022**), en tanto que las dinámicas anuales de Riosucio no coincidieron con las nacionales, excepto para el valor mínimo dentro del periodo considerado, que se registró en el año 2015 (**Figura 9a**).

Por el otro lado, la comparación del área deforestada municipal con la departamental (Chocó) reflejó un comportamiento similar en el municipio de Riosucio (**Figura 9b**). Además, se observó que en ambos municipios, así como a nivel departamental (**Figuras 3 y 9b**), se dió una disminución de la deforestación en el 2018, coincidente con la puesta

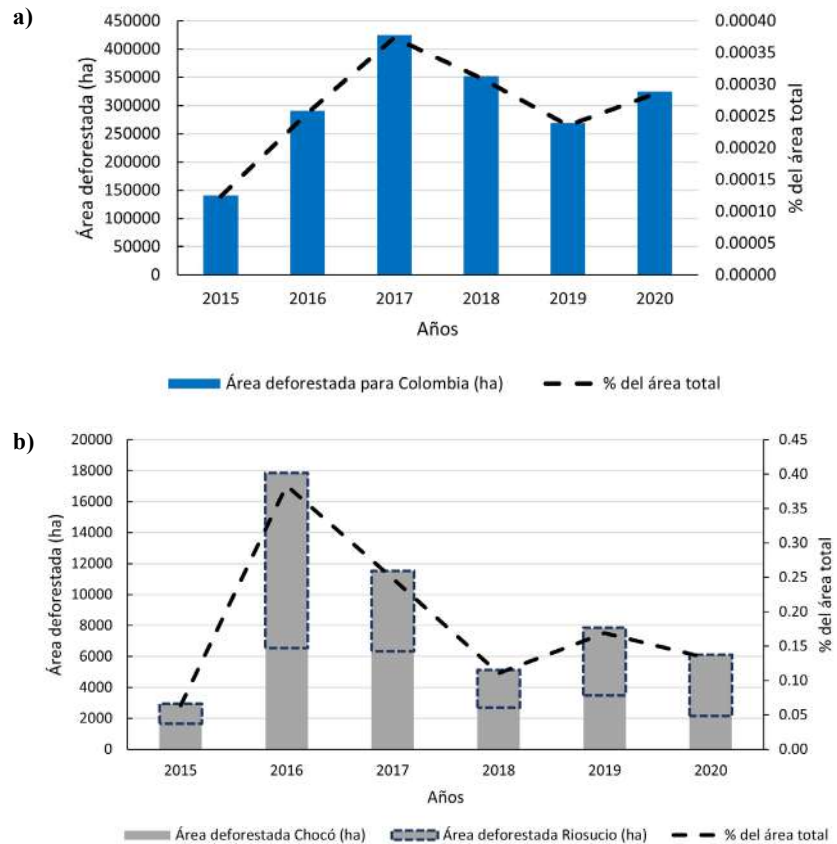


Figura 9. Área deforestada anual y su porcentaje con respecto a la superficie total para **a)** Colombia y **b)** el departamento del Chocó, incluido el municipio de Riosucio (**Global Forest Watch, 2022**)

en marcha de una operación militar en contra de la minería ilegal en este departamento (**Semana, 2019**). Además, es notorio que en los años 2016, 2019 y 2020, el área deforestada en Riosucio superó la de todos los otros municipios del departamento.

Los datos sobre el área deforestada obtenidos del GFC (**Hansen et al., 2013**) confirmaron la relevancia del municipio de Riosucio dentro del panorama nacional de deforestación (**IDEAM, 2021**), con una tasa promedio anual de 0,7 %, superior a la tasa nacional reportada para periodos anteriores (0,62 % entre 1990 y 2005) y a la registrada en Suramérica (0,45 % entre 1990 y 2010) (**Armenteras et al., 2013**). En términos generales, ambos municipios presentan las características descritas por **Armenteras et al. (2013)** para los núcleos de deforestación a nivel nacional, es decir, bosques en tierras planas, altos índices de pobreza y una economía ilícita, específicamente la extracción ilegal de madera en Riosucio y la minería ilegal de oro de aluvión en Río Quito (**IDEAM, 2018**). Por último, se resalta el papel preponderante que ha jugado Riosucio en la dinámica de deforestación en Chocó, pues representó el 55 % de la deforestación del departamento durante el periodo de estudio.

En cuanto a la interpretación de las dinámicas de deforestación en Riosucio, **Armenteras et al. (2011)** indican que una extensión considerable de la deforestación en el país se presenta en las áreas de transición entre regiones biogeográficas, en este caso, entre la región Andina y la del Pacífico. Según estos autores, las posibles razones incluyen cambios en las condiciones geográficas y socioeconómicas en estas áreas de transición. Asimismo, **Rodríguez et al. (2013)** indican que estas áreas de transición se han caracterizado históricamente por conflictos sociopolíticos en los que la concentración de tierras permite obtener cierto control político y económico, propiciando la remoción ilegal

de cobertura vegetal. Río Quito, por otra parte, se encuentra en el centro de la región del Pacífico, por lo que la deforestación allí obedece a procesos diferentes relacionados con las actividades extractivas de minería de oro de aluvión (IDEAM, 2018).

En el departamento del Chocó han sido insuficientes los esfuerzos encaminados a disminuir las áreas deforestadas, sobre todo en la zona norte, donde se encuentra localizado Riosucio (El Tiempo, 2022). En este sentido, el documento del Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES 4021 de 2020) (Departamento Nacional de Planeación, 2020) plantea que la lucha contra la deforestación en el Chocó pasa por la legalización de los títulos mineros para así ejercer control sobre su operación y el cumplimiento de los acuerdos nacionales de regulación de productos agrícolas, especialmente el Pacto Intersectorial por la Madera Legal en Colombia, como forma de combatir esta problemática en la zona norte del departamento.

Efecto de las variables predictoras en la deforestación

Los resultados obtenidos muestran diferencias en el efecto de las variables consideradas a escala local, comparados con los hallazgos a nivel regional. Las variables promotoras de la deforestación a nivel regional incluyen la cercanía de áreas previamente deforestadas, vías y centros urbanos, además de las bajas pendientes, en tanto que a nivel local este efecto sólo se da con respecto a la cercanía de áreas previamente deforestadas y las bajas pendientes (Tabla 2). El efecto de las demás variables difiere entre Riosucio y Río Quito. Por otro lado, a nivel regional la cercanía a áreas con títulos mineros y a ríos ha tenido un efecto de contención de la deforestación (González-González *et al.*, 2021), mientras que en nuestro caso dicha cercanía tuvo un efecto favorecedor en los dos municipios (Tabla 2).

En los municipios considerados la deforestación funciona como un mecanismo de retroalimentación positiva, ya que las áreas cercanas a zonas previamente deforestadas presentan una mayor probabilidad de deforestación. Sin embargo, el umbral de influencia de esta variable en los dos municipios fue menor que en la región del Pacífico, donde la influencia de las áreas previamente deforestadas se extendió hasta 5 km (González-González *et al.*, 2021), mientras que en nuestro análisis no superó los 2,5 km (Tabla 2), lo que sugiere que las áreas deforestadas en Riosucio y Río Quito se encuentran menos dispersas que en otros municipios de la región.

En cuanto a la pendiente, se observó que en ambos municipios las bajas pendientes favorecieron la deforestación (Figura S3, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>) (Tabla 2). Este mismo comportamiento se ha observado en otras áreas tropicales de la zona Chocó – Darién y en casi todas las regiones del país, y se le ha relacionado con la facilidad de acceso a los mercados y la cercanía a las vías de transporte principales, que en esta región son los ríos (Sandel & Svenning, 2013; Fagua & Ramsey, 2019). El valor de la pendiente hasta el cual se favorece la deforestación en los dos municipios analizados es similar al reportado en la región Pacífico. El hecho de que en Riosucio la pendiente que favorece la deforestación sea de un grado mayor puede deberse a que en zonas de pendientes relativamente mayores hay ausencia de inundaciones, lo que favorecería las actividades agrícolas de expansión de la frontera agrícola (González-González *et al.*, 2021).

Nuestros resultados en áreas protegidas coinciden con algunos estudios que señalan la importancia de estas áreas como un factor que retarda la deforestación (Nolte *et al.*, 2013; Barber *et al.*, 2014; Butsic *et al.*, 2015). Otros estudios, sin embargo, muestran efectos más complejos. Por ejemplo, Armenteras *et al.* (2011) indican que, a nivel nacional, los municipios con áreas protegidas presentan una mayor tasa de deforestación que aquellos que no las tienen, y lo relacionan con una mayor densidad de la vegetación. En estudios en diferentes áreas del Amazonas (Barber *et al.*, 2014) y de Colombia (Clerici *et al.*, 2020) se ha encontrado que, aunque la deforestación se restringe dentro de las áreas protegidas, esta se desplaza a zonas externas, como se observó en Riosucio, donde hay áreas protegidas dentro del municipio y cerca de las áreas deforestadas (Figura S4, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>).

En cuanto al efecto de las áreas urbanas, en Riosucio su cercanía ha retardado la deforestación, en tanto que en las zonas rurales se ha acentuado. Lo contrario sucede en Río Quito, donde los centros urbanos están cerca de la principal vía de transporte del municipio, el río Quito, y de las áreas deforestadas (**Figura S5**, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>). Al comparar el comportamiento de estas variables con el de la región del Pacífico (**González-González et al.**, 2021), se observa que a nivel regional el área de influencia de los centros urbanos es de 28 km, siendo considerablemente mayor a la registrada por nosotros (<3 km) (**Tabla 2**).

Los ríos y cuerpos de agua favorecen la deforestación en Riosucio y Río Quito (**Tabla 2**) (**Figuras S6 y S7**, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>). La cercanía de los cuerpos de agua fue la variable que más favoreció la deforestación en Riosucio, por encima de la distancia a áreas previamente deforestadas planteada en nuestra hipótesis. En el caso de Río Quito, las áreas deforestadas siguieron los cursos de los ríos, sobre todo el río Quito (**Figuras S6 y S7**, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>), patrón que se asocia con la presencia de minería ilegal de oro de aluvión, restringida a dicho río (**IDEAM**, 2018), y concuerda con los hallazgos de **Barber et al.** (2014) y **Dos Reis et al.** (2021), quienes afirman que la mayor deforestación del bosque amazónico se presenta en zonas cercanas a los ríos. Sin embargo, la cercanía de los ríos y su efecto en la deforestación difiere en la región del Pacífico (**González-González et al.**, 2021), ya que allí la retarda hasta una distancia de 4,5 km, en tanto que en nuestro caso la promueve hasta una distancia máxima de 3,63 km (**Tabla 2**).

Se ha reportado repetidamente que las vías, ya sean principales, secundarias, o de otro orden, son agentes favorecedores de la deforestación en distintas regiones del mundo (**Nelson & Hellerstein**, 1997; **Barber et al.**, 2014; **Kleinschroth & Healey**, 2017; **Fagua & Ramsey**, 2019). Los resultados en Riosucio indican un efecto de contención que se explicaría por la poca presencia de vías principales y secundarias (**Figuras S8 y S9**, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>). Por el contrario, en Río Quito encontramos un efecto favorecedor, dado que las zonas deforestadas están relativamente cerca de las vías (**Figuras S8 y S9**, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>). Debe mencionarse que de haber contado con datos de las vías veredales, el efecto de esta variable habría sido muy diferente, ya que su número es mayor que el de las vías primarias y secundarias.

En cuanto a las áreas de explotación de oro de aluvión (EVOA), nuestros resultados indican que estas favorecieron la deforestación, particularmente en Río Quito, donde constituyó la variable más importante (**Tabla 2**), lo que confirma la hipótesis planteada para este municipio y es contrario a lo encontrado en el estudio de **González-González et al.** (2021) en la región del Pacífico, donde han servido para retardar la deforestación, aunque allí se tuvieron en cuenta los títulos mineros, que pueden abarcar zonas sin extracción minera. Por su parte, **Anaya et al.** (2020) reportan que en esta región la deforestación entre el 2001 y el 2018 se vio muy condicionada por el comportamiento de la minería de oro de aluvión. En Riosucio hay áreas deforestadas cerca y lejos de las zonas de explotación minera ilegal (**Figura S10**, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>), razón por la cual el umbral de distancia es relativamente alto (12,4 km) (**Tabla 2**). Por último, en Río Quito las áreas deforestadas se asocian con zonas en las que se ha reportado extracción de oro de aluvión, lo que explica el corto umbral de distancia encontrado (0,06 km) (**Tabla 2**) (**Figura S10**, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>).

Escenario futuro de la deforestación

Nuestro escenario de deforestación indica un aumento del área deforestada para el periodo 2020-2025 comparado con el de 2015-2020, lo que confirma nuestra hipótesis. Las zonas deforestadas en el 2025 se localizarían a lo largo de los ríos Atrato y Sucio en Riosucio, particularmente la margen occidental del río Atrato, en tanto que en Río Quito se concentrarían a lo largo del río Quito, comportamiento que intensificaría las tasas de migración del río y la erosión en sus orillas (**Micheli et al.**, 2004). Por su parte, **González-González**

et al. (2021) proponen que en el 2030 y el 2050, Riosucio seguirá siendo un núcleo de la deforestación en el país, específicamente en su zona noroccidental y en la cercanía del río Sucio, muy similar a lo que se espera para el 2025. En ese mismo estudio se proyecta que en Río Quito la deforestación se presentaría en zonas dispersas del municipio sin convertirse en un punto importante de concentración de la deforestación en el país. Las diferencias entre ese estudio y el nuestro pueden deberse a la escala de análisis de las variables predictoras (nacional *Vs.* local), así como a las diferencias en su definición, especialmente en lo concerniente a la minería (títulos mineros *Vs.* EVOA), y a la mayor proyección a futuro en el primero de los estudios.

Los porcentajes de coincidencia en Riosucio resultaron ser mayores a los reportados en Río Quito, lo que estaría relacionado con la mayor cantidad de píxeles deforestados aislados en Río Quito, en comparación con Riosucio, donde la deforestación se concentra en áreas más extensas (**Figura 4**). No obstante, la simulación a futuro es estimativa y, por lo tanto, todos los píxeles deforestados por lo menos en una iteración proporcionan un indicio de cómo se comportaría la pérdida de bosque en el año proyectado (**Soares-Filho et al.**, 2009).

Limitaciones y consideraciones

La aproximación usada en nuestro análisis presenta diversas limitaciones relacionadas con la naturaleza dinámica de los factores que inciden en la deforestación. Específicamente, las actividades antrópicas relacionadas con la deforestación varían tanto espacial como temporalmente. Por ejemplo, en la región del Pacífico las actividades antrópicas que han favorecido la deforestación se vinculan con la extracción maderera y la minería ilegal (**Vélez et al.**, 2020), que ha recurrido a la tala selectiva durante décadas, pero que también ha sido objeto de presiones relacionadas con proyectos de biocombustibles y palma aceitera (**Borja & Moreno**, 2009; **Janssen & Rutz**, 2011) típicas de economías emergentes y oportunidades de desarrollo que influyen en la deforestación, y que también modifican las variables utilizadas en este estudio. Por ello es importante anotar que las relaciones entre factores y deforestación halladas aplican únicamente para el periodo considerado. También sería recomendable incluir otras variables relacionadas con las economías ilegales que inciden en la deforestación, tales como la presencia de cultivos ilícitos y la posible expropiación de tierras (**Clerici et al.**, 2016; **Salazar et al.**, 2018; **Anaya et al.**, 2020).

Es posible afirmar que tanto los resultados de la función de decaimiento como el área bajo la curva ROC indican que el modelo para Riosucio es ligeramente más preciso que el modelo para Río Quito, pues el área bajo la curva es mayor y la ventana en la que se alcanza un porcentaje de similitud de 50 % es menor. En cuanto a la proyección a escenarios futuros, sería recomendable considerar políticas de mitigación de la deforestación, como la implementación de rutas para el desarrollo rural propuestas en el acuerdo de paz con las FARC y utilizadas en simulaciones que muestran cómo se reducirían las tasas de deforestación en el país (**González-González et al.**, 2021), así como el efecto de la legalización y la creación de títulos mineros (CONPES 4021 de 2020) (**DNP**, 2020).

Conclusiones

Nuestro análisis indica que, en los municipios de Riosucio y Río Quito la cercanía de áreas previamente deforestadas, de extracción de oro de aluvión, de cuerpos de agua y de ríos, así como las pendientes bajas, favorecen la deforestación. Se encontraron diferencias en cuanto al efecto de las vías primarias y secundarias y de los centros urbanos, lo que se explica por las actividades antrópicas que causan la deforestación en los dos municipios. Nuestros resultados confirman la presencia de un núcleo de deforestación significativo por su extensión en Riosucio, así como el efecto de las áreas de explotación de oro de aluvión en la deforestación de Río Quito.

Se resalta la necesidad de evaluaciones a escala local que permitan detectar diferencias en los efectos y umbrales de ciertas variables con respecto a lo encontrado a nivel regional y nacional (**Armenteras et al.**, 2013; **Fagua et al.**, 2019; **Anaya et al.**, 2020; **González-**

González et al., 2021). Comparado con estos estudios regionales, aquí encontramos diferencias en el efecto de las áreas de minería y de los ríos en ambos municipios, y de las vías y centros urbanos en Riosucio, así como umbrales de distancia distintos para todas las variables analizadas.

Nuestro análisis resalta, además, el papel de las áreas protegidas como una variable que retarda la deforestación en ambos municipios. Esto es particularmente relevante dada su ubicación dentro de la cuenca del río Atrato, que constituye un punto de biodiversidad excepcional (**Palacios-Torres et al.**, 2019). Se destaca la necesidad de aumentar las áreas protegidas en Riosucio y de reforzar las medidas de protección de las existentes, ya que se ha reportado deforestación en su interior (**Domínguez**, 2011). Por otro lado, la mitigación de la deforestación en Río Quito debe considerar, necesariamente, la minería de oro de aluvión, dado el efecto favorecedor de esta variable, así como la alta asociación espacial entre esta y la deforestación.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1961/3655>

Agradecimientos

Los autores agradecen a Andrés González, por su asesoría en la utilización del programa Dinamica EGO y Cristina Vélez, por la aclaración de conceptos asociados con la titulación minera, así como a los evaluadores anónimos de la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, cuyos comentarios permitieron mejorar el documento.

Contribución de los autores

JR: conceptualización, metodología, edición y análisis de datos; generación y validación del modelo; escritura y edición del manuscrito. NH y JCR: conceptualización, metodología y revisión del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan no tener ningún conflicto de intereses relacionado con el desarrollo y la autoría del presente documento.

Referencias

- Alcaldía de Río Quito.** (2018). *Información general del municipio. Río Quito, Chocó*. <https://www.rioquito-choco.gov.co/tema/municipio>
- Anaya, J., Gutiérrez-Vélez, V., Pacheco-Pascagaza, A., Palomino-Ángel, S., Han, N., Balzter, H.** (2020). Drivers of forest loss in a megadiverse hotspot on the Pacific Coast of Colombia. *Remote Sensing*, 12(8), 1235.
- Armenteras, D., Cabrera, E., Rodríguez, N., Retana, J.** (2013). National and Regional Determinants of Tropical Deforestation in Colombia. *Regional Environmental Change*, 13(6), 1181-1193.
- Armenteras, D., Rodríguez, N., Retana, J., Morales, M.** (2011). Understanding Deforestation in Montane and Lowland Forests of the Colombian Andes. *Regional Environmental Change*, 11(3), 693-705.
- Barber, C., Cochrane, M., Souza Jr, C., Laurance, W.** (2014). Roads, Deforestation, and the Mitigating Effect of Protected Areas in the Amazon. *Biological Conservation*, 177, 203-209.
- Bonham-Carter, G.** (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS*. Elsevier.
- Borja, T. & Moreno, G.** (2009). Evaluación interdimensional de impactos ambientales sobre la dimensión física ocasionados por cultivos de palma aceitera y la ganadería extensiva en la selva húmeda tropical del Bajo Atrato, Chocó, Colombia. *Gestión y Ambiente*, 12(3), 37-47.
- Butsic, V., Baumann, M., Shortland, A., Walker, S., Kuemmerle, T.** (2015). Conservation and conflict in the Democratic Republic of Congo: The impacts of warfare, mining, and protected areas on deforestation. *Biological Conservation*, 191, 266-273.

- Caicedo, E.** (septiembre, 23, 2022). La deforestación (in)visible del Chocó que la comunidad afro intenta frenar. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/deforestacion-en-el-choco-y-la-lucha-de-las-comunidades-para-frenarla-704481>
- Chaves, M., Gómez, S., Ramírez, W., C. Solano.** (Eds.) (2021). *Evaluación Nacional de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos de Colombia. Resumen para Tomadores de Decisión*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo y el Centro Mundial de Monitoreo para la Conservación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania. Bogotá DC, Colombia.
- Clerici, N., Armenteras, D., Kareiva, P., Botero, R., Ramírez-Delgado, J. P., Forero-Medina, G., Ochoa, J., Pedraza, C., Schneider, L., Lora, C., Gómez, C., Linares, M., Hirashiki, C., Biggs, D.** (2020). Deforestation in Colombian protected areas increased during post-conflict periods. *Scientific Reports*, 10(1), 4971.
- Clerici, N., Richardson, J., Escobedo, F., Posada, J., Linares, M., Sanchez, A., Vargas, J.** (2016). Colombia: Dealing in conservation. *Science*, 354(6309), 190-190.
- CLOPAD.** (2011). *Documento de caracterización general de escenarios de riesgo del municipio de Riosucio*. http://201.130.16.43/bitstream/handle/20.500.11762/28500/Caracterizacion_RiosucioChoco_2011.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Corporación Autónoma Regional del Chocó (CODECHOCÓ).** (2022). *Causas de la deforestación en el Chocó*. CODECHOCÓ.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE.** (2018a). *Censo Nacional de Población y Vivienda [en línea]*. Colombia. DANE.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE.** (2018b). *Medida de pobreza multidimensional municipal de fuente censal 2018*. Colombia. DANE.
- Departamento Nacional de Planeación.** (2020). Documento CONPES 4021 de 2020 (Consejo Nacional de Política Económica y Social - CONPES). Política Nacional Para el Control de la Deforestación y la Gestión Sostenible de los Bosques. DNP.
- DiMiceli, C., Carroll, M., Sohlberg, R., Kim, D., Kelly, M., Townshend, J.** (2015). *MOD44B MODIS/Terra Vegetation Continuous Fields Yearly L3 Global 250m SIN Grid V006* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD44B.006>
- Dinamica EGO.** (2022). *Dinamica EGO*. <https://csr.ufmg.br/dinamica/>
- Domínguez, J.** (2011). Transformación físico-espacial de los paisajes boscosos del sector sur del Parque Nacional Natural los Katíos (1989-2010). *Perspectiva Geográfica: Revista del Programa de Estudios de Posgrado en Geografía*, 16, 31-54.
- Dos Reis, M., de Alencastro Graça, P., Yanai, A., Ramos, C., Fearnside, P.** (2021). Forest fires and deforestation in the central Amazon: Effects of landscape and climate on spatial and temporal dynamics. *Journal of Environmental Management*, 288, 112310.
- Fagua, J., Baggio, J., Ramsey, R.** (2019). Drivers of forest cover changes in the Chocó-Darien Global Ecoregion of South America. *Ecosphere*, 10(3), e02648.
- Fagua, J., y Ramsey, R.** (2019). Geospatial modeling of land cover change in the Chocó-Darien global ecoregion of South America; One of most biodiverse and rainy areas in the world. *PLoS One*, 14(2), e0211324.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations.** Forestry Department (Rome). (2020). *Global forest resources assessment 2010: Main report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Global Forest Watch** (2022). *Deforested areas by year of Colombia and Chocó (2020)*. <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/COL/?category=undefined>
- González-González, A., Villegas, J., Clerici, N., Salazar, J.** (2021). Spatial-Temporal Dynamics of Deforestation and its Drivers Indicate Need for Locally-Adapted Environmental Governance in Colombia. *Ecological Indicators*, 126, 1-12.
- Guimbertau, M., Ciais, P., Ducharne, A., Boisier, J. P., Dutra Aguiar, A. P., Biemans, H., ... Verbeeck, H.** (2017). Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon Basin: a multi-model analysis with a new set of land-cover change scenarios. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(3), 1455-1475.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., Townshend, J. R.** (2013). High-Resolution Global Maps of 21st Century Forest Cover Change. *Science*, 342, 850-53. <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>

- Humanitarian Open Street Map (HOTOSM).** (2022). Colombia Roads. <https://www.hotosm.org/>
- IDEAM.** (2021). *Resultados del Monitoreo Deforestación: Año 2020 y primer trimestre 2021*. IDEAM.
- IDEAM.** (2020). *Resultados del Monitoreo de la Deforestación 2019*. IDEAM.
- IDEAM.** (2018). *Resultados del Monitoreo de la Deforestación 2017*. IDEAM.
- IDEAM.** (2016). *Informe del Estado del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables*. IDEAM.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC.** (2020). *Áreas protegidas de Colombia*. GEOPORTAL. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC.** (2018). *Datos Abiertos Cartografía y Geografía*. GEOPORTAL. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>
- INVIAS.** (2020). Mapa de carreteras. Instituto Nacional de Vías. <https://inviasopendata-invias.opendata.arcgis.com/>
- Janssen, R. & Rutz, D.** (2011). Sustainability of Biofuels in Latin America: Risks and Opportunities. *Energy Policy*, 39(10), 5717-5725.
- Kissinger, G. M., Herold, M., De Sy, V.** (2012). Drivers of deforestation and forest degradation: a synthesis report for REDD+ policymakers. Lexeme Consulting. <https://www.cifor.org/knowledge/publication/5167/>
- Kleinschroth, F. & Healey, J.** (2017). Impacts of logging roads on tropical forests. *Biotropica*, 49, 620-635.
- Lehner, B. & Grill, G.** (2013). Global River Hydrography and Network Routing: Baseline Data and New Approaches to Study the World's Large River Systems. *Hydrological Processes*, 27, 1099-1085. <https://doi.org/10.1002/hyp.9740>
- Maeda, E., De Almeida, C., de Carvalho Ximenes, A., Formaggio, A., Shimabukuro, Y., Pellikka, P.** (2011). Dynamic Modelling of Forest Conversion: Simulation of Past and Future Scenarios of Rural Activities Expansion in the Fringes of the Xingu National Park, Brazilian Amazon. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(3), 435-446.
- Mas, J., Filho, B., Pontius Jr, R., Gutiérrez, M., Rodrigues, H.** (2013). A suite of tools for ROC analysis of spatial models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2(3), 869-887.
- Micheli, E., Kirchner, J., Larsen, E.** (2004). Quantifying the effect of riparian forest versus agricultural vegetation on river meander migration rates, Central Sacramento River, California, USA. *River Research and Applications*, 20(5), 537-548.
- Ministerio de Energía.** (2020). Áreas de Explotación de Oro de Aluvión (EVOA) hasta el año 2020. Informe interno.
- Nascimento, N., West, T., Biber-Freudenberger, L., Sousa-Neto, E., Ometto, J., Börner, J.,** (2019). A Bayesian network approach to modelling land-use decisions under environmental policy incentives in the Brazilian Amazon. *J. Land Use Sci.* 15, 127-141. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2019.1709223>
- Nelson, G. & Hellerstein, D.** (1997). Do Roads Cause Deforestation? Using Satellite Images in Econometric Analysis of Land Use. *American Journal of Agricultural Economics*, 79(1), 80-88.
- Nolte, C., Agrawal, A., Silvius, K., Soares-Filho, B.** (2013). Governance regime and location influence avoided deforestation success of protected areas in the Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(13), 4956-4961.
- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC) y Gobierno de Colombia.** (2022). Colombia, Explotación de oro de aluvión: Evidencias a partir de percepción remota - 2021. https://www.unodc.org/documents/colombia/2021/Julio/EVOA_2020_Web.pdf
- Palacios-Torres, Y., de la Rosa, J., Olivero-Verbel, J.** (2019). Trace elements in sediments and fish from Atrato River: An ecosystem with legal rights impacted by gold mining at the Colombian Pacific. *Environmental Pollution*, 113290.
- Piontekowski, V., Ribeiro, F., Matricardi, E., Lustosa Junior, I. M., Bussinguer, A., Gatto, A.** (2019). Modeling deforestation in the State of Rondonia. *Floresta e Ambiente*, 26, e20180441.
- Powers, R. & Jetz, W.** (2019). Global habitat loss and extinction risk of terrestrial vertebrates under future land-use-change scenarios. *Nature Climate Change*, 9, 323-329.
- QGIS.org** (2022). *QGIS Geographic Information System*. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- Rodríguez, N., Armenteras-Pascual, D., Alumbrosos, J.** (2013). Land Use and Land Cover Change in the Colombian Andes: Dynamics and Future Scenarios. *Journal of Land Use Science*, 8 (2), 154-174.
- Rudel, T., Defries, R., Asner, G., Laurance, W.** (2006). Shrinking Tropical Forests, Human Agents of Change, and Conservation Policy. *Conservation Biology*, 20(6), 1604-1609.

- Salazar, A., Sánchez, A., Villegas, J., Salazar, J., Carrascal, D., Sitch, S., Restrepo, J., Poveda, G., Feeley, K., Mercado, L., Arias, P., Sierra, C., del Uribe, M., Rendón, A., Pérez, J., Tortarolo, G., Mercado-Bettin, D., Posada, J., Zhuang, Q., Dukes, J.,** (2018). The ecology of peace: preparing Colombia for new political and planetary climates. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(9), 525-531.
- Salazar, J., Villegas, J., Rendón, A., Rodríguez, E., Hoyos, I., Mercado-Bettin, D., Poveda, G.** (2018). Scaling properties reveal regulation of river flows in the Amazon through a “forest reservoir”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(3), 1735-1748.
- Sandel, B. & Svenning, J.** (2013). Human impacts drive a global topographic signature in tree cover. *Nature Communications*, 4(1), 2474.
- Redacción Semana.** (marzo 21, 2019). Luchan contra la minería ilegal en Chocó. *Semana*. <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/luchan-contra-la-mineria-ilegal-en-choco/43440>.
- Šimová, P. & Gdulová, K.** (2012). Landscape indices behavior: A review of scale effects. *Applied Geography*, 34, 385-394.
- Soares-Filho, B., Cerqueira, G. Pennachin, C.** (2002). DINAMICA—A Stochastic Cellular Automata Model Designed to Simulate the Landscape Dynamics in an Amazonian Colonization Frontier. *Ecological Modelling*, 154(3), 217-235. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00059-5)
- Soares-Filho, B., Rodrigues, H., Costa, W.** (2009). *Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO*. Centro de Sensoriamento Remoto. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Turner, M.** (1989). Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20(1), 171-197.
- Turner, M., O'Neill, R., Gardner, R., Milne, B.** (1989). Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 3, 153-162.
- United States Geological Survey (USGS).** (2018). *USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global*. <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1>
- Vélez, M., Robalino, J., Cárdenas, J., Paz, A., Pacay, E.** (2020). Is Collective Titling Enough to Protect Forests? Evidence From Afro-descendant Communities in the Colombian Pacific Region. *World Development*, 128, 104837.
- Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M., Herold, M.** (2021). Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature Communications*, 12(1), 1-10.
- Wu, J.** (2004). Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations. *Landscape Ecology*, 19, 125-138.
- Yu, W.** (2017). The Consequences of Tropical Deforestation. *The Aggie Transcript*.

Artículo original

Dinámicas de cambio de las coberturas del suelo y su impacto en el sector suroriental de Pasto, Colombia

Dynamics of land cover change and its impact in the southeastern sector of Pasto, Colombia

Samia-del-Mar Yela-Lara^{1,*}, Aida-Elena Baca-Gamboa²

¹Departamento de Recursos Naturales y Sistemas Agroforestales, Universidad de Nariño, Pasto, Colombia

²Departamento de Biología, Universidad de Nariño, Pasto, Colombia

Resumen

La cuenca alta del río Pasto tiene coberturas de bosque altoandino y de páramo de gran relevancia para la provisión y regulación de servicios ecosistémicos. Sin embargo, la extracción de recursos forestales y la tala para el establecimiento de actividades agropecuarias han transformado el paisaje y generado una matriz de vegetación discontinua. En este estudio se evaluó el estado de las coberturas de la tierra y sus dinámicas de cambio en un periodo de 23 años. Se caracterizaron las coberturas de la tierra de 1995 y 2018 y se cuantificaron los cambios en el uso del suelo mediante un análisis multitemporal. Además, se calculó el grado de fragmentación (F) y el índice de continuidad de Vogelmann (FCI). Los resultados indicaron que el 58,26 % presentaba áreas cultivadas, el 40,19 %, bosques y áreas seminaturales y el 1,55 %, territorios artificializados, con predominio de áreas dedicadas a la agricultura y la ganadería. A pesar de que la cobertura boscosa se ha incrementado, el análisis multitemporal reveló cambios en la cobertura del paisaje, con un aumento notable de las áreas destinadas a la agricultura, lo que configura un entorno fragmentado y discontinuo.

Palabras clave: Actividad antrópica; Análisis espacial; Fragmentación; Matriz paisajística, Mosaico; Uso del suelo.

Abstract

The upper basin of the Pasto River has high Andean forest and paramo coverages of great relevance for the provision and regulation of ecosystem services. However, the extraction of forest resources and the logging to establish agricultural activities have transformed the landscape and generated a matrix of discontinuous vegetation. Here we evaluated the state of land covers and its change dynamics over a 23-year period. The 1995 and 2018 land coverages were characterized and land use changes were quantified using multitemporal analysis. We also calculated the degree of fragmentation (F) and the Vogelmann continuity index (FCI). Our results indicated that 58.26% had cultivated areas, 40.19% forests and semi-natural areas, and 1.55% were artificial territories; the areas dedicated to agriculture and livestock were predominant. Although the forest cover increased, the multitemporal analysis revealed changes in the landscape coverage, with a notable increase in areas destined for agriculture resulting in a fragmented and discontinuous environment.

Keywords: Anthropic activity; Spatial analysis; Fragmentation; Landscape matrix; Mosaic; Land use.

Citación: Yela-Lara S del M, Baca-Gamboa AE. Dinámicas de cambio de las coberturas del suelo y su impacto en el sector suroriental de Pasto, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185):996-1007, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1995>

Editor: Jairo Castaño-Zapata

***Correspondencia:**

Samia-del-Mar Yela-Lara;
samiadelmar@udenar.edu.co

Recibido: 8 de septiembre de 2023

Aceptado: 28 de noviembre de 2023

Publicado en línea: 4 de diciembre de 2023



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

Introducción

Los bosques andinos son ecosistemas de montaña que se caracterizan por su gran diversidad y endemismo de especies de plantas vasculares, aves, anfibios y reptiles (Mathez-Stiefel *et al.*, 2017; Vallejo *et al.*, 2018). Son fundamentales en el mantenimiento de servicios ecosistémicos esenciales para el bienestar humano, principalmente, la provisión y

regulación de procesos hidrológicos, la protección del suelo, la fijación y almacenamiento de carbono, el suministro de alimentos, medicinas y combustibles, entre otros (Victorino, 2012; Lorca *et al.*, 2015; Mathez-Stiefel *et al.*, 2017).

Lamentablemente, cerca del 62 % de la región andina presenta una dinámica de transformación del paisaje y pérdida de conectividad entre los ecosistemas debido, principalmente, a la deforestación para destinar las tierras a la agricultura, la ganadería, la minería y los cultivos de uso ilícito, así como a la extracción de especies forestales empleadas como madera y leña y la plantación de especies exóticas (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, 2016; Azevedo *et al.*, 2016; Velasco-Linares & Vargas, 2008; Victorino, 2012).

Como resultado, se genera en los bosques una matriz espacial con mosaicos y fragmentos de vegetación que dificultan la conectividad entre los ecosistemas naturales (Lozano-Botache *et al.*, 2011; Velasco-Linares y Vargas, 2008), alterando su funcionamiento y la estructura de las poblaciones y comunidades de plantas y animales (Navarro, 2015), lo que deriva en extinciones, descensos de poblaciones silvestres y homogenización de la composición de especies (López Gallego, 2015).

Los cambios en la cobertura del suelo tienen efectos en diferentes escalas: a nivel regional ocurren variaciones en los ciclos hídricos y en los regímenes de temperatura y precipitación que favorecen el calentamiento global, y a nivel local inducen al deterioro y degradación de suelos, a cambios en el microclima, así como a modificaciones en los ciclos hídricos de las microcuencas (Masis-Campos & Vargas-Picado, 2014; Camacho-Sanabria *et al.*, 2017).

Según el IDEAM (2017), en el período entre 1990 – 2016, se perdieron o transformaron 357.400 hectáreas en el departamento de Nariño debido a diferentes actividades antrópicas. Particularmente en la cuenca del río Pasto, la Corporación Autónoma Regional de Nariño – Corponariño (2008a) ha registrado la reducción de los bosques naturales andinos y altoandinos debido a la tala destinada a despejar áreas para la agricultura y la ganadería. En los últimos 20 años en Colombia se ha generalizado el análisis de las dinámicas de los cambios en las coberturas de la tierra como un instrumento para la formulación y evaluación de las políticas de ocupación y uso sostenible del territorio (IDEAM *et al.*, 2013), así como para generar datos que respalden la planificación y gestión de las cuencas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014). Ello permite evaluar las transformaciones y determinar los patrones y tendencias de cambio en cuencas y ecosistemas durante un periodo definido (Altamirano & Lara, 2010).

En este contexto, en este estudio nos propusimos analizar la dinámica de cambio de uso del suelo en un periodo de 23 años en la cuenca alta del río Pasto, y contribuir con información sobre el grado de fragmentación y conectividad del paisaje como insumo para que las instituciones y la comunidad que se benefician del recurso hídrico determinen acciones de conservación, restauración ecológica y manejo de la cuenca.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el sur oriente del departamento de Nariño, en la subzona del río Pasto alto, sector del río Pasto alto – alto, en los corregimientos de La Laguna, Buesaquillo, Cabrera y San Fernando, con un área de 6.073,89 ha (Figura 1).

Se caracterizó la cobertura de la tierra en los años 1995 y 2018 empleando la metodología y la nomenclatura de Corine Land Cover – Colombia (CLC-C) propuesta por el IDEAM (2010). Esta metodología establece las clases de cobertura del suelo con sus tipologías y las definiciones adoptadas para Colombia; las unidades de la leyenda varían desde el nivel 1 hasta el nivel 6 en los diferentes grupos de coberturas, en los cuales el nivel está en función de la resolución espacial de las imágenes de satélite, de las condiciones ambientales de cada región y de los requerimientos específicos; en este caso se trabajó hasta el nivel 3. En la tabla 1 se presentan las leyendas utilizadas para elaborar la cartografía de las coberturas de la tierra.

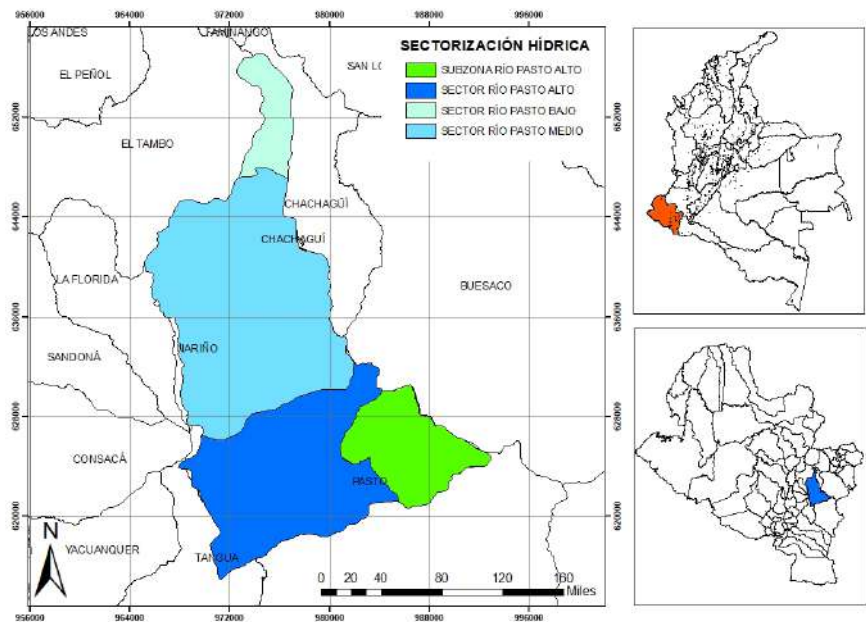


Figura 1. Sector de río Pasto alto – alto, cuenca del río Pasto

Para la delimitación del área de estudio se recopiló inicialmente la información bibliográfica y cartográfica básica: planchas topográficas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC en formato digital a escala de 1:50.000 descargadas de su servidor y de sensores remotos, además de su reconocimiento en campo.

El mapa de coberturas se generó a partir de imágenes satelitales y su interpretación y análisis se hizo mediante un proceso manual y digital (**Posada et al., 2012**). Para el mapa de coberturas del 2018 a escala de 1:50.000, se emplearon dos imágenes de PlanetScope de abril de ese año, con resolución de 3 m (licencia de uso de productos de propiedad del Instituto Geográfico Agustín Codazzi No. 5594-2020). La interpretación visual de estas imágenes de satélite se hizo con ArcGis 10.2 utilizando la técnica de delinear directamente en pantalla los polígonos sobre las imágenes satelitales. En este proceso se emplearon fuentes de datos auxiliares como Google Earth para verificar sistemáticamente el mapeo de la cobertura terrestre (**Earth Resources Observation and Science, 2018**). De todas maneras, todo se verificó en campo y se hizo el mapa de cobertura.

Para el mapa correspondiente a 1995, se utilizaron tres aerofotografías pancromáticas de febrero de ese año (No. Vuelo C-2572, No. Foto 244, 244, 245) con una resolución de 15 micrones. En la fotointerpretación de las aerofotos se hizo la corrección geométrica y la asignación de la georreferencia en el *software* libre ILWIS 3.3 Academic. En la corrección se tomaron como puntos de control elementos geográficos fácilmente identificables en la aerofoto como cruces de carreteras, cercas o ríos (**Abarca, 2005**). Posteriormente, se interpretaron las fotografías aéreas empleando ArcGis 10.2 teniendo en cuenta elementos básicos como la forma, el tamaño, el patrón, el tono, la textura y la ubicación.

Para determinar y analizar los cambios multitemporales en el uso del suelo en el periodo de 23 años, se emplearon los dos mapas de cobertura de la tierra de 1995 y 2018 y se construyó una matriz que definía los cambios ocurridos en la cobertura de la tierra entre los dos periodos determinados, los cuales se agruparon y clasificaron de acuerdo con los principales procesos de uso de la tierra (**Gómez & Páramo, 2005**). Para ello, se emplearon los indicadores propuestos por el **IDEAM et al. (2013)**: fragmentación del bosque, recuperación del bosque, ganancia de pastos, urbanización, intensificación de la agricultura, expansión de la agricultura, desintensificación de la agricultura, dinámica de los cuerpos de agua, aumento de la minería, reforestación y degradación de tierras.

Tabla 1. Unidades de coberturas de la tierra

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Territorios artificializados	Zonas urbanizadas	Tejido urbano discontinuo
		Tejido urbano continuo
	Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	Zonas industriales o comerciales
		Red vial, ferroviaria y terrenos asociados
		Zonas portuarias
		Aeropuertos
		Obras hidráulicas
	Zonas de extracción minera y escombreras	Zonas de extracción minera
		Zonas de disposición de residuos
	Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	Zonas verdes urbanas
		Instalaciones recreativas
	Territorios agrícolas	Cultivos transitorios
Cereales		
Oleaginosas y leguminosas		
Hortalizas		
Tubérculos		
Cultivos permanentes		Cultivos permanentes herbáceos
		Cultivos permanentes arbustivos
		Cultivos permanentes arbóreos
		Cultivos confinados
Pastos		Pastos limpios
		Pastos arbolados
		Pastos enmalezados
Áreas agrícolas heterogéneas		Mosaico de cultivos
		Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
		Mosaico de pastos con espacios naturales
	Mosaico de cultivos y espacios naturales	
Bosques y áreas semi-naturales	Bosque	Bosque denso
		Bosque abierto
		Bosque fragmentado
		Bosque de galería y ripario
		Plantación forestal
	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	Herbazal
		Arbustal
		Vegetación secundaria o en transición

Fuente: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2010

En cuanto a las características del hábitat y del paisaje, el grado de fragmentación se determinó empleando la siguiente ecuación 1 (Lacava, 2003).

$$F = \frac{\text{área del bosque (ha)}}{\text{área total (ha)}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Los valores de F oscilan entre 0 y 1 y para su análisis se establecieron los rangos de fragmentación indicados en la **tabla 2**.

En la evaluación de la conectividad o continuidad espacial como indicador de fragmentación se empleó el índice de continuidad de Vogelmann descrito en la siguiente ecuación:

$$FCI = \ln \left(\frac{\sum A}{\sum P} \right) \quad (\text{Ecuación 2}),$$

donde $\sum A$ es el área total de parches de bosque del paisaje (m^2) y $\sum P$ es el perímetro total de parches de bosque del paisaje (m^2). Los valores máximos implican una mayor continuidad del bosque y los mínimos reflejan una mayor fragmentación y discontinuidad de los parches de bosque; comparados con la escala logarítmica natural los valores menores a cero indican continuidad (**Dechner & Díazgranados, 2007**).

Resultados y discusión

Según la caracterización de coberturas vegetales de 2018, la subzona del río Pasto alto presenta un área de 6.073,89 ha, distribuidas en zonas urbanizadas, pastos, áreas agrícolas heterogéneas, bosques y áreas con vegetación herbácea y arbustiva. Utilizando la clasificación visual de las coberturas arrojada por el Corine Land Cover – Nivel 3 y después de la respectiva validación topológica de las entidades creadas, se determinaron 13 tipos de cobertura de la tierra, de los cuales nueve correspondían a sectores agrícolas y urbanizados y cuatro a áreas de bosques y semi-naturales (**Figura 2**) (**Tabla 3**).

Tabla 2. Rangos de grados de fragmentación

Rangos F	Grado de fragmentación
1	Sin fragmentación
$< 1 \leq 0,7$	Fragmentación moderada
$0,7 \leq 0,5$	Altamente fragmentado
$< 0,5$	Insularizado

Fuente: **Lacava, 2003**

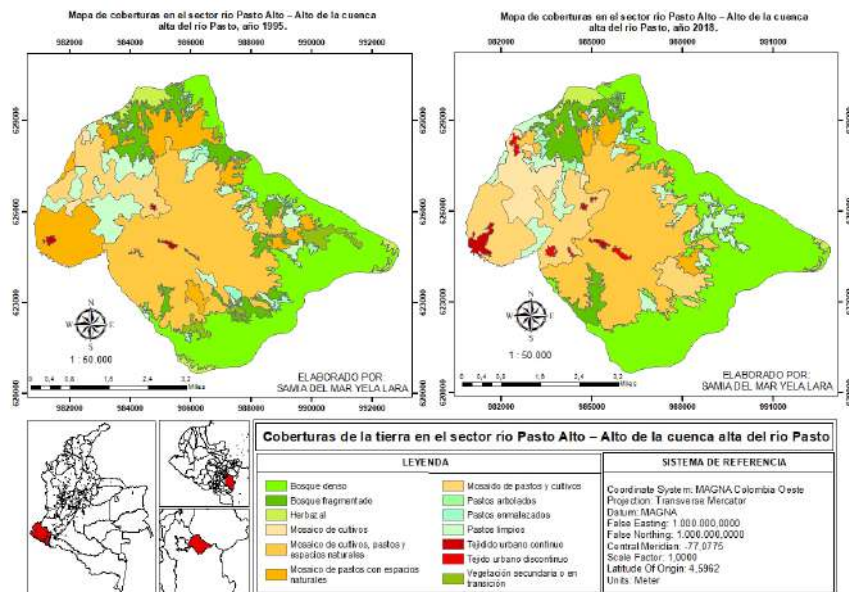


Figura 2. Mapa de coberturas en el sector de río Pasto alto – alto de la cuenca alta del río Pasto, años 1995 y 2018

Tabla 3. Coberturas de la tierra y áreas de ocupación en hectáreas y porcentaje en el sector de río Pasto alto – alto de la cuenca alta del río Pasto, 2018

Nivel 1	Nivel 2	Área (ha)	Área (%)	Nivel 3	Área (ha)	Área (%)
Territorios artificializados	Zonas urbanizadas	94,29	1,55	Tejido urbano continuo	55,75	0,92
				Tejido urbano discontinuo	38,54	0,63
				Pastos limpios	456,30	7,51
Territorios agrícolas	Áreas agrícolas heterogéneas	3003,44	49,45	Pastos arbolados	50,54	0,83
				Pastos enmalezados	28,31	0,47
				Mosaico de cultivos	345,78	5,69
				Mosaico de pastos y cultivos	880,46	14,50
				Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1615,60	26,60
				Mosaico de pastos con espacios naturales	161,60	2,66
				Bosque denso	1981,88	32,63
Bosques y áreas seminaturales	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	98,45	1,62	Bosque fragmentado	360,70	5,94
				Herbazal	90,25	1,49
				Vegetación secundaria o en transición	8,20	0,13
Total		6073,9	100	Total	6073,9	100

El 38,57 % del área evaluada era de bosque; el 49,45 % estaba conformado por áreas agrícolas heterogéneas, el 8,81 % por pastos, el 1,62 % por vegetación herbácea o arbustiva, y el 1,55 % por zonas urbanizadas. Esta información coincidió con los datos reportados por **Corponariño** (2011) en el Plan de Ordenación del Río Pasto, en el cual se señalaba que la cuenca alta era un territorio con gran potencial agropecuario y que se había incrementado la construcción de viviendas campestres por parte de los habitantes de Pasto.

Las áreas de pastos se han dedicado principalmente a la ganadería, en tanto que las áreas de bosques localizadas en sitios con fuertes pendientes presentan cierto grado de conservación. Según **Corponariño** (2008a), la cuenca alta del río Pasto presentaba un 30 % de cobertura vegetal con páramos, subpáramos y bosque alto andino y el 70 % se destinaba a uso agropecuario de tipo minifundista, con predominio de cultivos de papa, zanahoria, cebolla, maíz y hortalizas, así como a la cría de ganado bovino y otras especies menores.

Las características de la cobertura de los bosques y áreas semi-naturales del sector de la cuenca alta del río Pasto la convierten en un área de gran importancia por ser una zona de recarga hídrica integrada por 15 microcuencas: Las Tiendas, Pozo Hondo, El Retiro, El Barbero, El Tejar, El Purgatorio, Cabrera, Aguapamba, La Chorrera, Campoalegre, El Flautal, Las Minas, Rasacaloma, Pejendino y Dolores, las cuales alimentan el caudal inicial del río Pasto y abastecen acueductos veredales y urbanos (**Corponariño**, 2008b), siendo las de mayor influencia para la comunidad la microcuenca de Las Minas, Las Tiendas y Barbero.

Según **Corponariño** (2008b), la cuenca alta del río Pasto presentaba entonces una oferta hídrica neta disponible de 61,62 millones de m³/año, gracias a ecosistemas naturales ubicados en los márgenes de la cuenca como los páramos de Morasurco, Bordoncillo y El Tábano. Según el **Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander**

Von Humboldt (2012) allí se encuentran 1.240,36 ha que forman parte del complejo de páramos de La Cocha Patascoy (1.062,4 ha del páramo Bordoncillo y 177,96 ha del páramo El Tabano).

Dinámicas de cambio de las coberturas en el periodo de estudio

Características del hábitat y del paisaje. En el período de 23 años analizado el 58,73 % del área no presentó cambios en los tipos de cobertura, en tanto que la dinámica de transformación en el 41,27 % restante (**Tabla 4**) se atribuyó en gran medida a la intensificación de la agricultura, la recuperación de bosque y la ganancia de pastos. Estos cambios se caracterizan por la conversión de áreas con mosaicos que incluían espacios naturales en áreas con mosaicos de cultivos y otras de pastos y cultivos. Paralelamente, se observó la modificación de las áreas con vegetación natural, incluidos el bosque denso, el bosque fragmentado y la vegetación secundaria o en transición, que pasaron a tener coberturas de pastos limpios, pastos arbolados y pastos enmalezados, tal como se observa en la **figura 2**. Estos cambios en la composición de la cobertura de la tierra reflejan la influencia de diversas actividades humanas y procesos naturales en el paisaje a lo largo del período de análisis.

En este sentido, 659,26 ha que tenían coberturas de mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (356,25 ha), así como mosaico de pastos con espacios naturales (303,02 ha), pasaron a presentar mosaicos de pastos y mosaicos de pastos y cultivos, reflejando así la eliminación o disminución de las áreas con espacios naturales, bosque y vegetación herbácea o arbustiva. Asimismo, las áreas con bosque denso y fragmentado se transformaron en pastos limpios, y los mosaicos con espacios naturales y pastos (302,87 ha) en mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales (153,22 ha).

En algunos sectores de las microcuencas de El Tejar, El Purgatorio, Cabrera, La Chorrera, Campoalegre, El Flautal, Barbero y Las Minas hubo una reducción en las actividades de agricultura y 8,2 ha que presentaban mosaicos de pastos con espacios naturales pasaron a tener vegetación secundaria o en transición, en tanto que las 149,69 ha que tenían mosaicos de pastos y cultivos, pastos enmalezados y pastos limpios ahora incluyen espacios naturales.

Cabe destacar la recuperación de 641,72 ha de cobertura boscosa, con 116,72 ha en bosque fragmentado que antes se hallaban dedicadas a usos agrícolas heterogéneos, y 525,01 ha de bosque denso que anteriormente presentaban bosque fragmentado, herbazal, vegetación secundaria o en transición, pastos y áreas agrícolas heterogéneas.

Tabla 4. Indicadores de cambio de las coberturas en el sector de río Pasto alto – alto de la cuenca alta del río Pasto entre 1995 y 2018

Indicador de cambio de coberturas	Área (ha)	Área (%)
Sin cambio	3567,14	58,73
Intensificación de la agricultura	659,26	10,85
Recuperación de bosque	641,72	10,57
Cambio similar	503,86	8,30
Ganancia de pastos	302,87	4,99
Desintensificación de la agricultura	157,89	2,60
Expansión de la agricultura	153,22	2,52
Urbanización	69,77	1,15
Fragmentación de bosque	16,54	0,27
Otros cambios	1,62	0,03
Total	6073,89	100

La recuperación de la cobertura natural se atribuye a las acciones de reforestación y aislamiento desarrolladas por la comunidad o por entidades como Empopasto y Corporenariño en los últimos años, lo que ha permitido un incremento en la cobertura boscosa y procesos de regeneración natural en áreas que se mantenían sin cobertura (**Corponariño et al.**, 2008). Un ejemplo de ello es la adquisición de predios por parte de Corponariño en áreas estratégicas para la conservación y recuperación, así como la implementación de alternativas productivas y restauración ecológica, del programa de familias guardabosques y de asistencia técnica a cargo de Empopasto (**Narváez et al.**, 2016). Asimismo, desde el 2016 la Alcaldía de Pasto viene adelantando la campaña “un millón de árboles para la vida” con la siembra de 1.013.676 de árboles para el enriquecimiento del bosque y la conectividad a través de cercas vivas en la cuenca del río Pasto, la cuenca del río Bobo y la cuenca del río Guamuez (**Alcaldía Municipal de Pasto**, 2019).

A pesar de estas medidas de recuperación y conservación en el área, persisten actividades agrícolas y ganaderas que contribuyen a la expansión de la frontera agropecuaria. También ha continuado la explotación del recurso forestal con fines dendroenergéticos en áreas con coberturas naturales de gran relevancia para la provisión y regulación de bienes y servicios ecosistémicos. En los recorridos de campo se evidenció la extracción de material vegetal, especialmente en áreas de bosque fragmentado. Estas actividades son consistentes con los hallazgos presentados en el estudio de **Solarte et al.** (2007) en torno a cómo las comunidades circundantes ejercen presión sobre la vegetación por la extracción de leña, carbón y madera.

Todo esto conlleva una degradación de las áreas con cobertura natural que afecta negativamente el funcionamiento y la estructura de las poblaciones y comunidades del bosque, ya que las áreas alteradas tienen una mayor tendencia a convertirse en terrenos agrícolas (**Food and Agriculture Organization – FAO**, 2018). Justamente la deforestación y la conversión de los bosques en tierras agrícolas son las amenazas más visibles a nivel mundial (**Bargali**, 2018). Además, la intervención antropogénica puede cambiar los patrones de comportamiento y la distribución, incluso destruir poblaciones sensibles al aumentar el estrés, reducir el éxito reproductivo, aumentar la depredación o causar un cambio en el hábitat (**Mainwaring et al.**, 2009).

La zona boscosa de la cuenca alta del río Pasto presenta un índice de fragmentación (F) de 0,29, que corresponde a la categoría de insularizado, la cual se considera el grado más crítico de fragmentación. Según **Cabrera et al.** (2020), la fragmentación insularizada se da en áreas con perturbaciones en su estado natural, lo cual ocasiona pérdida del ecosistema nativo a causa de las actividades antropogénicas (aumento de la frontera agrícola, tala indiscriminada, etc.). En el caso de la zona de estudio hay actividades agrícolas (cultivos de papa, cebolla, zanahoria, arveja) y pecuarias (cría de ganado bovino) en más del 45 % del área, lo que ha generado un paisaje con parches del bosque como puede verse en los polígonos que conforman las coberturas naturales (**Figura 2**). Se confirma, así, lo expuesto por **Galván-Guevara** (2015), quien afirma que los parches de bosque en paisajes fragmentados tienen una forma irregular y discontinua. En general, estas formas irregulares tienen un mayor efecto de borde y, por lo tanto, una mayor afectación por acción de la matriz o del uso del suelo circundante (**Galván-Guevara**, 2015; **De Matos et al.**, 2021).

El grado de fragmentación insularizado es más frecuente en bosques andinos y secos. Una situación similar a la de la cuenca alta del río Pasto se ha reportado en otras regiones del país, por ejemplo, en el norte del departamento del Tolima (fragmentación entre 0,04 – 0,21) (**Lozano-Botache et al.**, 2011), en la subregión del bajo Sinú en Córdoba, donde los bosques secos también presentan un estado de fragmentación categorizado como insularizado, con un valor de 0,00078 (**Saab Ramos**, 2020), y en los bosques de Montes de María, con un valor de 0,3550 (**Galván-Guevara**, 2015); en las coberturas naturales del departamento de Santander también se hallaron valores inferiores a 0,5 en la categoría de insularización, lo cual indica que son áreas en donde hay fragmentación en parches y aislamiento de especies, lo que puede ir aumentando a medida que dichos fragmentos se hacen más irregulares (**Cárdenas Camacho**, 2018).

La pérdida y fragmentación de bosques y áreas con vegetación herbácea o arbustiva en la zona de estudio en aras de las actividades productivas ha generado una reducción y alteración del hábitat. Asimismo, las actividades de extracción y aprovechamiento de las coberturas naturales tienen un impacto negativo en su estado. Según **Gurrutxaga** (2004), actividades como la tala de ramas y troncos, la caza, el furtivismo, el abandono de basura y la frecuencia con que las personas acceden a los fragmentos contribuyen a la degradación del hábitat.

En el sector de la cuenca alta del río Pasto, el índice de continuidad (FCI) en el bosque denso presentó un valor de 5,15 y en el bosque fragmentado de 4,27. Teniendo en cuenta que los valores menores a 0 indican continuidad, estos bosques tienen la categoría de discontinuos. Esta condición convierte las coberturas naturales en áreas frágiles con relación a la matriz del paisaje o los tipos de uso del suelo de las áreas conexas (**Galván-Guevara**, 2015), donde se presentan principalmente pastos limpios, mosaicos de cultivos, mosaicos de pastos y cultivos, y mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales. Según **Zambrano- Fernández** (2020), el paisaje discontinuo es el resultado de las actividades agrícolas y de la tala selectiva.

En los bosques andinos a nivel nacional se presentan resultados similares a los hallados en este estudio. Así, los bosques naturales en el norte del departamento del Tolima presentan discontinuidad, con valores de FCI entre 4,98 – 5,30 (**Lozano-Botache et al.**, 2011). Asimismo, algunas áreas del bosque andino del municipio de Quetame (Cundinamarca) registran discontinuidad, con valores en el índice de continuidad de 3,1 (**Rojas de los Ríos**, 2019). Resultados similares se han reportado en el bosque seco tropical: por ejemplo, en el arroyo Pechelín (Sucre), se halló un índice de continuidad de 3,98, lo que lo categoriza como discontinuo y evidencia que existe fragmentación en el bosque del área del estudio (**Galván-Guevara**, 2015).

Infortunadamente, los procesos de fragmentación de hábitats provocan un incremento del riesgo de extinción local de especies animales y vegetales, al reducir los tamaños de las poblaciones por la pérdida neta del hábitat y la dificultad de dispersión entre subpoblaciones impuesta por el incremento del aislamiento entre fragmentos (**Greenteach**, 2019). Esta problemática no es exclusiva de la cuenca alta del río Pasto, pues se observa en otros ecosistemas del departamento de Nariño y del país, con bosques naturales que presentan fragmentación y discontinuidad en los parches como resultado de los efectos causados por las actividades agrícolas y de ganadería extensiva. Por ello, la adopción de medidas de conservación o recuperación en la cuenca alta del río Pasto es de gran relevancia porque los ecosistemas de bosques altoandinos y páramo permiten la interceptación, almacenamiento y regulación del recurso hídrico, lo que a su vez garantiza el desarrollo económico y social del municipio de Pasto (**Findeter**, 2015).

Conclusiones

El análisis multitemporal de un período de 23 años evidenció el aumento de las áreas ocupadas por bosque denso. Sin embargo, también se registró un incremento en las áreas destinadas a la agricultura con mosaicos de pastos y cultivos y mosaicos de cultivos, lo que ha ocasionado un deterioro en la cantidad y calidad de las coberturas naturales fundamentales para la provisión y regulación de los servicios ecosistémicos. Los cambios en el uso del suelo han configurado un paisaje fragmentado y discontinuo, caracterizado por la presencia de fragmentos de formas irregulares y un mayor efecto de borde que influye en el funcionamiento y la estructura del bosque y afecta negativamente la biodiversidad, los ciclos de nutrientes y la dinámica de los ecosistemas.

Agradecimientos

Agradecemos a la Vicerrectoría de Investigaciones e Interacción Social (VISS) de la Universidad de Nariño, por el financiamiento de esta investigación, y a los agricultores locales que permitieron el ingreso a sus predios para el registro de información.

Contribución de los autores

SYL: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, redacción; AEBG: análisis, revisión y edición.

Conflicto de intereses

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

Referencias

- Abarca, O.** (2005). Metodología de bajo costo para el levantamiento planimétrico de predios agrícolas con sistemas de información geográfica. *Revista Agronomía Tropical*, 55(2), 183-201. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2005000200002&lng=pt&nrm=iso&tlng=es
- Alcaldía Municipal de Pasto.** (2019). *Campaña un millón de árboles*. <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Campa-a-un-mill-n-de-arboles/6kr2-mmpm>
- Altamirano, A. & Lara, A.** (2010). Deforestación en ecosistemas templados de la precordillera andina del Centro-sur de Chile. *Bosque*, 31(1), 53-64. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002010000100007>
- Bargali, S.** (2018). Forest Ecosystem: Structure and Functioning. *Current Trends in Forest Research*, 2(4), 2-4.
- Cabrera, D., Morales, H., Guerrero, D.** (2020). Metodología de la identificación de corredores de conservación en el santuario de flora y fauna Galeras y el cerro Morasurco en el municipio de Pasto (Nariño). *Boletín Informativo CEI*, 7(2), 89-101.
- Camacho-Sanabria, R., Camacho-Sanabria, J.M., Balderas-Plata, M.Á., Sánchez-López, M.** (2017). Cambios de cobertura y uso de suelo: estudio de caso en Progreso Hidalgo, Estado de México. *Madera y bosques*, 23(3), 39-60. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331516>
- Cárdenas-Camacho, M.C.** (2018). *Evaluación de impactos ambientales a partir del análisis satelital de coberturas presentes en el área de influencia de las 28 microcuencas priorizadas por la CDMB*. Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Santander. <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/4405/16.%20R-DC95.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Corporación Autónoma Regional de Nariño - Corponariño.** (2008a). *Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca del río Pasto "Renace río Pasto"*. Alcaldía de Pasto – Corponariño – Empopasto.
- Corporación Autónoma Regional de Nariño - Corponariño.** (2008b). *Índice escasez de agua superficial cuenca del río Pasto*. Corponariño.
- Corporación Autónoma Regional de Nariño – Corponariño, Universidad de Nariño, Grupo de Estudios y Acciones Ambientales – GREDA.** 2008. Plan de ordenamiento y manejo de la microcuenca Las Minas, cuenca alta del río Pasto, municipio de Pasto. <https://pasto.gov.co/transparencia/planes-ambientales?download=106:plan-ordenamiento-y-manejo-microcuenca-las-minas-cuenca-alta-rio-pasto>
- Corporación Autónoma Regional de Nariño - Corponariño.** (2011). *Plan de ordenamiento del cauce principal del río Pasto*. <https://corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/porhriopasto.pdf>
- Cotillon, S. E. & Tappan, G. G.** (2016). *Landscapes of West Africa – A Window on a Changing World*. <https://eros.usgs.gov/westafrica/sites/default/files/ebook-English/index.html>
- De Matos, T. P. V., De Matos, V. P. V., De Mello, K., Valente, R. A.** (2021). Protected areas and forest fragmentation: sustainability index for prioritizing fragments for landscape restoration, *Geology, Ecology, and Landscapes*, 5(1), 19-31. <https://doi.org/10.1080/24749508.2019.1696266>
- De Azevedo, D. G., Gomes, R. L., Bruck de Moraes, M. E.** (2016). Estudos da fragmentação da paisagem na definição de áreas prioritárias para a recuperação ambiental da bacia hidrográfica do rio Buranhém. *Boletim de Geografia Maringá*, 34(2), 127-144. <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v34i2.25554>
- Dechner, A. & Díazgranados, M.** (2007). Composición y estructura de la vegetación boscosa de la cuenca baja del río San Salvador, vertiente norte de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Universitas Scientiarum*, 12(2), 99-124.
- Food and Agriculture Organization - FAO.** (2018). *Reducción de la degradación forestal*. <http://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/reducing-forest-degradation/basic-knowledge/es/>

- Findeter.** (2015). *Plan de Acción 2038*. <https://webimages.iadb.org/PDF/Plan+de+Acci%C3%B3n+Pasto+2038.pdf>
- Galván-Guevara, S. I.** (2015). *Fragmentación de bosque y su relación con la conservación de primates diurnos en el Arroyo Pechelín, Sucre, Colombia*. Tesis de maestría, Universidad de Cartagena. <https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/4261/FRAGMENTACION%20DE%20BOSQUE%20Y%20SU%20RELACION%20CON%20LA%20CONSERVACION%20DE%20PRIMATES%20DIURNOS%20EN%20EL%20ARROYO%20PECHEL%C3%89N,%20SUCRE,%20COLOMBIA.pdf?sequence=1>
- Gómez, O., Páramo, F.** (2005). *Environmental Accounting*. European Environmet Agency. https://projects.eionet.europa.eu/leac/library/juan/methodological_guidebook/download/en/1/LEAC_Methodological_Guidebook_FP.doc
- Greenteach.** (2019). *Fragmentación de hábitats*. <https://www.greenteach.es/fragmentacion-de-habitats/>
- Gurrutxaga, M.** (2004). *Conectividad ecológica del territorio y conservación de la biodiversidad. Nuevas perspectivas en ecología del paisaje y ordenación territorial*. Eusko Jaurlaritzaren Argitalpen Zerbitzu Nagusia. https://www.researchgate.net/publication/302252844_Conectividad_ecologica_del_territorio_y_conservacion_de_la_biodiversidad_Nuevas_perspectivas_en_ecologia_del_paisaje_y_ordenacion_territorial
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt.** (2012). *Proyecto: Actualización del Atlas de Páramos de Colombia. Convenio Interadministrativo de Asociación 11-103*. Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander Von Humboldt y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.** (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.** (2016). *La cifra de deforestación en Colombia 2015 reporta 124.035 hectáreas afectadas*. http://www.ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias/-/asset_publisher/96oXgZAhHrhJ/content/la-cifra-de-deforestacion-en-colombia-2015-reporta-124-035-hectareas-afectad
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.** (2017). *Proyecto Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBYC)*. Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental. Grupo de Bosques.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, Rodríguez, J., Peña, V.** (2013). *Análisis de dinámicas de cambios de las coberturas de la Tierra en Colombia, Escala 1:100.000 Periodos 2000-2002 y 2005-2009*. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023677/Analisisdinamicas.pdf>
- Lacava, A. N. D.** (2003). *Instrumentos para la planificación integral del uso de la tierra con sistemas de información geográfica – un caso de estudio en Argentina*. Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin.
- López-Gallego, C.** (2015). *Monitoreo de poblaciones de plantas para conservación: recomendaciones para implementar planes de monitoreo para especies de plantas de interés en conservación*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Lorca, P., Soley, R., Boyando, D.** (2015). *Diagnóstico, Identificación y valoración económica de Servicios Ecosistémicos, municipios de San Juan Nepomuceno y Santa Rosa de Cauca*. https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/obj_6_valoracion_san_juan_nepomuceno.pdf
- Lozano-Botache, L. A. L., Gómez-Aguilar, F. A. G., Chaves, S. V.** (2011). Estado de fragmentación de los bosques naturales en el norte del departamento del Tolima-Colombia. *Revista Tumbaga*, 1(6), 125-140.
- Mainwaring, A., Culler, D., Polastre, J., Szweczyk, R. Anderson, J.** (2009). *Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring*. <https://people.eecs.berkeley.edu/~culler/papers/wsn02.pdf>
- Masis-Campos, R., Vargas-Picado, H.** (2014). Incremento de áreas impermeables por cambios de usos de la tierra en la microcuenca del río Burío. *Revista Reflexiones*, 93(1), 33-46.
- Mathez-Stiefel, S. L., Peralvo, M., Báez, S.** (2017). *Hacia la conservación y la gobernanza sostenible de los paisajes de bosques andinos: Una agenda de investigación*. Programa Bosques Andinos de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación – COSUDE, CONDESAN, Helvetas, Bosques Andinos, Universität Bern.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.** (2014). *Guía Técnica para la Formulación de los planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas*. https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/cuencas-hidrograficas/GUIA_DE_POMCAS.pdf

- Narváez, Y., Paz, W., Guapucal, M., Leonel, H.** (2016). Procesos institucionales en el pago por servicios ambientales, cuenca alta del río Pasto. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33 (1), 64 – 72. <https://doi.org/10.22267/rcia.163301.7>
- Navarro, R., González, G., Flores, V., Amparán, S.** (2015). *Fragmentación y sus implicaciones: Análisis y reflexión documental*. Editorial de la Univ. Guadalajara UDG-CA-341.
- Posada, E., Ramírez, H., Espejo, N.** (2012). *Manual de prácticas de percepción remota con el programa ERDAS IMAGINE*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. https://www.un-spider.org/sites/default/files/ManualERDAS_web.pdf
- Rojas-de los Ríos, L. A.** (2019). *Evaluación del grado de fragmentación de un área de bosque andino, predio cascadas del pucará, municipio de Quetame-Cundinamarca*. Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomas. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/16542/2019laurarojas.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Saab-Ramos, H.P.** (2020). *Diversidad florística y fragmentación del bosque seco tropical en la subregión Bajo Sinú-Córdoba, Colombia*. Tesis de maestría, Universidad de Córdoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/3623/saabramosheidypaola.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Solarte, M. A., Narváez, G., Rivas, G., Bacca, A. E., Muñoz, D., Calderón, J.J., Torres, C., Figueroa, V., Rengifo, J., Martínez, P., Dávila, M., Cepeda, B., Castillo, G.** (2007). *Proyecto Estado del arte de la Información Biofísica y Socioeconómica de los Paramos de Nariño. Tomo I. Grupo de investigación en Biología de Paramos y Ecosistemas Andinos, Universidad de Nariño-Corporación autónoma regional de Nariño, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia*. <https://corponarino.gov.co/expedientes/intervencion/biodiversidad/tomo01introduccion.pdf>
- Vallejo, E. M. Q., Benavides, A. M., Moreno, N., Caro, S. G.** (2018). *Bosques andinos, estado actual y retos para su conservación en Antioquia*. Fundación Jardín Botánico de Medellín Joaquín Antonio Uribe - Programa Bosques Andinos (COSUDE).
- Velasco-Linares P. & Vargas, O.** (2008). *Problemática de los bosques altoandinos*. https://www.researchgate.net/publication/260640030_Problematica_de_los_bosques_altoandinos
- Victorino, A.** (2012). *Bosques para las personas: Memorias del Año Internacional de los Bosques (2011)*. Instituto de Investigación de Recurso Biológicos Alexander von Humboldt y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Zambrano-Fernández, E. D.** (2020). *Determinación del grado de fragmentación del bosque seco tropical de la subcuenca Quimis de la comuna Las Lagunas, Cantón Montecristi*. Tesis de pregrado, Universidad Estatal del Sur de Manabí. <http://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/2464/1/Elias%20Zambrano.pdf>

Original article

Analysis of academic trajectories of higher education students by means of an absorbing Markov chain

Análisis de las trayectorias académicas de estudiantes de educación superior utilizando una cadena de Markov absorbente

✉ José Luis Batún*, ✉ Rubén Cool, ✉ Henry Pantí

Facultad de Matemáticas, Universidad Autónoma de Yucatán. Anillo Periférico Norte, Colonia Chuburná Hidalgo Inn, Mérida Yucatán, México.

Abstract

The analysis of the academic trajectory is of the utmost importance for Scholar Program administrators, since it allows them to identify areas of opportunity for the Academic Program improvement. In this paper, we analyzed academic trajectory of a group students enrolled at a University Mathematics Program. To that aim, we utilize a stochastic process for modeling the academic trajectory. The model is defined in terms of a progressive Markov chain with two absorbing states. The inferential theory presented in this paper deals with the definition of a random sample for a Markov chain, the construction of the likelihood function and the estimation of the Markov chain parameters. Using these estimates and delta method, confidence intervals are calculated for the mean absorption time, the mean exit time of a state and the absorption probability into a state, these quantities correspond to expected time a student either concludes or drops out of the Program; the expected sojourn time in academic term and the probability a student either concludes or drops out of the Program, respectively.

Keywords: Markov chain model; maximum likelihood estimation; delta method; fundamental matrix; interval estimation; academic trajectory.

Resumen

El análisis de la trayectoria académica es de suma importancia para los administradores de Programas de estudio, ya que les permite identificar áreas de oportunidad para la mejora del Programa Académico. En este trabajo analizamos la trayectoria académica de un grupo de estudiantes matriculados en un Programa Universitario de Matemáticas. Para ello, proponemos un modelo estocástico, el cual se define en términos de una cadena de Markov progresiva con dos estados absorbentes. La teoría inferencial presentada en este artículo aborda la definición de una muestra aleatoria para una cadena de Markov, la construcción de la función de verosimilitud respectiva y la estimación de los parámetros del modelo. Mediante estos estimadores y el método delta, se derivan los intervalos de confianza para el tiempo medio de absorción, el tiempo medio de salida de un estado y la probabilidad de absorción en un estado, estas cantidades corresponden al tiempo esperado en que un estudiante concluye o abandona el Programa, tiempo de permanencia esperado en el semestre y la probabilidad de que un estudiante termine o abandone el Programa, respectivamente.

Palabras clave: Modelo de cadena de Markov; estimación por máxima verosimilitud; método delta; matriz fundamental; estimación por intervalo; trayectoria académica.

Citation: Batún JL, Cool R, Pantí H. Analysis of academic trajectories of higher education students by means of an absorbing Markov chain. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 247(185):1008-1023, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1973>

Editor: Luis Carlos Arboleda

***Corresponding author:** Henry Pantí; henry.panti@correo.uady.mx

Received: August 17, 2023

Accepted: October 3, 2023

Published on line: November 1, 2023



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

Introduction

Stochastic processes usually model random phenomena evolving over time. A stochastic process is a collection of random variables with a certain dependency structure between them. Among the most important stochastic processes are Markov chains, whose dependency structure can be characterized by the Markov property. Roughly speaking, the Markov property says that the future given the present and the past depends only on the present and not on the past at all. This property, also known as the memoryless property, allows to establishing simple results for the calculation of probabilities and other quantities of interest, as well as for their interpretation in the mathematical modeling of random phenomena where Markov chains are used. Communications networks, Alzheimer's disease, DNA sequence analysis, and Education are some examples where Markov chain models have been used in recent decades (see (Perera *et al.*, 2019), (Yu *et al.*, 2013), (Zakarczemny & Zajecka, 2022), (Muhammad *et al.*, 2019), (Wang *et al.*, 2021) and references therein).

Absorbing Markov chains are the most known and most interesting examples of Markov chain theory. A Markov chain is absorbing if there is at least a state such that when the Markov chain reaches it, it stays there forever. When this occurs, the Markov chain is said to be absorbed. For this type of Markov chain, we are interested in calculating the absorption probabilities and the mean absorption times. In other words, the absorbing Markov chain theory allows us to answer the questions: What is the probability that the Markov chain will be absorbed in one state? What is the mean time it takes for the Markov chain to be absorbed? The answers to the questions are achieved by calculating the fundamental matrix, which is obtained from the transition probability matrix (see (Kemeny & Snell, 1976)). Therefore, statistical procedures are necessary to estimate the transition probability matrix for absorbing Markov chain models and thus determine the aforementioned quantities.

In their paper, Anderson and Goodman (Anderson & Goodman, 1957) establish a treatise on statistical inference for Markov chains. This work includes point estimation for a transition probability matrix, hypothesis tests for Markov homogeneity, asymptotic theory for point estimators, among others. However, explicit results related to absorption probabilities and mean absorption times for absorbing Markov chains have not been established in this paper. On the other hand, although the point estimation of the fundamental matrix was not studied in that paper, with the help of invariance property of maximum likelihood estimators, we can obtain a point estimator for this matrix. Similarly, the theory developed there does not allow the construction of confidence intervals for the absorption probabilities and the mean absorption times, however, with the help of delta method, in this paper we calculate asymptotic confidence intervals for these and other quantities, which are transformations of the fundamental matrix. The asymptotic confidence intervals are used to analyze the academic progress of students in a University Mathematics Program.

The purpose of this paper is to analyze academic trajectories using an absorbing Markov chain. It is important to mention this is not the first time that an analysis of this type has been done. There are works in which school trajectories analysis are carried out considering an absorbing Markov chain ((Yahaha & Hasan, 2021) (Muhammad *et al.*, 2019), (Wang *et al.*, 2021)). In all these works, the estimation of transition probabilities lies in counting the number of transitions from a state to another in a single unit of time. In our study, we consider an observation period and although we obtain an equivalent way to estimate transition probabilities, our initial approach is different and allows us to introduce the concept of a random sample for Markov chains. Furthermore,

since point estimation is sometimes not sufficient to obtain conclusions on the true value of the population parameter, confidence interval estimation is preferable, since it provides a range of values that is likely to contain it. For this reason, in our work, as was mentioned before; we include the calculation of confidence intervals, which are used to analyze academic trajectories. Thus, our contribution lies in the application of absorbing Markov chains with confidence intervals to the case study. Finally, with the help of joint distribution of the absorbing time and the state where Markov chain is absorbed (Theorem 1 below), we determine the academic term in which the student is most probably either to dropping out or completing the Program.

The paper is organized as follows. The section Methodology introduces the main elements of Markov chain theory that are used throughout the paper. In this section, we calculate the joint distribution of the absorbing time and the state where the Markov chain is absorbed, statistical tools for absorbing Markov chain are presented and asymptotic confidence intervals are obtained. In the section Results and discussion, the statistical analysis of the academic progress of undergraduate students from a University mathematics Program is given using the theory developed in the previous sections. Finally, in section Conclusions we establish the final conclusions obtained from the statistical analysis of the academic trajectories.

Methodology

In this section, we present the main definitions and notations used in this paper. In the first part, we give a brief introduction to discrete time Markov chains and we present the quantities used in the application section. For a more in-depth study on the topic see (Durrett, 2016), (Norris, 1998), (Pinsky & Karlin, 2011). In the second part we introduce the progressive Markov chains.

Markov chains

Let $S \subset \mathbb{Z}$. We write $X = \{X_n, n \geq 0\}$ to denote the sequence of random variables X_0, X_1, \dots , which are defined on the same probability space (Ω, \mathcal{F}, P) . This sequence is called a stochastic process and the ones that are studied in this paper are the so-called Markov chains, which are defined below.

Definition 1 A stochastic process $X = \{X_n, n \geq 0\}$ with state space S is called a Markov chain if satisfies the following: for any $n \geq 1, i, j, i_0, \dots, i_{n-1} \in S$,

$$P(X_{n+1} = j \mid X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) = P(X_{n+1} = j \mid X_n = i). \quad (1)$$

The property given in (1) is called the Markov property, which is generally interpreted as a conditional memoryless property. If the right-hand side in (1) does not depends of n , the Markov chain is said to be time-homogeneous or simply homogeneous. In this paper we only consider homogeneous Markov chains. Furthermore, although most of the results and definitions presented in this section are valid for Markov chains with a general state space, we will suppose that the state space S is finite and we will write $S = \{1, 2, \dots, s\}$.

For $m \geq 0$, we define the m -step probability transition as

$$p_{ij}^{(m)} = P(X_{n+m} = j \mid X_n = i) = P(X_m = j \mid X_0 = i),$$

where the second equality follows from homogeneity of the Markov chain. The m -step probability transition is the probability of moving from state i to state j in m steps or m units of time. When $m = 0$, we write $p_{ij}^{(0)} = \delta_{ij}$, the Kronecker delta, which is defined as 1 whenever $i = j$ and 0 otherwise. We also note $p_{ij}^{(1)} = p_{ij}$.

The transition probability matrix \mathbf{P} , also called stochastic matrix, is a matrix whose elements are the one-step transition probabilities of the Markov chain $X = \{X_n, n \geq 0\}$. To be precise

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \cdots & p_{1s} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \cdots & p_{2s} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & \cdots & p_{3s} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ p_{s1} & p_{s2} & p_{s3} & \cdots & p_{ss} \end{pmatrix},$$

where

1. $0 \leq p_{ij} \leq 1$, for all $i, j \in S$.
2. $\sum_{j=1}^s p_{ij} = 1$, for all $i \in S$.

Another important element of the Markov chain theory is the initial distribution, which is the probability distribution of the random variable X_0 . An important fact is the probabilistic behaviour of a Markov chain is completely determined by its transition probability matrix and its initial distribution. To be precise, for any $n \geq 1, i_0, i_1, \dots, i_n \in S$:

$$P(X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_n = i_n) = p_{i_0} p_{i_0 i_1} \cdots p_{i_{n-1} i_n},$$

where $p_{i_0} = P(X_0 = i)$.

The m -step transition probabilities satisfy the Chapman–Kolmogorov equations, i.e., for any $n, m \geq 0, i, j \in S$, it holds

$$p_{ij}^{(n+m)} = \sum_{k=1}^s p_{ik}^{(n)} p_{kj}^{(m)}.$$

The Chapman-Kolmogorov equations imply that transition probabilities in n steps can be obtained from the n -th power of the transition probability matrix \mathbf{P} , that is, $\mathbf{P}^n = (p_{ij}^{(n)})_{ij \in S}$.

In general, the states of a Markov chain can be classified in different ways. Transient and absorbing states are of special interest in this paper. We will say that the state i is transient if

$$P(X_n = i \text{ for some } n \geq 1 \mid X_0 = i) < 1.$$

In other words, if i is a transient state, starting in i , with probability positive the Markov chain does not return to state i . We will say that state i is absorbing if $p_{ii} = 1$.

Let us introduce an additional notation. Sometimes, we will write P_i to refer quantities calculated using the probability measure $P(\cdot \mid X_0 = i)$, for instance, we will write $E_i(X)$ to denote the mathematical expectation of the random variable X calculated with the probability measure $P(\cdot \mid X_0 = i)$.

Another amount of interest in this work is the following. Let T_i be given by

$$T_i = \inf\{n \geq 1 : X_n \neq i\},$$

where $\inf\{\emptyset\} = \infty$. If the Markov chain is in state i , then T_i is the first time that Markov chain leaves state i , for this reason we refer it as *exit time from state i* . By the Markov property, under P_i , T_i is a geometric random variable with parameter $1 - p_{ii}$, that is,

$$P_i(T_i = n) = p_{ii}^{n-1}(1 - p_{ii}), \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

Thus, starting in state i , the expected time that the Markov chain leaves state i is given by

$$E_i(T_i) = \frac{1}{1 - p_{ii}}.$$

Progressive Markov chains

Before introducing progressive Markov chains, we review some facts and results about Markov chains with absorbing states. From now on, we assume that the states $1, \dots, r$, $r < s$ are transient states and $r + 1, \dots, s$ are absorbing states. Let T be the absorption time for X :

$$T = \inf\{n \geq 0 : X_n > r\}.$$

Since i is a transient state, for $i \leq r$, if the Markov chain starts in the state i , then the Markov chain is eventually absorbed. This means that the absorption time is finite, i.e., $P_i(T < \infty) = 1$, for all $i = 1, \dots, r$. For Markov chains with absorbing states, we are particularly interested in the absorption probability in state k , starting in state i :

$$u_{ik} = P(X_T = k \mid X_0 = i),$$

for $i = 1, \dots, r$, $k = r + 1, \dots, s$, and the mean absorption time:

$$v_i = E(T \mid X_0 = i),$$

for $i = 1, \dots, r$.

The previously defined quantities can be organized in a matrix and a column vector as follows: $\mathbf{U} = (u_{ik})$ and $\mathbf{v} = (v_i)^t$.

The transition probability matrix \mathbf{P} for this kind of Markov chains can be written as

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{R} \\ \mathbf{O} & \mathbf{I} \end{pmatrix}, \tag{2}$$

where \mathbf{O} is a zero matrix of dimension $(s - r) \times r$, \mathbf{I} is the $(s - r) \times (s - r)$ identity matrix, \mathbf{Q} and \mathbf{R} are matrices of dimensions $r \times r$ and $r \times (s - r)$, respectively, given by

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \cdots & p_{1r} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \cdots & p_{2r} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & \cdots & p_{3r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p_{r1} & p_{r2} & p_{r3} & \cdots & p_{rr} \end{pmatrix} \text{ and } \mathbf{R} = \begin{pmatrix} p_{1r+1} & p_{1r+2} & \cdots & p_{1s} \\ p_{2r+1} & p_{2r+2} & \cdots & p_{2s} \\ p_{3r+1} & p_{3r+2} & \cdots & p_{3s} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p_{rr+1} & p_{rr+2} & \cdots & p_{rs} \end{pmatrix}.$$

The matrix $\mathbf{M} = (\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} = (m_{ij})$ is known as the fundamental matrix (**Kemeny & Snell**, 1976). The matrix \mathbf{M} allows us to obtain the mean number of visit to a state before to be absorbed. To be precise, starting in the state i , the mean number of visits to state j before the Markov chain is absorbed is equal to m_{ij} . Two important identities can be established:

$$\mathbf{U} = \mathbf{MR}, \quad \mathbf{v} = \mathbf{M}\mathbf{1},$$

where $\mathbf{1}$ is the column vector whose elements are equal to 1's, $\mathbf{U} = (u_{ik})$ and $\mathbf{v} = (v_i)^t$.

In (**Pinsky & Karlin**, 2011) is established the identity (3.90):

$$p_{ik}^{(n)} = P(X_T = k, T \leq n \mid X_0 = i),$$

for $n \geq 1$, $i = 1, \dots, r$, $k = r + 1, \dots, s$. Hence

$$\begin{aligned} P(X_T = k, T = n \mid X_0 = i) &= P(X_T = k, T \leq n \mid X_0 = i) - P(X_T = k, T \leq n - 1 \mid X_0 = i) \\ &= p_{ik}^{(n)} - p_{ik}^{(n-1)}, \end{aligned}$$

for $n \geq 1$, $i = 1, \dots, r$, $k = r + 1, \dots, s$. Therefore, we have the following theorem on the joint distribution of (X_T, T) for an absorbing Markov chain.

Theorem 1 Let X be a Markov chain with transition matrix given by (2). Then,

$$P(X_T = k, T = n | X_0 = i) = p_{ik}^{(n)} - p_{ik}^{(n-1)},$$

for $n \geq 1, i = 1, \dots, r, k = r + 1, \dots, s$.

From the latter we have that, for $i = 1, \dots, r$, the absorbing probability in state k , is given by

$$u_{ik} = \lim_{n \rightarrow \infty} P(X_T = k, T \leq n | X_0 = i) = \lim_{n \rightarrow \infty} p_{ik}^{(n)},$$

for $k = r + 1, \dots, s$. In the same way, the distribution of T under P_i is

$$P(T = n | X_0 = i) = \sum_{k=r+1}^s (p_{ik}^{(n)} - p_{ik}^{(n-1)}),$$

for $n = 1, 2, 3, \dots$

Definition 2 A Markov chain $X = \{X_n, n \geq 0\}$ with state space $S = \{1, \dots, s\}$ is called progressive if its transition probability matrix \mathbf{P} is an upper triangular matrix.

For progressive Markov chains only forward transitions are possible. Furthermore, since the state space is finite, it follows that if X is a progressive Markov chain, then $p_{ss} = 1$, i.e., the state s is an absorbing state. In this paper we assume that we have more than one absorbing state, to be precise the progressive Markov chain has $s - r$ absorbing states, with $s - r > 1$ and we refer X as a progressive Markov chain with $s - r$ absorbing states. In this case, the transition probability matrix \mathbf{P} is given by

$$\mathbf{P} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & \dots & r & r+1 & \dots & s \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ r \\ r+1 \\ \vdots \\ s \end{matrix} & \left(\begin{matrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \dots & p_{1r} & p_{1r+1} & \dots & p_{1s} \\ 0 & p_{22} & p_{23} & \dots & p_{2r} & p_{2r+1} & \dots & p_{2s} \\ 0 & 0 & p_{33} & \dots & p_{3r} & p_{3r+1} & \dots & p_{3s} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & p_{rr} & p_{rr+1} & \dots & p_{rs} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 \end{matrix} \right) \end{matrix}.$$

The matrix \mathbf{Q} given in the decomposition (2) is as well an upper triangular matrix. Taking this fact into account, it is straightforward to verify that $m_{ii} = (1 - p_{ii})^{-1}$, for $i = 1, \dots, r$, which coincides with $E_i(T_i)$.

Point estimation

Let $X = \{X_n, n \geq 0\}$ an absorbing Markov chain with transition probability matrix \mathbf{P} . In order to estimate \mathbf{P} , it is necessary to observe realizations of the process X , that is, a set of times t and their respective states s_t .

Let h be a positive integer. If \mathbf{x} is a finite set of points obtained observing the Markov chain X from time 0 to h , then \mathbf{x} is called a trajectory or sample path (realization) of length h . In this case, $\mathbf{x} = \{(t, s_t), t = 0, 1, \dots, h, s_t \in S\}$. A random sample of size m of X is a finite sequence of m independent trajectories of length h : $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_m$, where

$$\mathbf{x}_a = \{(0, s_0^{(a)}), (1, s_1^{(a)}), \dots, (h, s_h^{(a)})\}, \quad a = 1, \dots, m.$$

Let $\vec{\mathbf{x}} = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_m)$. Since the trajectories are independent, the likelihood function $L(\mathbf{P}; \vec{\mathbf{x}})$ is given by

$$L(\mathbf{P}; \vec{\mathbf{x}}) = \prod_{a=1}^m P(X_0 = s_0^{(a)}, \dots, X_h = s_h^{(a)}). \tag{3}$$

Let $n_{ij}^{(a)}$ be the number of transitions from state i to j in the a -th trajectory, since $r + 1, \dots, s$ are absorbing states, $n_{ij}^{(a)} = 0$, for $i = r + 1, \dots, s, j \neq i$. Furthermore, $p_{ij} = \delta_{ij}$, for $i = r + 1, \dots, s$. The above remarks and the Markov property imply

$$P(X_0 = s_0^{(a)}, X_1 = s_1^{(a)}, \dots, X_h = s_h^{(a)}) = \prod_{i=1}^r \prod_{j=1}^s p_{s_0^{(a)}}^{(a)} (p_{ij})^{n_{ij}^{(a)}}.$$

Hence, equation (3) becomes

$$\begin{aligned} L(\mathbf{P}; \vec{\mathbf{x}}) &= \prod_{a=1}^m \prod_{i=1}^r \prod_{j=1}^s p_{s_0^{(a)}}^{(a)} (p_{ij})^{n_{ij}^{(a)}} \\ &= \prod_{a=1}^m p_{s_0^{(a)}}^{(a)} \prod_{i=1}^r \prod_{j=1}^s (p_{ij})^{n_{ij}^{(a)}}, \end{aligned}$$

where $n_{ij} = \sum_{a=1}^m n_{ij}^{(a)}$ is the number of transitions from i to j considering all sample trajectories. Finally, if we assume that the initial point in every trajectory $\mathbf{x}_i, i = 1, \dots, m$, is nonrandom, we obtain

$$L(\mathbf{P}; \vec{\mathbf{x}}) = \prod_{i=1}^r \prod_{j=1}^s (p_{ij})^{n_{ij}}.$$

From (2) it follows that in this model, we have $r(s - 1)$ parameters to be estimated. Finally, it is not difficult to verify that the MLEs for p_{ij} , denoted by \hat{p}_{ij} are given by

$$\hat{p}_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i}, \tag{4}$$

where n_i is the number of transitions from i in all sample trajectories.

In the case of a progressive Markov chain with $s - r$ absorbing states and all trajectories start at state $i = 1$, the likelihood function $L(\mathbf{P}; \vec{\mathbf{x}})$ is given by

$$L(\mathbf{P}; \vec{\mathbf{x}}) = \prod_{i=1}^r \prod_{i \leq j \leq s} (p_{ij})^{n_{ij}}.$$

There are $(2rs - r^2 - r)/2$ parameters to estimate and the MLEs for the p'_{ij} s are the same as those given in equation (4).

In (Anderson & Goodman, 1957) the likelihood function is calculated for samples from a non-homogeneous Markov chain. They also calculate the MLEs in the homogeneous case and coincide with the estimators given in (4).

Interval estimation

The delta method is a general procedure to derive the variance of a function of asymptotically normal random variables with known variance. Here we present the version given in (Casella & Berger, 2002). Let $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_{n'})$ be a vector of random variables such that

$$\sqrt{n}(\mathbf{X} - \Theta) \xrightarrow{d} N_{n'}(0, \Sigma), \quad n \rightarrow \infty,$$

where $\Theta = (\theta_1, \dots, \theta_{n'})$ and Σ is the covariance matrix of \mathbf{X} . Then if $g : \mathbb{R}^{n'} \rightarrow \mathbb{R}$ is a function with continuous first partial derivatives respect to Θ , then it holds

$$\sqrt{n}(g(\mathbf{X}) - g(\Theta)) \xrightarrow{d} N_1(0, g'(\Theta)' \Sigma g'(\Theta)),$$

where $g'(\Theta) = \left(\frac{\partial}{\partial \theta_1} g(\Theta), \dots, \frac{\partial}{\partial \theta_{n'}} g(\Theta) \right)'$. This result allows us to obtain asymptotic confidence intervals for $g(\Theta)$ in the following way. Suppose that Σ is unknown and let $\hat{\Theta}$ and $\hat{\Sigma}$ consistent estimators for Θ and Σ , respectively. Furthermore, suppose that $\hat{\Theta}$ satisfies

$$\sqrt{n}(\hat{\Theta} - \Theta) \xrightarrow{d} N_{n'}(0, \Sigma), \quad n \rightarrow \infty.$$

Then by continuity of the function g' and the consistency property of $\hat{\Theta}$ and $\hat{\Sigma}$, it follows that $\hat{\sigma}_g^2 = g(\hat{\Theta})' \hat{\Sigma} g'(\hat{\Theta})$ is a consistent estimator for $\sigma_g^2 = g(\Theta)' \Sigma g'(\Theta)$. Thus, the Slutsky's theorem implies

$$\frac{\sqrt{n}(g(\hat{\Theta}) - g(\Theta))}{\hat{\sigma}_g} = \frac{\sigma_g}{\hat{\sigma}_g} \frac{\sqrt{n}(g(\hat{\Theta}) - g(\Theta))}{\sigma_g} \xrightarrow{d} N_1(0, 1).$$

The latter equation establishes that an asymptotic $100(1 - \alpha)\%$ confidence interval, for $g(\Theta)$, is given by

$$g(\hat{\Theta}) \pm z_{\alpha/2} \frac{\hat{\sigma}_g}{\sqrt{n}},$$

where

$$\hat{\sigma}_g^2 = g(\hat{\Theta})' \hat{\Sigma} g'(\hat{\Theta}),$$

with $\hat{\Theta}$ and $\hat{\Sigma}$ being consistent estimators for Θ and Σ , respectively. For a further discussion of asymptotic normality under transformations see (Mendoza, 1994) and (Serfling, 1980).

By choosing suitable functions g we obtain asymptotic intervals for the following quantities:

- i) Absorption probabilities,
- ii) Mean absorption time,
- iii) Mean exit time from a state.

The procedure for obtaining the confidence intervals of the aforementioned quantities is described below. Recall that $\mathbf{M} = (\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1}$ and we introduce the following: $\mathbf{O}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{R}_k = \mathbf{M} \mathbf{R}_k$, where \mathbf{R}_k is the k -th column of \mathbf{R} , for $k = r + 1, \dots, s$. In the same way, for $i = 1, \dots, r$, \mathbf{M}_i and \mathbf{q}_i' denote the i -th column and row of \mathbf{M} and \mathbf{Q} , respectively. Finally, \mathbf{I}_{jl} is the matrix with a one in the (j, l) -th position and zeros elsewhere.

The procedure to construct the asymptotic intervals for every one of aforementioned quantities is to identify the function g and to calculate the consistent estimator for σ_g , denoted by $\hat{\sigma}_g$. The estimator $\hat{\sigma}_g$ is a function of $\hat{\Theta}$ and $\hat{\Sigma}$, consistent estimators for Θ and Σ , respectively.

In the examples, the consistency property of $\hat{\Theta}$ and $\hat{\Sigma}$ is satisfied since they are function of the elements of estimated transition probability matrix $\hat{\mathbf{P}}$, which is a consistent estimator for \mathbf{P} (see (Anderson & Goodman, 1957)).

Absorption probability

In (Karson & Wroblewski, 1976) an asymptotic confidence interval for the quantity $\mathbf{c}'(\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{R}_k$ is presented, where \mathbf{c} is any suitable vector. The delta method is used to obtain this asymptotic confidence interval, although it is not explicitly mentioned in this work. From

the result established there and using $\mathbf{c} = \mathbf{e}_i$, a unit vector with 1 in the component i , we can obtain the asymptotic confidence interval for the absorption probability in state k when starting in state i

$$u_{ik} = g(\Theta) = \mathbf{e}_i \mathbf{O}_k = o_{ik}, \tag{5}$$

for $i = 1, \dots, r, k = r + 1, \dots, s$, where

$$\Theta = (p_{1k}, \mathbf{q}_1^t, p_{2k}, \mathbf{q}_2^t, \dots, p_{rk}, \mathbf{q}_r^t).$$

The asymptotic $(1 - \alpha)$ confidence interval is given by

$$\hat{o}_{ik} \pm \frac{z_{\alpha/2}}{\sqrt{n}} \sqrt{\sum_{j=1}^r \hat{\mathbf{a}}_j^t \hat{\Sigma}_j \hat{\mathbf{a}}_j}, \tag{6}$$

where $\hat{\mathbf{a}}_j = (\hat{m}_{ij}, \hat{m}_{ij} \hat{o}_{jk}, \dots, \hat{m}_{ij} \hat{o}_{jk})^t$, $n = n_1 + \dots + n_r$ and

$$\hat{\Sigma}_j = \begin{pmatrix} \hat{p}_{jk}(1 - \hat{p}_{jk}) & -\hat{p}_{jk}\hat{p}_{j1} & -\hat{p}_{jk}\hat{p}_{j2} & \dots & -\hat{p}_{jk}\hat{p}_{jr} \\ -\hat{p}_{jk}\hat{p}_{j1} & \hat{p}_{j1}(1 - \hat{p}_{j1}) & -\hat{p}_{j1}\hat{p}_{j2} & \dots & -\hat{p}_{j1}\hat{p}_{jr} \\ -\hat{p}_{jk}\hat{p}_{j2} & -\hat{p}_{j1}\hat{p}_{j2} & \hat{p}_{j2}(1 - \hat{p}_{j2}) & \dots & -\hat{p}_{j2}\hat{p}_{jr} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -\hat{p}_{jk}\hat{p}_{jr} & -\hat{p}_{j1}\hat{p}_{jr} & -\hat{p}_{j2}\hat{p}_{jr} & \dots & \hat{p}_{jr}(1 - \hat{p}_{jr}) \end{pmatrix}.$$

Remark 1 When the actual absorption probability is very small or is almost one, the previous confidence interval could capture negative values or values greater than one respectively. In this case, using the logit transformation and the delta method again, an alternative asymptotic $100(1 - \alpha)\%$ confidence interval is given by:

$$\left(\frac{\hat{o}_{ik} \exp\{-A\}}{1 - \hat{o}_{ik} + \hat{o}_{ik} \exp\{-A\}}, \frac{\hat{o}_{ik} \exp\{A\}}{1 - \hat{o}_{ik} + \hat{o}_{ik} \exp\{A\}} \right),$$

where

$$A = \frac{z_{\alpha/2}}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\hat{V}(\hat{o}_{ik})}{(\hat{o}_{ik}(1 - \hat{o}_{ik}))^2}} \quad \text{and} \quad \hat{V}(\hat{o}_{ik}) = \sum_{j=1}^r \hat{\mathbf{a}}_j^t \hat{\Sigma}_j \hat{\mathbf{a}}_j.$$

Remark 2 Unlike absorption probabilities, to the best of our knowledge, no confidence intervals have been calculated for mean absorption times and mean exit times. This is carried out below.

Mean absorption time

By following some ideas given in (Karson & Wroblewski, 1976), based on the delta method, we obtain an asymptotic confidence interval for the mean absorption time v_i :

$$v_i = g(\Theta) = \mathbf{e}_i (\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{1} = \mathbf{e}_i \mathbf{M} \mathbf{1} = \sum_{j=1}^r m_{ij}, \tag{7}$$

for $i = 1, \dots, r$, where $\Theta = (\mathbf{q}_1^t, \mathbf{q}_2^t, \dots, \mathbf{q}_r^t)$. In this case, we have

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma_1 & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_2 & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \Sigma_r \end{pmatrix},$$

where

$$\Sigma_j = \begin{pmatrix} p_{j1}(1 - p_{j1}) & -p_{j1}p_{j2} & \dots & -p_{j1}p_{jr} \\ -p_{j1}p_{j2} & p_{j2}(1 - p_{j2}) & \dots & -p_{j2}p_{jr} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -p_{j1}p_{jr} & -p_{j2}p_{jr} & \dots & p_{jr}(1 - p_{jr}) \end{pmatrix}.$$

Since

$$\begin{aligned} \frac{\partial g(\Theta)}{\partial p_{jl}} &= \mathbf{e}_i(\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{I}_{jl} (\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{1} \\ &= \mathbf{e}_i \mathbf{M} \mathbf{e}_j \mathbf{e}'_j \mathbf{M} \mathbf{1} \\ &= m_{ij} \mathbf{e}'_j \mathbf{M} \mathbf{1} \\ &= m_{ij} \sum_{u=1}^r m_{lu}, \end{aligned}$$

then, by making

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_j &= (m_{ij} \sum_{u=1}^r m_{1u}, m_{ij} \sum_{u=1}^r m_{2u}, \dots, m_{ij} \sum_{u=1}^r m_{ru})^t \\ &= m_{ij} \sum_{u=1}^r \mathbf{M}_u, \end{aligned}$$

it follows

$$\sigma_g^2 = \sum_{j=1}^r \mathbf{b}'_j \Sigma_j \mathbf{b}_j. \tag{8}$$

Hence, an asymptotic $100(1 - \alpha)\%$ confidence intervals for v_i is given by

$$\sum_{j=1}^r \hat{m}_{ij} \pm \frac{z_{\alpha/2}}{\sqrt{n}} \sqrt{\sum_{j=1}^r \hat{\mathbf{b}}'_j \hat{\Sigma}_j \hat{\mathbf{b}}_j}. \tag{9}$$

Mean exit time

Finally, we have the mean exit time from state i is given by

$$E_i(T_i) = g(\Theta) = \frac{1}{1 - p_{ii}},$$

where $\Theta = p_{ii}$, for $i = 1, \dots, r$. Since $\sqrt{n_i}(\hat{p}_{ii} - p_{ii})$ is asymptotically normally distributed with mean 0 and variance $p_{ii}(1 - p_{ii})$ (see (Anderson & Goodman, 1957)), then $\sqrt{n_i}(g(\hat{p}_{ii}) - g(p_{ii}))$ is asymptotically normally distributed with mean 0 and variance $\sigma_g^2 = g'(p_{ii})^2 p_{ii}(1 - p_{ii})$. Hence, we can obtain an asymptotic $100(1 - \alpha)\%$ confidence interval for $E_i(T_i)$, namely,

$$\frac{1}{1 - \hat{p}_{ii}} \pm \frac{z_{\alpha/2}}{\sqrt{n_i}} \sqrt{\frac{\hat{p}_{ii}}{(1 - \hat{p}_{ii})^3}}. \tag{10}$$

Note that the asymptotic confidence intervals previously calculated were carried out considering the number of transitions in each state (in the first two considering all transitions from transient states) and not using the sample size. This implies that we could have a single path of length h , h large enough, and observe a large number of transitions n_i , to establish the asymptotic results. In summary, the important thing is to have a sufficient number of Markov chain transitions to obtain asymptotic confidence intervals through the delta method.

Results and discussion

Through a progressive Markov Chain with two absorbing states, we analyze the academic trajectories of a group of students from a Mathematics Academic Program in the Autonomous University of Yucatan. The Academic Program allows the students to choose

the subjects to take in each enrollment and there is no restriction for this, so there are no requirements between subjects that prevent the student’s academic progress. The transition periods in the proposed discrete-time stochastic process model represent the academic terms in which students are enrolled. The monitoring of the student’s academic trajectory is carried out by means of the number of accumulated credits and based on this number a semester is assigned to the student. Thus, in each academic term the student registers to a group of courses, at the end of the period, based on the courses they pass, the number of credits accumulated do date is calculated, based on this number a status is assigned (semester) to the period. Since the student’s progress depends on the number of accumulated credits at the end of the academic term and the number of credits of a period are at most related to those of the previous period, we can assume that the stochastic process modeling student’s academic trajectory satisfies the Markov property. In addition, the students are under the same characteristics of the Academic Program. Therefore, it is reasonable to assume that the Markov chain that describes the academic trajectory is homogeneous.

From the above, we propose ten states for the Markov chain model: states from 1 to 8 represent the semester of the Program in which students are enrolled. The state 9 represents the graduation status, namely, the student successfully has completed the Program, while state 10 represents the dropout status, this means, the student has withdrawn from the Program voluntarily or by University regulation. It is worth emphasizing the difference between academic term and semester; the former refers to a transition period and the latter to a state of the process.

In developing the model, the following assumptions are made: the student who is currently enrolled in a semester of the Program could, in the next academic term, either advance to a higher semester or repeat semester and stay at the same state, this means that the Markov chain is progressive. Furthermore, considering the Program, the student who has successfully completed it or has voluntarily withdrawn, cannot apply for the same Program. This fact ensures that states 9 and 10 are absorbing states. Therefore, the stochastic process describing student’s academic trajectory is a progressive Markov chain with two absorbing states.

The data collected consists of the academic trajectories of 73 students in 16 academic terms (8 years). Considering the above assumptions and the formula (4), we obtain the estimated transition probability matrix $\hat{\mathbf{P}}$ of the progressive Markov chain, which is

$$\hat{\mathbf{P}} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0.291 & 0.544 & 0.010 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.155 \\ 0 & 0.176 & 0.471 & 0.265 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.088 \\ 0 & 0 & 0.057 & 0.829 & 0.029 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.086 \\ 0 & 0 & 0 & 0.277 & 0.692 & 0.015 & 0 & 0 & 0 & 0.015 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.281 & 0.656 & 0.047 & 0 & 0 & 0.016 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.218 & 0.764 & 0 & 0 & 0.018 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.438 & 0.525 & 0 & 0.038 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.656 & 0.311 & 0.033 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.000 \end{pmatrix} \end{matrix}.$$

The off-diagonal non-zero elements of matrix $\hat{\mathbf{P}}$ correspond to probability a student advances from a specific semester to another during an academic term, while elements on the main diagonal are the probabilities a student remains in the same semester, except for \hat{p}_{99} and \hat{p}_{1010} since states 9 and 10 are not semesters but absorbing states representing graduate and dropout status, respectively. For instance, if we consider a randomly selected student who is currently in the first state, namely, in the semester 1, the probability the student advances in the next academic term to semester 2 is given by $\hat{p}_{12} = 0.544$. For the non-absorbing states probabilities in the main diagonal of $\hat{\mathbf{P}}$, we have that the student does not

accumulate enough credits to advance to the next semester, this means that student remains in the same semester. For example, $\hat{p}_{44} = 0.277$ is the probability of remaining in the fourth semester.

Decomposing the matrix $\hat{\mathbf{P}}$ as in (2), we obtain the matrices $\hat{\mathbf{Q}}$ and $\hat{\mathbf{R}}$, namely,

$$\hat{\mathbf{Q}} = \begin{pmatrix} 0.291 & 0.544 & 0.010 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.176 & 0.471 & 0.265 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.057 & 0.829 & 0.029 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.277 & 0.692 & 0.015 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.281 & 0.656 & 0.047 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.218 & 0.764 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.438 & 0.525 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.656 \end{pmatrix}$$

and

$$\hat{\mathbf{R}} = \begin{pmatrix} 0 & 0.155 \\ 0 & 0.088 \\ 0 & 0.086 \\ 0 & 0.015 \\ 0 & 0.016 \\ 0 & 0.018 \\ 0 & 0.038 \\ 0.311 & 0.033 \end{pmatrix}.$$

From the first column of $\hat{\mathbf{R}}$, it follows that for the first seven semesters, the probability that an enrolled student successfully completes the Program is 0, while the probability that an enrolled student will drop out the Program decreases as the semester increases.

To obtain point and interval estimations for the quantities described in Section , we first estimate the fundamental matrix $\hat{\mathbf{M}}$. Recall $\mathbf{M} = (\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1}$. Thus, we have

$$\hat{\mathbf{M}} = \begin{pmatrix} 1.41 & 0.931 & 0.480 & 0.892 & 0.878 & 0.753 & 1.097 & 1.675 \\ 0 & 1.214 & 0.606 & 1.140 & 1.121 & 0.963 & 1.402 & 2.140 \\ 0 & 0 & 1.060 & 1.216 & 1.213 & 1.041 & 1.516 & 2.314 \\ 0 & 0 & 0 & 1.383 & 1.331 & 1.143 & 1.665 & 2.542 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.391 & 1.167 & 1.702 & 2.598 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.279 & 1.738 & 2.653 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.779 & 2.716 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.907 \end{pmatrix}.$$

For progressive Markov chain starting in a transient state, only transitions to the same state or forward are allowed. So that, the elements of fundamental matrix $\hat{\mathbf{M}}$ have the following interpretation: being in semester i , the value \hat{m}_{ij} is the estimated expected number of academic terms that a student remains in semester j before completing or dropping out the Program.

Table 1 shows the estimated expected academic terms until to a student completes or drops out the Program. The same table shows the 95% confidence intervals for the quantity aforementioned, both are calculated using the formulas given in equations (7) and (9), with $n_1 = 103$, $n_2 = 68$, $n_3 = 35$, $n_4 = 65$, $n_5 = 64$, $n_6 = 55$, $n_7 = 80$, $n_8 = 122$ and $n = n_1 + \dots + n_8 = 592$.

Table 1. Estimated expected numbers of academic terms until a student completes or drops out the Program

Semester	Expected number of academic terms	Confidence Interval (95%)
1	8.11	[7.65, 8.58]
2	8.58	[8.19, 8.98]
3	8.36	[7.98, 8.74]
4	8.06	[7.70, 8.42]
5	6.85	[6.51, 7.21]
6	5.67	[5.33, 6.01]
7	4.49	[4.16, 4.83]
8	2.90	[2.58, 3.23]

The value 2.90 in row eight of Table 1 is the estimated expected academic term until a student completes or drops out the Program when is in the eighth semester. Further, with a confidence level of 95%, the real expected academic term value is between 1.99 and 3.83. We can observe that the width of confidence intervals decreases as the semester increases. The latter behavior is because of the estimated variance given in (8) decreases, that is, for any semester i , the vector $\hat{\mathbf{b}}_j$ is null for all semester $j < i$, hence $\hat{\mathbf{b}}_j' \hat{\Sigma}_j \hat{\mathbf{b}}_j = 0$, for all $j < i$.

Using equation (5), we can estimate the probability that Markov chain is absorbed in a specific absorbing state when the student is in state i . The Tables 2 and 3 show the estimated absorption probabilities in graduate and dropout status, respectively.

Table 2. Estimated probabilities of graduate status when the student is currently in the i -th semester

Semester	Probability of graduate status	Confidence Interval (95%)
1	0.52	[0.48, 0.56]
2	0.66	[0.62, 0.71]
3	0.72	[0.68, 0.76]
4	0.79	[0.75, 0.84]
5	0.80	[0.76, 0.85]
6	0.82	[0.78, 0.87]
7	0.84	[0.80, 0.89]
8	0.90	[0.86, 0.94]

Table 3. Estimated probabilities of dropout status when the student is currently in the i -th semester

Semester	Probability of dropout status	Confidence Interval (95%)
1	0.48	[0.44, 0.52]
2	0.34	[0.29, 0.38]
3	0.28	[0.24, 0.33]
4	0.21	[0.16, 0.26]
5	0.20	[0.15, 0.24]
6	0.18	[0.13, 0.22]
7	0.16	[0.11, 0.20]
8	0.10	[0.06, 0.14]

From the Table 2, we infer that in semester eight a student has a high probability 0.9 to achieve graduate status. We can also observe the probability a student completes the Pro-

gram increases as the semester increases. On the other hand, the Table 3 shows that in semester eight a student has a low probability of dropping out of the Program.

From the Scholar Program Administration point of view an important quantity to estimate is the expected time that a student sojourns in the j -th semester before moving to some upper semester, and also to obtain a 95% confidence interval for this quantity. These values corresponding to mean exit times. Therefore, we use (10) to estimate them. In this case also we have $n_1 = 103, n_2 = 68, n_3 = 35, n_4 = 65, n_5 = 64, n_6 = 55, n_7 = 80, n_8 = 122$.

Table 4. Estimated expected sojourn times in the semester i

Semester	Expected sojourn time	Confidence Interval (95%)
1	1.41	[1.24, 1.58]
2	1.21	[1.08, 1.35]
3	1.06	[0.97, 1.15]
4	1.38	[1.18, 1.59]
5	1.39	[1.18, 1.60]
6	1.28	[1.10, 1.46]
7	1.78	[1.44, 2.12]
8	2.91	[2.19, 3.62]

From Table 4, we observe a student in semester seven has an expected sojourn time in that semester of 1.78 academic terms, this means that a student takes almost two periods to move from semester seven and with a 95% confidence level, the real expected sojourn time value is between 1.44 and 2.12 academic terms.

To end this section, by Theorem 1, we estimate $P(X_T = 9, T = n | X_0 = 1)$ for $n = 1, 2, \dots, 16$, namely, we estimate the probability of dropping out of the Program exactly in the n -th academic term. We organize these probabilities through a graph and determine the academic term in which the student has the highest probability to drop out of the Program. In Figure 1 we can observe that in the first academic term there is a higher probability of dropping out of Program, the probability is 0.15.

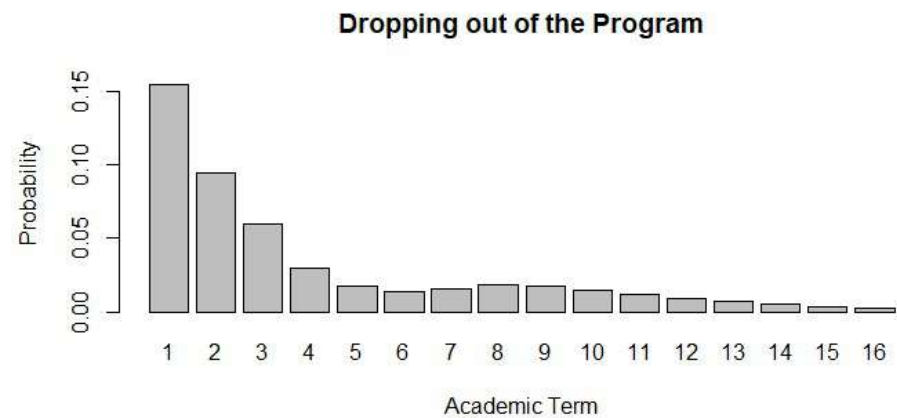


Figure 1. Probability of dropping out of the Program

On other hand, we also estimate probability of completing the Program exactly in n -th academic term: $P(X_T = 9, T = n | X_0 = 1)$ for $n = 1, 2, \dots, 16$. We organize these probabilities through a graphic and we determine the academic term where it is most probable that the

student will complete the Program. In Figure 2 we can observe that in the tenth academic period there is higher probability of completing the Program, the probability is 0.077.

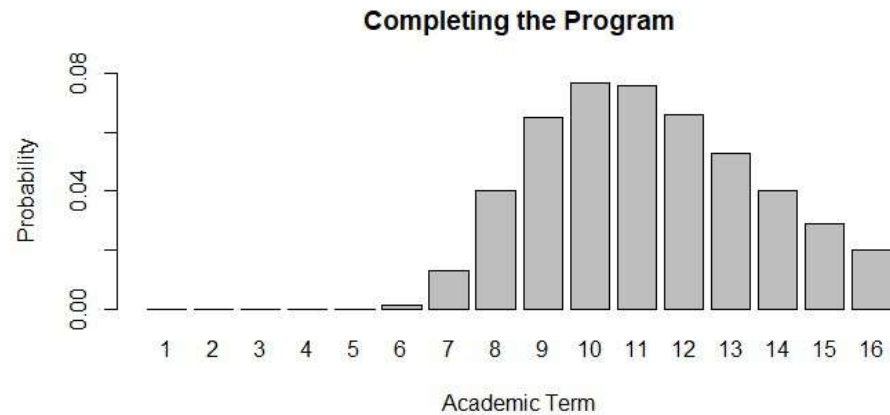


Figure 2. Probability of completing the Program

Conclusions

The statistical analysis of the academic trajectories provides useful and valuable information to identify weaknesses and improvement opportunities of the Program. For example, from our analysis and with the help of the administrators, we should be able to answer why the expected sojourn times per semester of a student for the seventh and eighth semesters are longer than previous ones.

The results obtained indicate that in the eighth semester, the probability of staying in a semester is higher compared to other semesters, this fact implies that in the eighth semester there is a greater expected sojourn time than in other semesters and its respective confidence interval is wider compared with the confidence interval of other semesters. The latter means that in the eighth semester students have difficulty accumulating credits to graduate. In the eighth semester there is an estimated expected sojourn time of 2.9 academic terms, and with a confidence level of 95%, the mean number of academic terms which a student has to accumulate enough credits to be able to graduate from the career is between 2.19 and 3.62 academic terms, which means, approximately between 1 and 1.5 years. Instead, the estimated probability of staying in third semester is lower compared to other semesters, this fact implies that in the third semester there is an expected sojourn time shorter than in other semesters and its respective confidence interval is shorter compared with the confidence interval of other semesters. The latter means, in the third semester, the average of academic terms that a student takes to accumulate the credits to advance is between 0.97 and 1.15 academic terms (with a 95% confidence level), that is, on average an academic term is maintained so that after that time the student advances to another semester.

From Figures 1 and 2, we conclude that the first two academic terms, which are related to the first semesters, there is a higher probability that a student will drop out of the Program, while the tenth and eleventh academic terms have a higher percentage that a student will complete the Program (between 5 and 5.5 years to graduate).

Finally, the Academic Program is designed in such a way that the credits assigned to subjects offered for the first semesters are greater than credits assigned to subjects offered for more advanced semesters. From this we deduce that in the first semesters there is the opportunity

to accumulate enough credits that allow the student to advance two semesters (two states) in an academic period, as opposed in the last semesters, for example, a seventh-semester student cannot finish the program in that semester. This is observed in the estimated transition probabilities given in the transition matrix $\hat{\mathbf{P}}$, for example, $\hat{p}_{13} = 0.010$, $\hat{p}_{24} = 0.265$, $\hat{p}_{35} = 0.029$, $\hat{p}_{46} = 0.015$, $\hat{p}_{57} = 0.047$ and $\hat{p}_{68} = 0$, $\hat{p}_{79} = 0$.

Acknowledgements

This research has been supported by the CONACYT Research Project CB-2015/252996, “Modelos con estructuras de Dependencia y sus Aplicaciones II”.

Contribution of the authors in the development of the work

The authors participated according to the following: HP wrote the final conclusions, RC and HP worked on the preliminary ones, JL and RC wrote the introductory section, RC, JL and HP established the results in point and interval estimates, as well as carried out the statistical analysis of the academic progress of university students.

Conflict of interest

All authors declare that they have no conflict of interest.

References

- Anderson, T.W., Goodman, L. A. (1957). Statistical Inference about Markov Chains. *The Annals of Mathematical Statistics*, 28(1), 89-110.
- Casella, G., Berger, R. (2002). *Statistical inference* (2nd ed.). Thomson Learning.
- Durrett, R. (2016). *Essentials of stochastic processes* (Third). Springer, Cham.
- Karson, M. J., Wroblewski, W. J. (1976). Confidence intervals for absorbing markov chain probabilities applied to loan portfolios. *Decision Sciences*, 7(1), 10-17.
- Kemeny, J. G., Snell, J. L. (1976). *Finite Markov chains*. Springer-Verlag, New York-Heidelberg.
- Mendoza, M. (1994). Asymptotic normality under transformations. a result with bayesian applications. *TEST: An Official Journal of the Spanish Society of Statistics and Operations Research*, 3, 173-180.
- Muhammad, M., Falgore, J. Y., Sani, U. (2019). Analysis of students' academic performance and progression (using markov chain approach).
- Norris, J. R. (1998). *Markov chains* (Vol. 2). Cambridge University Press, Cambridge.
- Perera, S., Bell, M. G. H., Kurachi, F., Kasthurirathna, D. (2019). Absorbing markov chain approach to modelling disruptions in supply chain networks. 2019 *Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, 515-520.
- Pinsky, M. A., Karlin, S. (2011). *An introduction to stochastic modeling* (Fourth). Elsevier/Academic Press, Amsterdam.
- Serfling, R. J. (1980). *Approximation theorems of mathematical statistics*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Wang, L., Laird-Fick, H., Parker, C., Solomon, D. (2021). Using markov chain model to evaluate medical students' trajectory on progress tests and predict usmle step 116 scores—a retrospective cohort study in one medical school. *BMC Medical Education*, 21.
- Yahaya, K.H., Hasan, H. (2021). Application of markov chain in students' assessment and performance: A case study of school of mathematical sciences, one of the public university in malaysia. *ITM Web Conf.*, 36, 01004.
- Yu, H.-m., Yang, S.-s., Gao, J.-w., Zhou, L.-y., Liang, R.-f., Qu, C.-y. (2013). Multistate markov model in outcome of mild cognitive impairments among community elderly residents in mainland china. *International Psychogeriatrics*, 25(5), 797-804.
- Zakarczemny, M., Zajecka, M. (2022) Note on DNA analysis and redesigning using markov chain. *Genes*, 13(3).

Artículo original

Conjuntos Sidon en Contextos Finitos

Sidon Sets in Finite Contexts

✉ Carlos Alberto Trujillo Solarte

Grupo de Investigación: Álgebra, Teoría de Números y Aplicaciones:ERM COL0017217, Universidad del Cauca, FACNED, Departamento de Matemáticas

Artículo de posesión como miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Resumen

Un conjunto A de enteros se llama *conjunto Sidon* si todas las sumas de dos elementos en A son distintas; es decir si para todo $a, b, c, d \in A$

$$(a + b = c + d) \Rightarrow \{a, b\} = \{c, d\}.$$

Estos conjuntos los consideró el analista Simon Sidon, a principios de los años 1930, en sus investigaciones sobre análisis de Fourier. Una *regla Golomb* es un conjunto de enteros (no negativos) con la propiedad que todas las diferencias no cero son distintas. Estas reglas especiales aparecieron en el estudio de interferencias en radiofrecuencias, realizado por Wallace Babcock, a principios de los años 1950. En este artículo se realiza un recorrido a través de contextos finitos en los que intervienen estos objetos matemáticos. Los contextos considerados son: conjuntos finitos de números enteros, grupos cíclicos, retículos bidimensionales de coordenadas enteras (arreglos Costas, secuencias Sonar) y funciones APN.

En buena parte, estas notas son resultado parcial de actividades realizadas durante mi actual año sabático en la Universidad del Cauca, y son también una versión ampliada de la conferencia invitada, que con el mismo título presenté durante el “55 Congreso Nacional de la Sociedad Matemática Mexicana”, realizado en la Universidad de Guadalajara del 23 al 28 de octubre de 2022 (<https://www.smm.org.mx/congreso>).

Palabras clave: Conjuntos Sidon; Reglas Golomb; Funciones Sidon; Arreglos Costas; Funciones APN; Espacios Sidon.

Abstract

A set of integers A is called a *Sidon set* if all the sums of two elements in A are distinct; that is, if for all $a, b, c, d \in A$, we have the implication $(a + b = c + d) \Rightarrow \{a, b\} = \{c, d\}$. The analyst Simon Sidon considered these sets, in the early 1930s, in his research on Fourier analysis. A *Golomb ruler* is a set of (nonnegative) integers with the property that all nonzero differences are distinct. Such special rules appeared in the study of radio frequency interference carried out by Wallace Babcock, at the beginning of the 1950s. The article, of an informative nature, takes a tour through finite contexts in which these mathematical objects intervene. The contexts considered are: finite sets of integers, cyclic groups, two-dimensional integer coordinate lattices (Costas arrays, Sonar sequences) and APN functions.

To a large extent, these notes are the partial result of activities carried out during my current sabbatical year at the University of Cauca, and are also an expanded version of the invited conference, that with the same title present during the “55 National Congress of the Mexican Mathematical Society”, held at the University of Guadalajara from 23 to 28 October, 2022 (<https://www.smm.org.mx/congreso>).

Keywords: Sidon Sets; Golomb Rulers; Sidon Functions; Costas Arrays; APN Functions; Sidon Spaces.

Citación: Trujillo Solarte CA.
Conjuntos Sidon en Contextos Finitos.
Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
47(185):1024-1044, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefy.n.1900>

Editor: Clara Helena Sánchez

Correspondencia:

Carlos Alberto Trujillo;
trujillo@unicauca.edu.co

Recibido: 31 de marzo de 2023

Aceptado: 6 de diciembre de 2023

Publicado en línea: 15 de diciembre de 2023



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

Introducción

Un subconjunto A de los números enteros se llama *conjunto Sidon* si todas las sumas de dos elementos de A son distintas; es decir si

$$(a + b = c + d) \implies \{a, b\} = \{c, d\},$$

para todo $a, b, c, d \in A$. Estos conjuntos los consideró el analista Simon Sidon, a principios de los años 1930, en sus investigaciones sobre análisis de Fourier. Así, el contexto original de los conjuntos de Sidon son los números enteros, y también sus primeros resultados aparecen ligados al desarrollo de la teoría de números aditiva.

Una *regla Golomb* es un conjunto de enteros (no negativos) con la propiedad que todas las diferencias no cero son distintas. Estas reglas especiales aparecieron en el estudio de interferencias en radiofrecuencias, realizado por Wallace Babcock, a comienzos de los años 1950. El contexto en el que se originan las reglas Golomb puede ubicarse en el de algunas aplicaciones de las matemáticas a teoría de la comunicación e información.

Las presentes notas describen un recorrido personal a través de diversos contextos, tanto teóricos como aplicados, en los que intervienen los conjuntos Sidon y reglas Golomb, objetos matemáticos claramente equivalentes. El recorrido personal es producto de la experiencia obtenida por autor y su grupo de investigación durante el desarrollo de proyectos de investigación (Sucesiones de Sidon y conjuntos $B_h[g]$, código Colciencias 11030511450; Las funciones de Graham y Sloane problemas de cubrimiento y empaquetamiento, código Colciencias 1103516865; Construcción de conjuntos $B_h[g]$, propiedad de Midy y algunas aplicaciones, código Colciencias 1103569935047; Aplicaciones a teoría de información y comunicación de los conjuntos de Sidon y sus generalizaciones, código Colciencias 110371250560); la dirección de tesis doctorales ver (Caicedo Bravo, 2016; Delgado Ordoñez, 2023; Martos Ojeda, 2019); y algunas publicaciones derivadas de ellas (Caicedo, Martos, & Trujillo, 2015, 2021; Campo, Mutis, & Trujillo, 2002; Delgado, Martos, & Trujillo, 2021; Martos, Delgado, & Trujillo, 2021; Martos, Daza, & Trujillo, 2021).

El contenido de las siguientes secciones se describe como sigue. En la Sección “Conjuntos Sidon en los Enteros” se presenta el problema original propuesto por Sidon, el Teorema de Erdős y Turán respecto al tamaño óptimo de un conjunto Sidon contenido en los primeros enteros positivos, concluyendo con una conjetura de Erdős relacionada. En “Reglas Golomb Enteras” se realiza un tratamiento similar para el caso de las reglas Golomb. En la Sección “Conjuntos Sidon en Grupos Finitos” se considera el problema de Sidon en el contexto abstracto de los grupos conmutativos finitos, comenzando con los problemas modulares, es decir en grupos cíclicos.

La Sección “En $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$: Dimensión 2” considera contextos bidimensionales desde la visión de Funciones Sidon enteras, se incluyen los arreglos Costas y las secuencias Sonar, que son conceptos originados en aplicaciones a teoría de la información y comunicación. Finalmente, “En Contexto Criptográfico” se mencionan algunas apariciones muy recientes de los conjuntos Sidon o análogos en contextos criptográficos: funciones Sidon entre grupos (funciones APN), espacios Sidon, y criptosistema Sidon.

Conjuntos Sidon en los Enteros

Notación

Si a, b son números enteros, $a < b$, mediante $[a, b]$ se representa al conjunto de todos los números enteros comprendidos entre a y b , es decir

$$[a, b] := \{a, a + 1, \dots, b\}.$$

$|A|$ denota el cardinal del conjunto A . Los símbolos $\overline{\lim}f(x)$, $\underline{\lim}f(x)$ corresponden a los límites superior e inferior de $f(x)$, cuando $x \rightarrow \infty$. Para funciones $f, g : g(x) = O(f(x))$ significa que $g(x)$ es acotada superiormente por un múltiplo constante de $f(x)$; $g(x) \sim f(x)$ significa que $\lim_{x \rightarrow \infty} (f(x)/g(x)) = 1$. Otra notación usada se aclara cuando sea necesario.

En esta sección se presenta la definición original de conjunto Sidon, el problema finito relacionado, el primer resultado y la primera conjetura que originaron la temática que nos ocupa.

Orígenes: Simon Sidon y Paul Erdős

¿Cuál es el máximo número de enteros positivos que pueden seleccionarse entre los primeros N , en forma tal que *todas las sumas de dos de ellos sean distintas*?

Conjuntos con esta propiedad se llaman **Conjuntos B_2** , nombre asignado por Simon Sidon (**Sidon**, 1932), o **Conjuntos Sidon**, como los denominó Paul Erdős (**Erdős & Turán**, 1941).

Problema finito de Sidon

Sean N un entero positivo y $[1, N]$ el intervalo entero correspondiente.

Estimar tan exactamente como sea posible la función

$$S(N) := \max \{|A| : A \subseteq [1, N], A \text{ es conjunto Sidon}\}.$$

En muchos de sus artículos sobre teoría de números aditiva y combinatoria, Paul Erdős hace referencia a problemas propuestos por el analista húngaro Simon Sidon ver, por ejemplo, (**Erdős**, 1995; **Erdős**, 1992; **Erdős**, 1994).

En 1941, Erdős y Turán escriben: “Sea $a_1 < a_2 < \dots$ una secuencia de enteros positivos, y suponga que las sumas $a_i + a_j$ (donde $i \leq j$) son todas diferentes. Tales secuencias, llamadas secuencias B_2 por Sidon, aparecen en la teoría de series de Fourier. La pregunta propuesta por Sidon es: ¿Qué tan grande puede ser $S(N)$? Es decir, ¿cuántos términos que no exceden a N puede tener una secuencia B_2 ?” (**Erdős & Turán**, 1941, p. 212).

Mediante una construcción que utiliza residuos cuadráticos módulo un primo, prueban que

$$S(N) > \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \varepsilon \right) \sqrt{N},$$

para todo $\varepsilon > 0$ y $N > N_0(\varepsilon)$. Por el otro lado, contando diferencias pequeñas, demuestran que

$$S(N) < (1 + \varepsilon) \sqrt{N},$$

para todo $\varepsilon > 0$ y $N > N_0(\varepsilon)$. Así,

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \leq \underline{\lim} \left(\frac{S(N)}{\sqrt{N}} \right) \leq \overline{\lim} \left(\frac{S(N)}{\sqrt{N}} \right) \leq 1 \text{ (Erdős & Turán, 1941, pp. 212–213).}$$

Erdős y Turán afirman: “Es muy probable que $\lim(S(N)/\sqrt{N})$ exista, pero no hemos sido capaces de probar esto” (Erdős & Turán, 1941, p. 212). Posteriormente, Erdős escribe: “Recientemente noté que J. Singer en su artículo (Singer, 1938), probó que si m es una potencia de un primo entonces existen $m + 1$ números $a_1 < a_2 < \dots < a_{m+1} < m^2 + m + 1$ tales que las diferencias $a_i - a_j$ son congruentes, $\text{mod } (m^2 + m + 1)$, a los enteros $1, 2, \dots, m^2 + m$. Claramente las sumas $a_i + a_j$ son todas diferentes, y como el cociente de dos primos consecutivos tiende a 1, la construcción de Singer dá, para algún N grande, un conjunto con $S(N) > N^{1/2}(1 - \varepsilon)$, para todo $\varepsilon > 0$. Este resultado demuestra que la cota superior anterior para $S(N)$ es lo mejor posible, excepto quizás por el término error $O(N^{1/4})$ ”, (Erdős, 1944, p. 208). De los comentarios anteriores se deduce el siguiente resultado.

Teorema 1 (Erdős, 1944; Erdős & Turán, 1941)

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{S(N)}{\sqrt{N}} \right) = 1.$$

Cota superior para $S(N)$ y una Conjetura de Erdős

Hay varias pruebas para la cota superior de la función $S(N)$. Para todo entero positivo N :

$$\begin{aligned} S(N) &< N^{1/2} + O(N^{1/4}) \text{ (Erdős, 1944, p. 208),} \\ &< N^{1/2} + N^{1/4} + 1 \text{ (Linström, 1969, p. 211),} \\ &< N^{1/2} + N^{1/4} + \frac{1}{2} \text{ (Cilleruelo, 2010, Cor 2, p. 860).} \end{aligned}$$

Mientras que, si N es suficientemente grande:

$$\begin{aligned} S(N) &< N^{1/2} + 0.998N^{1/4} \text{ (Balogh, Füredi, & Roy, 2021, Thm 1.1, p. 2),} \\ S(N) &< N^{1/2} + 0.99703N^{1/4} \text{ (O’Byrant, 2022, Thm 2, p. 2).} \end{aligned}$$

Todos los métodos utilizan la idea de Erdős y Turán: contar “diferencias pequeñas”; además la cota de Lindström también se deduce, con un poco de cuidado, de la prueba de Erdős y Turán (Campo, Mutis, & Trujillo, 2002).

El Teorema 1 prueba que: El máximo cardinal de un conjunto Sidon contenido en los primeros N enteros positivos se comporta asintóticamente como la raíz cuadrada de N , esto es: $S(N) \sim N^{1/2}$. Sin embargo, aún permanecen sin resolver problemas relacionados con la siguiente conjetura.

Conjetura 1 (Erdős, 1994, p. 264) Para todo $\varepsilon > 0$

$$S(N) < \sqrt{N} + O(N^\varepsilon). \tag{1}$$

Paul Erdős se refiere a esta conjetura en casi todos sus artículos sobre problemas. En algunos ofrece premios por resolverla. Por ejemplo, (Erdős, 1995, p. 4): “Ofrezco \$500 dólares por una prueba o refutación de (1), conjeturo que para todo t y $n > n_0(t)$

$$S(N+t) \leq S(N) + 1, \tag{2}$$

y quizás para $t < \varepsilon N^{1/2}$

$$S(N+t) \leq S(N) + 1. \tag{3}$$

La verdad de (2) y (3) implicaría que el crecimiento de $S(N)$ es familiarmente regular”.

Reglas Golomb Enteras

Orígenes: Wallace Babcock y Solomon Golomb

En un reporte técnico (Babcock, 1953), sobre interferencia en sistemas de radio frecuencia Wallace Babcock escribió: “La forma más general de interferencia de tercer orden ocurre cuando tres frecuencias A , B , y C intermodulan de tal forma que producen interferencia sobre un canal que opera en frecuencia D . En este caso

$$A + B - C = D.$$

Otra forma de interferencia de tercer orden ocurre cuando el segundo armónico de A intermodula con B produciendo interferencia sobre un canal que opera en frecuencia C . En este caso

$$2A - B = C.$$

Esta sección se propone determinar si el espacio de frecuencias se puede conservar seleccionando cuidadosamente los canales en operación en forma tal que los productos de intermodulación que se forman caigan en canales diferentes a los que están operando. Esto se logra seleccionando los canales en forma tal que la diferencia de frecuencias entre cualquier par de esos canales es distinta a la de cualquier otro par”. Veinte años después Martin Gardner utilizó el nombre de **reglas Golomb**, (Gardner, 1972), para referirse a conjuntos de enteros con diferencias distintas, en el contexto de rotulamiento de grafos (Bloom & Golomb, 1977; Golomb, 1972).

En 1986, se describe uno de los problemas formulados por Babcock (Atkinson, Santoro, & Urrutia, 1986): “Para todo m dado, encontrar enteros $0 \leq a_0 < a_1 < \dots < a_m$ tales que no se cumple ninguna igualdad no trivial $a_r + a_s - a_t = a_u$. Los enteros son radio frecuencias y como es deseable tener un rango espectral pequeño, se buscan soluciones en las que a_m sea lo mínimo posible (soluciones óptimas) o al menos probablemente cercanas a ser óptimas (soluciones subóptimas)”. Utilizando los conjuntos con diferencias distintas obtenidos por James Singer, (Singer, 1938) y un resultado análogo (Bose, 1942), en (Atkinson, Santoro, & Urrutia, 1986), se demuestra que:

$$1 - \frac{2}{\sqrt{m}} < \frac{a_m}{m^2} < 1 + \frac{m^{19/12}}{m^2}.$$

Un conjunto A de enteros no negativos se llama una *regla Golomb* si todas las diferencias no cero entre dos de sus elementos son distintas, es decir si para todo $a, b, c, d \in A$, con $a \neq b$ y $c \neq d$

$$(a - b = c - d) \implies (a = b) \text{ y } (c = d).$$

Sus elementos se llaman *marcas*, el número de marcas *orden*, la máxima diferencia entre dos marcas, $l(A) := \max A - \min A$, se llama *longitud* de la regla.

Problema Golomb

. ¿Cuál es la mínima longitud de una regla Golomb con m marcas? Determinar la(s) regla(s) Golomb más corta(s) para un número fijo de marcas, calcular el valor de la función **OEIS (A003022)**

$$G(m) := \min \{l(A) : |A| = m, \text{ y } A \text{ es regla Golomb}\}.$$

Teorema 2 (Atkinson, Santoro, & Urrutia, 1986, p. 615).

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \left(\frac{G(m)}{m^2} \right) = 1.$$

Cota Inferior para $G(m)$ y Conjetura ASU

La cota inferior para la función $G(m)$ ha sido mejorada como sigue:

$$\begin{aligned}
 G(m) &> \frac{m(m-1)}{2} \text{ (trivial),} \\
 &> m^2 - 2m\sqrt{m} \text{ (Atkinson, Santoro, \& Urrutia, 1986, p. 615),} \\
 &> m^2 - 2m\sqrt{m} + \sqrt{m} - 2 \text{ (Dimitromanolakis, 2002, Tmh 4.9, p. 32),} \\
 &> m^2 - 2m\sqrt{m-1} + m - \frac{m}{\sqrt{m-1}} - 1 \text{ (Caicedo, Martos, \& Trujillo, 2015, p. 168),} \\
 &> m^2 - 2m\sqrt{m} + m + \sqrt{m} - 1 \text{ (O'Bryant, 2022, Thm 1, p.2).}
 \end{aligned}$$

Las pruebas utilizan ideas similares a los métodos usados en la obtención de cotas superiores para $S(N)$.

Conjetura 2 (Atkinson, Santoro, & Urrutia, 1986, p. 615) Para todo entero positivo m ,

$$G(m) > m^2 - m\sqrt{m}.$$

Las funciones $S(N)$ y $G(m)$ como “problemas inversos”

Apostolos Dimitromanolakis, en su Tesis de Maestría (Dimitromanolakis, 2002), dedica el Capítulo 4 a la equivalencia del problema finito de Sidon y del problema de Golomb, y establece relaciones entre las funciones $S(N)$ y $G(m)$. Específicamente, prueba los siguientes resultados.

- Para todo par de enteros positivos m, N

$$\begin{aligned}
 S(N) &= m \iff (G(m) \leq N - 1 \text{ y } G(m + 1) > N). \\
 G(m) &= n \iff (S(N) = m - 1 \text{ y } S(N + 1) = m).
 \end{aligned}$$

- Si $L(N)$ y $U(N)$ son funciones invertibles en un intervalo contenido en los enteros positivos, se tiene la siguiente implicación.

$$L(N) < S(N) < U(N) \implies U^{-1}(m) < G(m) + 1 < L^{-1}(m).$$

En el otro sentido, si $L(m)$ y $U(m)$ son funciones invertibles en un intervalo contenido en los enteros positivos, entonces

$$L(m) < G(m) < U(m) \implies U^{-1}(N) < S(N) < L^{-1}(N).$$

Utilizando la cota superior de Lindström para $S(N)$, obtiene su cota inferior para $G(m)$

$$G(m) \geq m^2 - 2m\sqrt{m} + \sqrt{m} - 2.$$

Con ayuda computacional, prueba que:

$$\begin{aligned}
 G(m) &< m^2, \text{ para todo } m \leq 65000; \\
 S(N) &> N^{1/2}, \text{ para todo } N < 4.2 \times 10^9.
 \end{aligned}$$

Ver también la Tesis de Maestría de Carlos Martos (Martos Ojeda, 2015).

De aquí en adelante, se usan los conceptos equivalentes Conjuntos Sidon y Reglas Golomb, según se trate de sumas o diferencias, respectivamente.

Conjuntos Sidon en Grupos Finitos

Es conveniente considerar el concepto de conjunto Sidon en el anillo de enteros módulo N , $(\mathbb{Z}_N, +, \cdot)$. Un subconjunto A de \mathbb{Z}_N , con $k = |A|$ elementos, se llama un *conjunto Sidon módulo N* si todas las $\binom{k+1}{2} = \frac{k(k+1)}{2}$ sumas de dos elementos de A son distintas módulo N ; equivalentemente A se llama una *regla Golomb módulo N* si todas las $2\binom{k}{2} = k(k-1)$ diferencias no cero son distintas módulo N . Claramente, si A es un conjunto Sidon módulo N , con k elementos entonces, contando diferencias distintas de cero, tenemos

$$k(k-1) \leq N-1. \quad (4)$$

En estas estructuras se han construido conjuntos Sidon “óptimamente densos”, es decir con un número de elementos aproximadamente igual a $N^{1/2}$. Las siguientes construcciones muestran que existen familias infinitas de conjuntos Sidon módulo N para las cuales (4) es lo mejor posible.

Construcciones en Grupos Cíclicos

Una excelente referencia sobre los problemas de Sidon es el texto *Sequences* (Halberstam & Roth, 1983), presenta una buena descripción de las construcciones debidas a Singer y a Bose, ya mencionadas. En los siguientes resultados, q es una potencia prima.

Teorema 3 (Singer, 1938, pp. 380–381) *Existen $q+1$ enteros s_1, s_2, \dots, s_{q+1} tales que las q^2+q diferencias no cero $s_i - s_j$ representan todos los residuos no cero módulo q^2+q+1 .*

Teorema 4 (Bose, 1942, pp. 1–15). *Existen q enteros b_1, b_2, \dots, b_q tales que las $q(q-1)$ diferencias no cero $b_i - b_j$ representan todos aquellos residuos módulo q^2-1 que no son divisibles entre $q+1$.*

Corolario 5 (Halberstam & Roth, 1983, pp. 80–81) *Existen $q+1$ enteros s_1, s_2, \dots, s_{q+1} tales que las sumas $s_i + s_j$, donde $1 \leq i < j \leq q+1$, son distintas módulo q^2+q+1 ; y existen q enteros b_1, b_2, \dots, b_q tales que las sumas $b_i + b_j$, donde $1 \leq i < j \leq q$, son distintas módulo q^2-1 .*

Más recientemente, Imre Ruzsa construye un conjunto Sidon “denso” para todo primo impar p , utiliza la existencia de raíces primitivas módulo p .

Teorema 6 (Ruzsa, 1993, Thm 4.4, p. 267). *Existen $p-1$ enteros r_1, \dots, r_{p-1} tales que las sumas $r_i + r_j$ son todas diferentes módulo $p(p-1)$. Contando las diferencias, es fácil ver que no pueden haber p de tales números.*

Como todo conjunto Sidon módulo N , induce un conjunto Sidon entero contenido en $[0, N-1]$, estas construcciones modulares “óptimas” se utilizan para obtener “buenas” construcciones enteras, tanto para conjuntos Sidon como para reglas Golomb “sub-óptimamente cortas”.

Problemas Modulares: Implicaciones para $S(N)$ y $G(m)$

Sea

$$S(\text{mod}N) := \max\{|A| : A \text{ es conjunto Sidon módulo } N\},$$

entonces

$$S(\text{mod}N) \leq S(N).$$

Así, buenas construcciones modulares inducen buenas construcciones enteras.

Problema Sidon modular

En el contexto de los grupos cíclicos finitos, el problema (modular) de Sidon consiste en “estimar, lo más exactamente posible, la función $S(\text{mod}N)$ ”.

Contando diferencias, las construcciones de Singer, Bose y Ruzsa, implican:

$$\begin{aligned} S(q^2 + q + 1) &\geq q + 1 = S(\text{mod } q^2 + q + 1), \\ S(q^2 - 1) &\geq q = S(\text{mod } q^2 - 1), \\ S(p^2 - p) &\geq p - 1 = S(\text{mod } p^2 - p), \end{aligned}$$

para toda potencia prima q y todo primo p . Por otro lado, como la función $S(N)$ es creciente y el cociente entre primos consecutivos tiende a 1, se sigue que

$$1 \leq \underline{\lim} \left(\frac{S(N)}{N^{1/2}} \right).$$

Problema Golomb modular

Dados m y N , cuando existe una regla Golomb módulo N con m marcas, proponemos el siguiente problema natural; **problema modular de Golomb** que consiste en estimar lo más exactamente posible la función

$$G(m, \text{mod}N) := \min \{I(A) : |A| = m \text{ y } A \text{ es una regla Golomb módulo } N\}.$$

Contando diferencias, en las construcciones modulares:

$$\begin{aligned} G(q + 1, \text{mod } q^2 + q + 1) &\leq q^2 + q, \\ G(q, \text{mod } q^2 - 1) &\leq q^2 - 2, \\ G(p - 1, \text{mod } p^2 - p) &\leq p^2 - p - 1, \end{aligned}$$

para toda potencia prima q y todo primo p . También para el caso entero:

$$\begin{aligned} G(q + 1) &\leq q^2 + q, \\ G(q) &\leq q^2 - 2, \\ G(p - 1) &\leq p^2 - p - 1. \end{aligned}$$

Así, es posible mejorar un poco las cotas superiores para el caso entero utilizando la estructura de los grupos cíclicos.

Como $G(p) < p^2$, para todo primo p , se sigue que:

$$\overline{\lim} \left(\frac{G(m)}{m^2} \right) \leq 1.$$

Observación. Aparentemente, la función $G(m, \text{mod}N)$ no ha sido investigada.

Conjuntos B_2 en Grupos Finitos

Sea $(G, +)$ grupo conmutativo, notado aditivamente. Un subconjunto A de G se llama un conjunto B_2 (Conjunto Sidon o Regla Golomb) en G si para todo $a, b, c, d \in A$:

$$(a + b = c + d) \implies \{a, b\} = \{c, d\}.$$

Equivalentemente si $a, b, c, d \in A$, con $a \neq b, c \neq d$,

$$(a - b = c - d) \implies (a = c) \text{ y } (b = d).$$

Si se definen los conjuntos $A + A$ y $A \ominus A$ mediante

$$\begin{aligned} A + A & : = \{a + b : a, b \in A\}, \\ A \ominus A & : = \{a - b : a, b \in A, a \neq b\}, \end{aligned}$$

y si A es finito con $|A| = k$ elementos, se sigue que: A es un conjunto Sidon si y solo si $A + A$ y $A \ominus A$ tienen cardinales maximales:

$$|A + A| = \binom{k+1}{2}, \quad |A \ominus A| = 2 \binom{k}{2}.$$

Problema Sidon en grupos finitos

Si G es un grupo conmutativo finito, como antes, el problema general consiste en determinar la función

$$S(G) = S_2(G) := \max \{|A| : A \text{ es conjunto Sidon en } G\}.$$

Si A es un conjunto Sidon en G , con k elementos y el orden de G es N , entonces

$$\begin{aligned} k(k-1) & \leq N, \\ S(G) & \leq \sqrt{N} + 1. \end{aligned}$$

Desde la desigualdad anterior y las construcciones “óptimas” en algunos grupos finitos, conocemos valores exactos:

G	$\mathbb{Z}_{p^{2n+p^n+1}}$	$\mathbb{Z}_{p^{2n-1}}$	$\mathbb{Z}_{p^{(p-1)}}$	\mathbb{Z}_p^{2n}	$\mathbb{Z}_p^n \times \mathbb{Z}_{p^{n-1}}$	$\mathbb{Z}_{p^{n-1}}^2$
$S(G)$	$p^n + 1$	p^n	$p - 1$	p^n	$p^n - 1$	$p^n - 2$

Además, cuando G es finito, podemos definir un orden y considerar la función de Golomb relativa a la regla más corta. En particular, en el caso cíclico este problema es bastante interesante OEIS(A008404).

En $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$: Dimensión 2

Esta sección presenta conjuntos Sidon y reglas Golomb en contexto bidimensional. Se retoman párrafos de uno de los artículos que originan la temática: *Two-Dimensional Synchronization Patterns for Minimum Ambiguity* (Golomb & Taylor, 1982).

“Hay numerosos problemas que aparecen en radar, sonar, alineación física y sincronización tiempo-posición, problemas que pueden formularse en términos de encontrar patrones bidimensionales de *unos* (puntos) y *ceros* (blancos) para los cuales la autocorrelación aperiódica bidimensional (espacial), llamada *función ambigüedad* del análisis radar, tiene mínimos valores fuera de fase. Un contexto típico es aquel en el cual se desea producir una secuencia de frecuencias distintas en intervalos consecutivos de tiempo, en tal forma que si un eco retornante se corre en tiempo y frecuencia debido a un objeto en movimiento, la única traslación del modelo original que tiene alta correlación con la configuración recibida será aquella cuyo corrimiento de tiempo corresponde al rango correcto y cuyo corrimiento de frecuencia corresponde con la velocidad correcta del objeto”.

“Consideramos patrones de puntos en una malla rectangular bajo diferentes combinaciones de requisitos. El concepto unificador es el de un patrón que dé mayor coincidencia con copias corridas de sí mismo únicamente cuando ellas estén en posiciones especiales, y de otra forma únicamente coincidencias menores. En efecto, nuestros patrones básicos tienen la propiedad de que en cualquier posición alcanzable mediante corrimientos horizontales y verticales no cíclicos, diferentes a la posición original, el patrón coincidirá con el original en a lo sumo un punto localización”.

Los conjuntos Sidon y reglas Golomb aparecen de manera natural en problemas originados en aplicaciones, en contextos bidimensionales tales como se sugiere en los párrafos anteriores (Costas, 1984, pp. 996–997) y (Etzion, 2009; Gagliardi, Robbins, & Taylor, 1987).

Arreglos Costas

Orígenes: John Costas y Solomon Golomb

Solomon Golomb (Golomb, 1984, p. 13), escribe: “Patrones bidimensionales de una clase especial, que aparecen en un problema sonar práctico, me fueron sugeridos por John Costas, quien preguntó sobre un patrón $n \times n$ de n puntos con un punto en cada fila y en cada columna, con la propiedad de que cualquier corrimiento horizontal y vertical debe coincidir en a lo sumo un punto posición. La aplicación original de esas constelaciones fue un problema sonar (Costas, 1975), pero también existen aplicaciones a radar, a sincronización y alineación”. A esos arreglos, Golomb los denomina constelaciones, hoy se llaman arreglos Costas.

Definición 1 (Colbourn & Dinitz, 2007, p. 357) *Un arreglo Costas de orden n es un arreglo $n \times n$ de puntos negros y blancos que satisface dos condiciones:*

1. *Hay n puntos negros y $n(n - 1)$ puntos blancos con exactamente un punto negro en cada fila y un punto negro en cada columna.*
2. *Todos los segmentos entre pares de puntos negros son diferentes en longitud o en pendiente.*

Problema Costas (Golomb, 1984, p. 13) ¿Existen arreglos Costas de cualquier orden? Si mediante $C(n)$ se denota al número de arreglos Costas de orden n , el problema fundamental consiste en determinar el valor de $C(n)$, en particular se trata de probar o refutar que $C(n) > 0$ para todo n ¿Existen arreglos Costas de orden 32? ¿De orden 33?

Sabemos que existen arreglos Costas de orden n para todo n , $1 \leq n < 359$, excepto para n en el siguiente conjunto (Colbourn & Dinitz, 2007, p. 359) OEIS(A008404).

32, 33, 43, 48, 49, 54, 63, 73, 74, 83, 84, 85, [89, 93], 97, 103, 109, [113, 117],
120, 121, 131, 132, 133, [139, 143], 151, 152, 153, 157, 158, 159, 163, 168, 169,
173, 174, [181, 186], 193, [199, 207], [211, 219], 223, 229, 233, 234, [242, 246],
251, 257, 258, 259, 263, 271, 272, 273, 277, 283, 284, 285, 288, 289, [293, 303],
313, [317, 327], 331, 332, 333, 337, 338, 339, 342, 349, 353, 354.

Construcciones Algebraicas de Arreglos Costas

Un ejemplo de un arreglo Costas de orden 10:

10					■					
9						■				
8			■							
7							■			
6								■		
5				■						
4		■								
3								■		
2	■									
1										■
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Teorema 7 *Construcción Welch-Gilbert (Gilbert, 1965; Golomb, 1984, Thm 1, p.14). Sean p un primo, α una raíz primitiva módulo p , $n = p - 1$ y a un entero no negativo. Se obtiene un arreglo Costas de orden n colocando un punto en (i, j) si y solo si*

$$i = \alpha^j, \quad a \leq j < n + a, \quad i = 1, \dots, n.$$

Teorema 8 *Construcción Lempel-Golomb.(Colbourn & Dinitz, 2007; Golomb, 1984, Thm 3, p. 16). Sean q una potencia prima, α y β elementos primitivos en el campo \mathbb{F}_q y $n = q - 2$. Se obtiene un arreglo Costas de orden n , colocando un punto en (i, j) si y solo si*

$$\alpha^i + \beta^j = 1, \quad 1 \leq i, j \leq n.$$

Cuando $\alpha = \beta$, se trata de la construcción de Lempel, generalizada por Golomb para todo α, β .

De las construcciones anteriores se sigue que: $C(p - 1) \geq 1$ y $C(q - 2) \geq 1$, para todo primo p y toda potencia prima $q \geq 4$.

Secuencias Sonar

Orígenes: Golomb, Taylor, Moreno, Games

En (Golomb & Taylor, 1982), Solomon Golomb y Herbert Taylor, comentan: “...la aplicación Doppler sonar o radar no requiere la restricción de un punto por fila, únicamente la restricción de un punto por columna. En notación musical, el patrón puede verse como una secuencia de tonos, pero únicamente un tono en cada latido. Cuando los tonos retornan después de reflejarse en un objeto en movimiento, el corrimiento horizontal corresponde a tiempo transcurrido y el corrimiento vertical corresponde al Doppler. El número de filas será limitado por el contexto, pero generalmente el número de columnas será el que se desea maximizar”. Oscar Moreno, Richard Games y Herbert Taylor, informalmente definen secuencia sonar como: “un arreglo $n \times m$ de puntos y blancos que tiene un punto por columna y valores autocorrelación menores o iguales que 1, esto es un arreglo que coincide en no más de un punto con cualquier corrimiento bidimensional no cero de sí mismo, se llama secuencia sonar” (Moreno, Games, & Taylor, 1991).

Paul Erdős, Ronald Graham, Imre Ruzsa y Herbert Taylor, presentan el concepto como sigue. “Un subconjunto de la cuadrícula $m \times n$ con exactamente un punto en cada columna, tal que los $\binom{m}{2}$ vectores determinados por ellos son todos distintos”, refuerzan la definición: “Una secuencia sonar $n \times m$ es un arreglo de puntos y blancos con n filas y exactamente un punto en cada una de sus m columnas, sujeto al requerimiento que pares distintos de puntos determinan vectores distintos. Cualquier dos de tales vectores deben diferenciarse en pendiente o en longitud” (Erdős et al., 1992).

La referencia principal para esta sección es (Moreno, Games, & Taylor, 1993), de la cual se toman las definiciones y construcciones.

Definición 2 Para m y n enteros, sean $[1, m] = \{1, 2, \dots, m\}$ y $[1, n] = \{1, 2, \dots, n\}$.

1. Una función $f : [1, n] \rightarrow [1, m]$ tiene la propiedad de diferencias distintas si para todos los enteros h, i, j , con $1 \leq h \leq n - 1$ y $1 \leq i, j \leq n - h$,

$$f(i + h) - f(i) = f(j + h) - f(j) \quad \text{implica} \quad i = j.$$

2. Considerando a $[1, m]$ como un conjunto de representantes de los enteros módulo m . Una función $f : [1, n] \rightarrow \mathbb{Z}_m$ tiene la propiedad de diferencias modulares distintas si para todos los enteros h, i, j , con $1 \leq h \leq n - 1$ y $1 \leq i, j \leq n - h$,

$$f(i + h) - f(i) \equiv f(j + h) - f(j) \pmod{m} \quad \text{implica} \quad i = j.$$

3. Una **secuencia Costas** de longitud n es una permutación $f : [1, n] \rightarrow [1, n]$ con la propiedad de diferencias distintas.
4. Una **secuencia sonar** $m \times n$ es una función $f : [1, n] \rightarrow [1, m]$ con la propiedad de diferencias distintas.
5. Una **secuencia sonar modular** $m \times n$ es una función $f : [1, n] \rightarrow \mathbb{Z}_m$ con la propiedad de diferencias modulares distintas.

Construcciones de Secuencias Sonar

Un ejemplo de secuencia sonar 11×6 :

6						■	■			■	
5	■										
4				■							
3			■								
2		■						■			
1				■					■		■
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Las siguientes construcciones se describen en (Moreno, Games, & Taylor, 1993).

Secuencia Cuadrática (Moreno, Games, & Taylor, 1993, p. 1985). Sean p un primo impar; a, b, c enteros constantes con a no divisible entre p . Entonces

$$f : [1, p + 1] \rightarrow [1, p],$$

$$f(x) = ax^2 + bx + c \pmod{p},$$

es una secuencia sonar modular $p \times (p + 1)$.

Secuencia Shift (Moreno, Games, & Taylor, 1993, p. 1985). Sean p un primo, $q = p^r$, α un elemento primitivo de \mathbb{F}_{q^2} , y β un elemento primitivo de \mathbb{F}_q . Para $p = 2$, sea

$$f : [1, q] \rightarrow [1, q - 1],$$

$$f(x) = \log_{\beta} \left((\alpha^i)^p + \alpha^i \right).$$

Para p impar, definir f similarmente, cambiando el dominio por $\left[-\frac{q-1}{2}, \frac{q-1}{2}\right]$. Entonces f es una secuencia sonar modular $(q - 1) \times q$.

Secuencia Welch Exponencial (Moreno, Games, & Taylor, 1993, p. 1986). Sea α una raíz primitiva módulo el primo p . Entonces

$$f : [1, p-1] \longrightarrow [1, p],$$

$$f(x) = \alpha^x \pmod{p},$$

es una secuencia sonar modular $p \times (p-1)$.

Secuencia Welch Logarítmica (Moreno, Games, & Taylor, 1993, p. 1986). Sea α una raíz primitiva módulo el primo p . Entonces

$$f : [1, p-1] \longrightarrow [1, p-1],$$

$$f(x) = \log_{\alpha} x \pmod{p-1},$$

es una secuencia sonar modular $(p-1) \times (p-1)$.

Secuencia Lempel (Moreno, Games, & Taylor, 1993, p. 1986). Sea $q > 2$ una potencia prima y α un elemento primitivo de \mathbb{F}_q . Entonces

$$f : [1, q-2] \longrightarrow [1, q-1],$$

$$f(x) = y \iff \alpha^x + \alpha^y = 1,$$

es una secuencia sonar modular $(q-1) \times (q-2)$.

Secuencia Golomb (Moreno, Games, & Taylor, 1993, p. 1986). Sea $q > 2$ una potencia prima y α, β elementos primitivos de \mathbb{F}_q . Entonces

$$f : [1, q-2] \longrightarrow [1, q-1],$$

$$f(x) = y \iff \alpha^x + \beta^y = 1,$$

es una secuencia sonar modular $(q-1) \times (q-2)$.

Problemas Sonar

El problema principal para secuencias sonar es: “Para m fijo, encontrar el máximo n para el cual existe una secuencia sonar $m \times n$ ¿Cuál es el máximo número n tal que existe una secuencia sonar $m \times n$? Se trata entonces de estimar tan exactamente como sea posible la función

$$SS(m) := \max \{n \in \mathbb{N} : \text{existe una secuencia sonar } m \times n\}.$$

Se han realizado extensas computaciones para determinar $SS(m)$:

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$SS(m)$	2	4	6	8	9	11	12	13	14	16	17	18	19
m	14	15	16-18	19	20	21	22	23	24-27	28-31			
$SS(m)$	21	22	≥ 23	25	26	28	30	31	32	37			

La cota superior trivial es: $SS(m) \leq 2m$; igualdad para $1 \leq m \leq 4$, proponemos los siguientes dos problemas.

Problema sonar 1. Mejorar la cota superior trivial para valores “pequeños” de m (útiles en aplicaciones). Probar que $SS(m) \leq 2m - 1$ para todo $m \geq 5$.

Problema sonar 2. Construir secuencias sonar que permitan probar que $SS(m) \geq m + 2$, $m + 3$ para infinitos m .

Teorema 9 (Erdős et al., 1992, Thm 4, p. 42). Si existe una secuencia sonar $m \times n$, entonces $n < m + 5m^{2/3}$.

Su prueba utiliza un método similar a la del Teorema de Erdős y Turán para la cota superior de $S(N)$. En verdad, ellos demuestran que

$$SS(m) \leq m + 4m^{2/3} + 4n^{1/3} + 1.$$

Además, en el comentario siguiente a la demostración del teorema afirman: “Computación más cuidadosa demuestra que actualmente

$$SS(m) < m + 3m^{2/3} + 2m^{1/3} + 9,$$

para todo m .”

Por el otro lado, utilizando la construcción cuadrática y un resultado sobre el menor no residuo cuadrático entre 1 y p , prueban el siguiente resultado.

Teorema 10 (Erdős et al., 1992, Thm 5, p. 43). Para algún $c > 0$, constante, existen infinitos enteros m tales que existe una secuencia sonar $m \times n$ con $n > m + c \log m \log m$.

Al finalizar proponen el siguiente problema.

Problema abierto (Erdős et al., 1992, p. 43). ¿Para todo n , existe un arreglo $n \times n$, con n puntos en el cual pares distintos de puntos determinan vectores que difieren en pendiente o en longitud?

Arreglos Costas y Secuencias Sonar como Funciones Sidon

En situaciones especiales, por ejemplo arreglos Costas y secuencias sonar, consideramos importante ubicar los contextos desde las que llamamos funciones Sidon que provienen de los grafos de funciones.

Definición 3 Sean m y n enteros positivos. Una función

$$F : [1, n] \longrightarrow [1, m]$$

se llama función Sidon, de orden $m \times n$, si su grafo

$$\mathcal{G}_F := \{(x, F(x)) : x \in [1, n]\}$$

es un conjunto Sidon en el grupo $(\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}, +)$. Equivalentemente, si \mathcal{G}_F es libre de paralelogramos (no hay vectores iguales entre pares de sus puntos). Vectorialmente, la definición prohíbe igualdades “no triviales” de la forma

$$\begin{aligned} \mathbf{a} + \mathbf{b} &= \mathbf{c} + \mathbf{d}, \\ \mathbf{a} - \mathbf{c} &= \mathbf{d} - \mathbf{b}, \end{aligned}$$

entre puntos $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d} \in \mathcal{G}_F$.

Con esta definición, es claro que el concepto de arreglo Costas de orden n es equivalente al concepto de función Sidon biyectiva de $[1, n]$ en $[1, n]$, entonces los términos *permutación Costas de orden n* y *permutación Sidon de orden n* , se pueden usar indistintamente. En términos de funciones Sidon se tienen las siguientes definiciones de arreglo Costas y secuencias sonar.

- Un arreglo (secuencia, función, permutación) Costas de orden n , es una función Sidon biyectiva de $[1, n]$ en $[1, n]$.

- Una secuencia (función, arreglo) sonar $m \times n$, es una función Sidon de $[1, n]$ en $[1, m]$.
- Una secuencia sonar modular $m \times n$, es una función Sidon de $[1, n]$ en los enteros módulo m , \mathbb{Z}_m .

Los problemas y resultados sobre arreglos Costas y secuencias sonar pueden trasladarse al contexto de funciones Sidon, y recíprocamente.

Conjuntos Sidon Bidimensionales y Rectángulos Golomb.

Las funciones Sidon, los arreglos Costas y las secuencias sonar son casos especiales de conjuntos Sidon en el grupo $(\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}, +)$, extensión natural de los originales conjuntos Sidon en el grupo de los enteros, $(\mathbb{Z}, +)$, ver tesis doctorales de Carlos Trujillo (Trujillo Solarte, 1998) y Yadira Caicedo (Caicedo Bravo, 2016).

En 1995, James Shearer escribe: “Robinson define un *rectángulo Golomb* como un arreglo $n \times m$ de unos y ceros tal que la autocorrelación bidimensional tiene tres valores: 0, 1 y k , donde k es el número de unos en el arreglo (Robinson, 1985). Esto significa que las posiciones de los unos en cualquier traslación entera no cero del rectángulo coincide con las posiciones de los unos en la posición original del rectángulo en a lo sumo un lugar. Equivalentemente, la diferencia entre las posiciones de todo par de unos en el rectángulo, consideradas como vectores, son distintas” (Shearer, 1995, p. 1).

Es decir, se trata de un conjunto Sidon, en dos dimensiones, contenido en la malla $[1, n] \times [1, m]$. Es entonces natural preguntar por el máximo cardinal de un conjunto contenido en el rectángulo:

$$G(n, m) := \max \{ |A| : A \subset [1, n] \times [1, m] \text{ y } A \text{ es arreglo Golomb} \}.$$

Robinson define un *rectángulo óptimo* (Shearer, 1995, p. 1) como aquel que contiene $G(n, m)$ unos. El mismo Robinson utiliza el nombre de *cuadrado Golomb* para el caso en que $n = m$ y presenta la siguiente tabla

$n =$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$G(n, n) \leq$	5	6	8	10	11	13	15	17	19	21	23

Demuestra además las siguientes cotas superiores:

$$G(n, n) < 2n$$

$$G(n, n) \leq 2n - 2, \text{ para } n > 3.$$

$$G(n, n) \leq 2n - 3, \text{ para } n > 6.$$

Finalmente afirma que el argumento de (Erdős & Turán, 1941) se puede usar para demostrar que

$$G(n, n) < n + (3/2)n^{2/3},$$

para n suficientemente grande.

James Shearer actualiza algunos valores para $G(n, n)$ y define $GS(n, n)$ como el máximo número de unos en un cuadrado Golomb “Simétrico” $n \times n$ (Shearer, 2004).

$n =$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$G(n, n) \leq$	3	5	6	8	9	11	12	13	15	16	17
$GS(n, n)$	3	5	6	8	9	10	12	13	15	16	17

$n =$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$G(n, n) \leq$										
$GS(n, n)$	18	19	21	22	23	24	25	26	27	29

Para otros valores de $G(n, m)$ ver (Robinson, 1997; Shao *et al.*, 2013, pp. 67–68).

Conjuntos Sidon en dimensión d

En 1972, Bernt Lindström considera conjuntos Sidon en el contexto de vectores en dimensión d . “Decimos que una secuencia de vectores v_1, v_2, \dots, v_n es una B_2 -secuencia si todas las sumas $v_i + v_j$, con $1 \leq i \leq j \leq n$, son diferentes. Si la dimensión de todos los vectores es d y las componentes se toman en $\{0, 1, 2, \dots, N-1\}$, sea $F_2(N, d)$ el máximo número de vectores en una B_2 -secuencia”.

Teorema 11 (Lindström, 1969, p. 211) Cuando $N \rightarrow \infty$,

$$F_2(N, d) \leq N^{d/2} + O\left(N^{d^2/(2d+2)}\right).$$

Al finalizar, sección Problemas no Resueltos, como una generalización de la conjetura de Paul Erdős, propone el siguiente problema.

Probar que, cuando $N \rightarrow \infty$,

$$F_2(N, d) = N^{d/2} + O(1).$$

Javier Cilleruelo (Cilleruelo, 2010, p. 858) refuta la conjetura anterior de Lindström para $d = 2$ demostrando que la desigualdad

$$F_2(N, 2) > N + \log N \log \log \log N$$

vale infinitamente.

El Teorema 11 para $d = 2$ implica que

$$F_2(N, 2) \leq N + O\left(N^{2/3}\right).$$

En la tesis doctoral De Yadira Caicedo se muestra una constante explícita para el término $N^{2/3}$ (Caicedo Bravo, 2016). Para todo entero positivo N , se tiene que:

$$F_2(N, 2) \leq N + 1.9N^{2/3} + 1.6N^{1/3} + 1.$$

En Contexto Criptográfico

En los últimos dos años han aparecido relaciones entre funciones con buenas propiedades criptográficas, funciones que tienen resistencia frente a los denominados “ataques lineales y/o diferenciales”, y funciones Sidon. En esta sección consideramos algunas de tales conexiones.

Funciones APN

Una función $F : \mathbb{F}_{2^n} \rightarrow \mathbb{F}_{2^n}$ se llama APN (Almost Perfect Nonlinear) si para todo $a \in \mathbb{F}_{2^n}$, no cero, y todo $b \in \mathbb{F}_{2^n}$, la ecuación

$$F(x+a) + F(x) = b,$$

tiene a lo sumo dos soluciones. Equivalentemente, si el sistema de ecuaciones

$$\begin{aligned} x + y + z + t &= 0, \\ F(x) + F(y) + F(z) + F(t) &= 0, \end{aligned} \tag{5}$$

tiene soluciones únicas para cuaternas (x, y, z, t) cuyos elementos no son todos distintos (es decir, hay pares iguales) (Carlet & Picek, 2021).

Por otro lado, el grafo de F

$$\mathcal{G}_F := \{(x, F(x)) : x \in \mathbb{F}_{2^n}\},$$

es conjunto Sidon en el grupo $(\mathbb{F}_{2^n} \times \mathbb{F}_{2^n}, +)$ si y solo si la ecuación

$$(x, F(x)) + (y, F(y)) = (z, F(z)) + (t, F(t)),$$

tiene soluciones no triviales. Equivalentemente, el sistema

$$\begin{aligned} x + y &= z + t, \\ F(x) + F(y) &= F(z) + F(t), \end{aligned} \tag{6}$$

tiene únicamente soluciones no triviales. Es bastante clara la equivalencia de los sistemas (5) y (6). Claude Carlet y Sihem Mesnager escriben lo siguiente (Carlet & Mesnager, 2022, p. 2). “Existe una conexión natural entre aquellas funciones (n, n) que van de \mathbb{F}_{2^n} en sí mismo, que son funciones APN de la criptografía y los conjuntos Sidon. Por definición, una función (n, n) es APN si y solo si su grafo es un conjunto Sidon en el grupo $(\mathbb{F}_{2^n} \times \mathbb{F}_{2^n}, +)$. En (Carlet & Picek, 2021) hay otra conexión entre los exponentes de funciones APN potencias, esto es $F(x) = x^d$, sobre \mathbb{F}_{2^n} (llamados exponentes APN) y aquellos subgrupos de $\mathbb{F}_{2^n}^*$ que son al mismo tiempo conjuntos Sidon y conjuntos libres de sumas en el grupo $(\mathbb{F}_{2^n}, +)$:

Teorema 12 (Carlet & Picek, 2021, Thm 4.1, p.5-6). *Si d es un exponente APN, entonces para todo entero j el subgrupo multiplicativo de orden $\text{mcd}(d - 2^j, 2^n - 1)$ es un conjunto Sidon y libre de sumas en el grupo aditivo $(\mathbb{F}_{2^n}, +)$.*

Nota. En $(\mathbb{F}_{2^n}, +) \equiv (\mathbb{F}_2^n, +)$ (aditivamente), se tiene que S es un conjunto Sidon, respectivamente libre de sumas, si no contiene 4 elementos, respectivamente 3 elementos, distintos cuya suma sea cero.

En el último Simposio Latinoamericano sobre Informática Teórica (LATIN 2022), Claude Carlet presenta dos resultados y una conjetura que relacionan funciones APN y conjuntos Sidon “maximales” (es decir, no contenidos en otro conjunto Sidon).

Proposición 13 (Carlet, 2022, Prop. 1, p. 247) *El grafo de una función APN, $F : \mathbb{F}_2^n \rightarrow \mathbb{F}_2^n$ es un conjunto Sidon maximal en $(\mathbb{F}_2^n)^2, +$ si y solo si el conjunto*

$$\mathcal{G}_F + \mathcal{G}_F + \mathcal{G}_F = \{(x + y + z, F(x) + F(y) + F(z)) : x, y, z \in \mathbb{F}_2^n\}$$

cubre el espacio completo $(\mathbb{F}_2^n)^2$.

Proposición 14 (Carlet, 2022, Prop. 2, p. 249) *Sean n cualquier entero positivo y $F : \mathbb{F}_2^n \rightarrow \mathbb{F}_2^n$ una función APN. El grafo de F no es maximal como un conjunto Sidon si y solo si existe una función APN, $G : \mathbb{F}_2^n \rightarrow \mathbb{F}_2^n$, que puede obtenerse desde F cambiando su valor en un solo punto (es decir, que G está a distancia Hamming 1 de F).*

Conjetura 3 (Carlet, 2022, Conj 3, p. 250) *Los grafos de todas las funciones APN son conjuntos Sidon maximales.*

Espacios Sidon

Hoy hay gran interés en investigar estructuras q -análogas de estructuras combinatorias en las que vectores y subconjuntos se reemplazan por espacios vectoriales sobre un campo

finito. Ejemplos de tales estructuras q -análogas son códigos de dimensión constante y t -diseños sobre campos finitos. “Lo que comenzó como un área de investigación puramente teórica, ha encontrado importantes aplicaciones a codificación aleatoria de redes, la teoría de códigos y diseños subespacio se ha desarrollado rápidamente” (Zhang & Ge, 2022). Los espacios Sidon, que pueden mirarse como q -análogos de conjuntos de Sidon, fueron introducidos en (Bachoc, Serra, & Zémor, 2017) para estudiar ciertas propiedades multiplicativas de subespacios.

Sean \mathbb{F}_q el campo finito con q elementos y \mathbb{F}_{q^n} el campo extensión de grado n sobre \mathbb{F}_q , el cual puede verse como un espacio vectorial de dimensión n . Mediante $\mathcal{G}_q(n, k)$ se denota al conjuntos de todos los subespacios k -dimensionales de \mathbb{F}_{q^n} , un (n, k) espacio Grassmanniano sobre \mathbb{F}_q .

Definición 4 (Bachoc, Serra, & Zémor, 2017, pp. 425–426). *Un subespacio $V \in \mathcal{G}_q(n, k)$ se llama espacio Sidon si para todo $a, b, c, d \in V$, no cero,*

$$ab = cd \implies \{a\mathbb{F}_q, b\mathbb{F}_q\} = \{c\mathbb{F}_q, d\mathbb{F}_q\},$$

donde para $u \in \mathbb{F}_{q^n}$, $u\mathbb{F}_q = \{u\lambda : \lambda \in \mathbb{F}_q\}$ es el “corrimiento” cíclico de \mathbb{F}_q mediante u .

Informalmente, esto significa que un espacio Sidon es un subespacio $V \in \mathcal{G}_q(n, k)$ tal que el producto de cualquier par de elementos no cero de V tiene factorización única sobre V , excepto por un múltiplo constante de \mathbb{F}_q .

Los siguientes dos teoremas muestran la estrecha relación entre conjuntos Sidon y espacios Sidon: cada construcción de uno de estos objetos puede utilizarse para obtener una construcción del otro.

Teorema 15 (Raviv, Langton, & Tamo, 2021; Zhang & Ge, 2022, Thm 2.4, p. 783). *Sea $S = \{n_1, n_2, \dots, n_k\} \subseteq [1, m]$ un conjunto Sidon en los enteros tal que $k = m^2(1 + o_k(1))$. Entonces, para un entero $n > 2m$ y un elemento propio γ de \mathbb{F}_{q^n} (que no pertenece a algún subcampo propio de \mathbb{F}_{q^n}),*

$$V := \langle \{\gamma^{n_i} : i \in [1, k]\} \rangle,$$

es un espacio Sidon.

Teorema 16 (Raviv, Langton, & Tamo, 2021; Zhang & Ge, 2022, Thm 2.5, p. 784). *Si $V \in \mathcal{G}_q(n, k)$ es un espacio Sidon, γ es un elemento primitivo en \mathbb{F}_{q^n} y*

$$A = \{\gamma^{n_i} : i \in [1, (q^n - 1)/(q - 1)]\},$$

es un conjunto de representantes no cero de todos los subespacios con dimensión uno de V , entonces $S := \{n_i : \gamma^{n_i} \in A\}$ es un conjunto Sidon en $\mathbb{Z}_{(q^n - 1)/(q - 1)}$.

Hoy, muchos investigadores publican resultados relacionados con algoritmos y métodos para construir espacios Sidon, además de los artículos mencionados, el lector puede consultar (Niu, Xiao, & Gao, 2022; Zhang & Cao, 2022; Zhang & Tang, 2023), y las referencias en ellos. El reciente concepto de *Espacio Multi-Sidon* (Zullo, 2021, 2023) puede considerarse como una generalización de la noción presentada en esta sección. No podemos dejar de mencionar una reciente aplicación criptográfica de los conjuntos Sidon: *Cryptosistemas Sidon* (Briaud, Tillich, & Verbel, 2022; Raviv, Langton, & Tamo, 2021).

Conclusiones

Se realizó un recorrido a través de algunos contextos finitos en los que intervienen conjuntos Sidon y reglas Golomb, desde sus orígenes puramente matemáticos (1930) y sus aplicaciones (1950) hasta nuestros días en seguridad de información (criptografía).

Los contextos considerados son: conjuntos finitos de números enteros, grupos cíclicos, retículos bidimensionales de coordenadas enteras (arreglos Costas y secuencias Sonar); finalizando en contextos criptográficos (funciones APN).

Estos contextos fueron identificados por integrantes del grupo de investigación durante el desarrollo de proyectos, dirección de tesis y publicación de artículos.

Proyectos de Investigación: (Sucesiones de Sidon y conjuntos $B_h[g]$, código Colciencias 11030511450; Las funciones de Graham y Sloane problemas de cubrimiento y empaquetamiento, código Colciencias 1103516865; Construcción de conjuntos $B_h[g]$, propiedad de Midy y algunas aplicaciones, código Colciencias 1103569935047; Aplicaciones a teoría de información y comunicación de los conjuntos de Sidon y sus generalizaciones, código Colciencias 110371 250560).

La dirección de tesis doctorales ver (Caicedo Bravo, 2016; Delgado Ordoñez, 2023; Martos Ojeda, 2019); y algunas publicaciones derivadas de ellas (Caicedo, Martos, & Trujillo, 2015, 2021; Campo, Mutis, & Trujillo, 2002; Delgado, Martos, & Trujillo, 2021; Martos, Delgado, & Trujillo, 2021; Martos, Daza, & Trujillo, 2021).

Queda pendiente un recorrido similar en otros contextos tales como: combinatoria (diseños, conjuntos diferencia y configuraciones), teoría de códigos y teoría de grafos entre otros. También se deben considerar contextos que se derivan de las aplicaciones.

Agradecimientos

El autor agradece a la Universidad del Cauca, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, Departamento de Matemáticas, por el apoyo recibido durante la aprobación y desarrollo de su Año Sabático (2022-2023); y al grupo de investigación “Álgebra, Teoría de Números y Aplicaciones: ERM” por su continua colaboración durante más de veinte años de trabajo conjunto.

También agradece a los evaluadores anónimos, cuyas sugerencias mejoraron la calidad del artículo.

Conflicto de intereses

El autor certifica que no tiene conflicto de intereses con respecto al contenido de este artículo.

References

- Atkinson, M., Santoro, Urrutia. (1986). Integer sets with distinct sums and differences and carrier frequency assignments for nonlinear repeaters. *Transactions on Communications*, 34(6), 614-617.
- Babcock, W. C. (1953). Intermodulation interference in radio systems frequency of occurrence and control by channel selection. *The Bell System Technical Journal*, 32(1), 63-73.
- Bachoc, C., Serra, O., Zémor, G. (2017). An analogue of vosper’s theorem for extension fields. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 163(3), 423-452.
- Balogh, J., Füredi, Z., Roy, S. (2021). An upper bound on the size of sidon sets. *arXiv preprint arXiv:2103.15850*.
- Bloom, G. S., Golomb, S. W. (1977). Applications of numbered undirected graphs. *Proceedings of the IEEE*, 65(4), 562-570.
- Bose, R. (1942). An affine analogue of singer’s theorem. *J. Indian Math. Soc*, 6(1), 1-15.

- Briaud, P., Tillich, J.-P., Verbel, J.** (2022). A polynomial time key-recovery attack on the sidon cryptosystem. *Selected Areas in Cryptography: 28th International Conference, Virtual Event, September 29-October 1, 2021, Revised Selected Papers*, 419-438.
- Caicedo, Y., Martos, C. A., Trujillo, C. A.** (2015). g - Golomb rulers. *Revista Integración*, 33(2), 161-172.
- Caicedo, Y., Martos, C. A., Trujillo, C. A.** (2021). Construcción de conjuntos bh en varias dimensiones. *Ciencia en Desarrollo*, 12(2), 73-81.
- Caicedo Bravo, N. Y.** (2016). Conjuntos de sid'on en dimensión dos. *Tesis de Doctorado, Universidad del Valle*.
- Campo, L., Mutis,W., Trujillo, C.** (2002). Cotas superiores para conjuntos de sidon finitos. *Unicauca Ciencia*, 7, 95-108.
- Carlet, C.** (2022). On apn functions whose graphs are maximal sidon sets. *Latin American Symposium on Theoretical Informatics*, 243-254.
- Carlet, C., Mesnager, S.** (2022). On those multiplicative subgroups of F_{2^n} which are sidon sets and/or sum-free sets. *Journal of Algebraic Combinatorics*, 55(1), 43-59.
- Carlet, C., Picek, S.** (2021). On the exponents of APN power functions and sidon sets, sumfree sets, and dickson polynomials. *Advances in Mathematics of Communications*, 1-19.
- Filleruelo, J.** (2010). Sidon sets in N_d . *Journal of Combinatorial Theory, Series A*, 117(7), 857-871.
- Colbourn, C., Dinitz, J.** (2007). *Handbook of combinatorial designs*. CRC press Boca Raton, FL.
- Costas, J. P.** (1975). Medium constraints on sonar design and performance. *IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS*, 11(5), 973-973.
- Costas, J. P.** (1984). A study of a class of detection waveforms having nearly ideal range— doppler ambiguity properties. *Proceedings of the IEEE*, 72(8), 996-1009.
- Delgado, L. M. D., Martos, C. A., Trujillo, C. A.** (2021). New constructions of extended sonar sequences from sidon sets. *IEEE Access*, 10, 3343-3350.
- Delgado Ordoñez, L. M.** (2023). Reglas golomb generalizadas y la teoría de ramsey. *Tesis de Doctorado, Departamento de Matemáticas, Universidad del Cauca*.
- Dimitromanolakis, A.** (2002). Analysis of the golomb ruler and the sidon set problems, and determination of large, near-optimal golomb rulers. *Master's Thesis, Department of Electronic and Computer Engineering, Technical University of Crete*.
- Erdos, P.** (1995). Some of my favourite problems in number theory, combinatorics, and geometry. *Resenhas do Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo*, 2(2), 165-186.
- Erdős, P.** (1944). On a problem of sidon in additive number theory and on some related problems addendum. *Journal of The London Mathematical Society-second Series* 19, 208-208.
- Erdős, P.** (1992). Some of my forgotten problems in number theory. *Hardy-Ramanujan Journal*, 15, 34-50.
- Erdős, P.** (1994). Some problems in number theory, combinatorics and combinatorial geometry. *Mathematica Pannonica*, 5, 261-269.
- Erdős, P., Graham, R., Ruzsa, I. Z., Taylor, H.** (1992). Bounds for arrays of dots with distinct slopes or lengths. *Combinatorica*, 12(1), 39-44.
- Erdős, P., Turán, P.** (1941). On a problem of sidon in additive number theory, and on some related problems. *Journal of The London Mathematical Society-second Series*, 16, 212-215.
- Etzion, T.** (2009). Problems on two-dimensional synchronization patterns. *Coding and Cryptology: Second International Workshop, IWCC 2009, Zhangjiajie, China, June 1-5, 2009. Proceedings* 2, 52-62.
- Gagliardi, R., Robbins, J., Taylor, H.** (1987). Acquisition sequences in ppm communications (corresp.) *IEEE Transactions on Information Theory*, 33(5), 738-744.
- Gardner, M.** (1972). Graceful graphs of solomon golomb, or how to number a graph parsimoniously. *Scientific American*, 226(3), 108.
- Gilbert, E. N.** (1965). Latin squares which contain no repeated digrams. *Siam Review*, 7(2), 189-198.
- Golomb, S., Taylor, H.** (1982). Two-dimensional synchronization patterns for minimum ambiguity. *IEEE Transactions on Information Theory*, 28(4), 600-604.
- Golomb, S. W.** (1972). How to number a graph. In *Graph theory and computing* (pp. 23-37). Elsevier.
- Golomb, S.W.** (1984). Algebraic constructions for costas arrays. *Journal of Combinatorial Theory, Series A*, 37(1), 13-21.
- Halberstam, H., Roth, K. F.** (1983). *Sequences*. Springer Science & Business Media.

- Linström, B.** (1969). An inequality for B2-sequences. *Journal of Combinatorial Theory*, 6(2), 211-212.
- Martos, C. A., Delgado, L. M., Trujillo, C. A.** (2021). Bh sets as a generalization of golomb rulers. *IEEE Access*, 9, 118042-118050.
- Martos, C. A. M., Daza, D. F., Trujillo, C. A.** (2021). Near-optimal g-golomb rulers. *IEEE Access*, 9, 65482-65489.
- Martos Ojeda, C. A.** (2015). Reglas g- golomb. Tesis de Maestría, Departamento de Matemáticas, Universidad del Cauca.
- Martos Ojeda, C. A.** (2019). Conjuntos Bh y reglas g- golomb cortas. *Tesis de Doctorado, Departamento de Matemáticas, Universidad del Valle.*
- Moreno, O., Games, R., Taylor, H.** (1991). New constructions and bounds on sonar sequences. *Proceedings. 1991 IEEE International Symposium on Information Theory*, 283-283.
- Moreno, O., Games, R. A., Taylor, H.** (1993). Sonar sequences from costas arrays and the best known sonar sequences with up to 100 symbols. *IEEE Transactions on Information theory*, 39(6), 1985-1987.
- Niu, M., Xiao, J., Gao, Y.** (2022). New constructions of large cyclic subspace codes via sidon spaces. *Advances in Mathematics of Communications*, 1-15.
- O'Bryant, K.** (2022). On the size of finite sidon sets. *arXiv preprint arXiv:2207.07800*.
- Raviv, N., Langton, B., Tamo, I.** (2021). Multivariate public key cryptosystem from sidon spaces. *Public-Key Cryptography-PKC 2021: 24th IACR International Conference on Practice and Theory of Public Key Cryptography, Virtual Event, May 10-13, 2021, Proceedings, Part I*, 242-265.
- Robinson, J.** (1985). Golomb rectangles. *IEEE transactions on information theory*, 31(6), 781-787.
- Robinson, J. P.** (1997). Golomb rectangles as folded rulers. *IEEE Transactions on Information Theory*, 43(1), 290-293.
- Ruzsa, I. Z.** (1993). Solving a linear equation in a set of integers i. *Acta arithmetica*, 65(3), 259-282.
- Shao, Z., Zhou, J., Liang, M., Lang, F., Xu, X.** (2013). Some new golomb rectangles. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 10(1), 66-68.
- Shearer, J. B.** (1995). Some new optimum golomb rectangles. *The electronic journal of combinatorics*, R12.
- Shearer, J. B.** (2004). Symmetric golomb squares. *IEEE transactions on information theory*, 50(8), 1846-1847.
- Sidon, S.** (1932). Ein satz über trigonometrische polynome und seine anwendung in der theorie der fourier-reihen. *Mathematische Annalen*, 106, 536-539.
- Singer, J.** (1938). A theorem in finite projective geometry and some applications to number theory. *Transactions of the American Mathematical Society*, 43(3), 377-385.
- Trujillo Solarte, C. A.** (1998). Sucesiones de sidon. *Tesis de Doctorado, Facultad de Informática, Universidad Politecnica de Madrid.*
- Zhang, H., Cao, X.** (2022). Constructions of sidon spaces and cyclic subspace codes. *Frontiers of Mathematics in China*, 17(2), 275-288.
- Zhang, H., Tang, C.** (2023). Constructions of large cyclic constant dimension codes via sidon spaces. *Designs, Codes and Cryptography*, 91(1), 29-44.
- Zhang, T., Ge, G.** (2022). New constructions of sidon spaces. *Journal of Algebraic Combinatorics*, 1-14.
- Zullo, F.** (2021). Multi-sidon spaces over finite fields. *arXiv preprint arXiv:2112.08781*.
- Zullo, F.** (2023). Multi-orbit cyclic subspace codes and linear sets. *Finite Fields and Their Applications*, 87, 102-153.

Original article

On the Kronecker problem and partially ordered sets with involution

Sobre el problema de Kronecker y conjuntos parcialmente ordenados con involución

Ivon Dorado¹, Gonzalo Medina^{2,*}

¹Departamento de Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá

²Departamento de Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

Abstract

We consider the classical Kronecker problem on two linear operators between two finite-dimensional vector spaces and we provide a new short solution using a connection between the matrix version of the Kronecker problem and the matrix problem associated to a partially ordered set with involution.

Keywords: Kronecker problem; Partially ordered set with involution; Indecomposable representation; Matrix problem.

Resumen

Consideramos el clásico problema de Kronecker sobre dos operadores lineales entre dos espacios vectoriales de dimensión finita y presentamos una nueva solución corta usando una conexión entre la versión matricial del problema de Kronecker y el problema matricial asociado a un conjunto ordenado con involución.

Palabras clave: Problema de Kronecker; Conjunto parcialmente ordenado con involución; Representación indescomponible; Problema matricial.

Introduction

The Kronecker problem consists in classifying all pairs of linear transformations between two finite-dimensional vector spaces over a field k . A partial solution was given by Weierstrass for the so called now regular case (**Weierstrass**, 1868), and a complete solution, including both the regular and the singular (non-regular) cases, was given by Kronecker (**Kronecker**, 1890). Over the past decades, numerous solutions have been presented using different approaches: using techniques from linear algebra: (**De Vries**, 1984; **Dieudonné**, 1946; **Gabriel & Roiter**, 1992); using cohomological techniques: (**Benson**, 1995); using categorical and homological methods: (**Auslander et al.**, 1997; **Ringel**, 1984). More recently, Zavadskij used a matrix approach to solve the problem and even provided a generalization to the semilinear case, as well as some applications to the representation theory of partially ordered sets with additional structure (**Zavadskij**, 2007); in **Dmytryshyn et al.** (2016), the authors provide a generalization to vector spaces and their quotient space and subspace. It is also worth mentioning the applications of the Kronecker problem to systems of linear differential equations (**Gantmacher**, 1959).

Here we propose yet another linear algebra approach to provide a solution to the classification of pairs of linear operators between two vector spaces. Our method is based on

Citation: Dorado I, Medina G. On the Kronecker problem and partially ordered sets with involution. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185):1045-1060, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1975>

Editor: Carolina Benedetti Velásquez

***Corresponding autor:**

Gonzalo Medina;
gmedinaar@unal.edu.co

Received: August 19, 2023

Accepted: December 9, 2023

Published on line: December 18, 2023



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

the fact that the matrix version of the Kronecker problem coincides with the corresponding matrix problem for a partially ordered set with involution consisting of two incomparable points. We hope our approach will help to achieve a better understanding of the categories of representations involved.

The structure of this paper is the following: in Section 1 we give some preliminaries about the Kronecker problem and the category of representations of a partially ordered set with involution; we establish the correspondence between the matrix problem for the partially ordered set with involution consisting of two incomparable points and the matrix version of the Kronecker problem. We also prove that the category of representations of a partially ordered set with involution is a Krull-Schmidt category which is not abelian, in general. In Section 2 we obtain the solution to the Kronecker problem by solving a matrix problem corresponding to certain partially ordered set with involution.

The authors are grateful to the referee for their valuable remarks and suggestions. Following their recommendation, we intend to use the reduction procedure to study some other tame problems of Gelfand-type.

1 The Kronecker problem and ordered sets with involution

1.1 The Kronecker problem

Definition 1.1. Given a field k , we will consider quadruples $U = (U_1, U_2, \phi_\alpha, \phi_\beta)$, where U_1 and U_2 are vector spaces of finite dimension over k , and $\phi_\alpha: U_1 \rightarrow U_2$ and $\phi_\beta: U_1 \rightarrow U_2$ are linear transformations. For any pair of quadruples $U = (U_1, U_2, \phi_\alpha, \phi_\beta)$ and $V = (V_1, V_2, \psi_\alpha, \psi_\beta)$, their *direct sum* is the quadruple given by

$$U \oplus V = (U_1 \oplus V_1, U_2 \oplus V_2, \phi_\alpha \oplus \psi_\alpha, \phi_\beta \oplus \psi_\beta).$$

We say that two quadruples $U = (U_1, U_2, \phi_\alpha, \phi_\beta)$ and $V = (V_1, V_2, \psi_\alpha, \psi_\beta)$ are *isomorphic* if there exists a pair of k -linear isomorphisms $f_1: U_1 \rightarrow V_1$ and $f_2: U_2 \rightarrow V_2$ such that the following diagrams commute:

$$\begin{array}{ccc} U_1 & \xrightarrow{\phi_\alpha} & U_2 \\ f_1 \downarrow & & \downarrow f_2 \\ V_1 & \xrightarrow{\psi_\alpha} & V_2 \end{array} \quad \text{and} \quad \begin{array}{ccc} U_1 & \xrightarrow{\phi_\beta} & U_2 \\ f_1 \downarrow & & \downarrow f_2 \\ V_1 & \xrightarrow{\psi_\beta} & V_2 \end{array},$$

i.e., f_1 and f_2 are bijective k -linear transformations such that

$$\psi_\alpha \circ f_1 = f_2 \circ \phi_\alpha \quad \text{and} \quad \psi_\beta \circ f_1 = f_2 \circ \phi_\beta.$$

In this case, we write $U \simeq V$. We say that a nonzero quadruple U is *indecomposable* if $U \simeq V \oplus W$ implies $V = 0$ or $W = 0$; otherwise, we call U *decomposable*.

The Kronecker problem consists in obtaining the classification of all the indecomposable quadruples, up to isomorphism.

Since we are considering finite-dimensional vector spaces, we can reformulate the Kronecker problem using the matrix language: a quadruple $U = (U_1, U_2, \phi_\alpha, \phi_\beta)$ can be seen, by fixing ordered bases for U_1 and U_2 , as a pair of matrices (A, B) of the same size $m \times n$ ($m = \dim_k U_2$ and $n = \dim_k U_1$); such a pair will be called a *matrix presentation* for the Kronecker problem. Two matrix presentations (A', B') and (A, B) are isomorphic if there exist

non singular matrices X , of size $m \times m$, and Y , of size $n \times n$, (which correspond to changing the chosen bases for U_1 and U_2) such that

$$A' = XAY^{-1} \quad \text{and} \quad B' = XBY^{-1}.$$

From this perspective, the Kronecker problem consists in obtaining the classification of the indecomposable matrix presentations (A, B) with respect to transformations of *simultaneous equivalence*; i.e., transformations having the following form:

$$(A, B) \longmapsto (XAY^{-1}, XAY^{-1}),$$

where $X \in GL_m(k)$ and $Y \in GL_n(k)$ (here, for a positive integer q , we denote by $GL_q(k)$ the general linear group of non singular $q \times q$ matrices of elements of k).

1.2 Partially ordered sets with involution and their representations

Definition 1.2. A *partially ordered set with involution* is a triple $(\mathcal{P}, \preceq, \Theta)$ where (\mathcal{P}, \preceq) is a partially ordered set and Θ is the set of equivalence classes associated with an equivalence relation \sim on \mathcal{P} , such that each equivalence class has at most two elements (an equivalent way to define this type of ordered sets is by considering triples $(\mathcal{P}, \preceq, *)$ where (\mathcal{P}, \preceq) is a partially ordered set and $*$ is an *involution on \mathcal{P}* ; that is, a function $*$: $\mathcal{P} \rightarrow \mathcal{P}$ such that $*^2 = 1_{\mathcal{P}}$). Thus, for every $x \in \mathcal{P}$, its equivalence class $[x]$ is either a singleton $[x] = \{x\}$ or has two elements $[x] = \{x, x_1\}$, where $x \sim x_1$. The cardinality of the class $[x]$ is denoted as $r(x)$. If $r(x) = 1$, we say that x is a *small point* and represent it as \circ in the Hasse diagram; if $r(x) = 2$, we say that x is a *large point* and represent it as \bullet in the Hasse diagram.

Remark 1. It is common to refer to the ordered set with involution $(\mathcal{P}, \preceq, \Theta)$ simply as (\mathcal{P}, Θ) . The equivalence class of a large point $[x] = \{x, x_1\}$ is often identified with the ordered pair (x, x_1) , and the equivalence class of a small point $[y] = \{y\}$ is often identified with the element y . If we remove the restriction on the number of elements in the equivalence classes, we obtain *ordered sets with an equivalence relation*, which have been studied in **Bondarenko** and **Zavadskij** (1991) and **Zavadskij** (1991). If every equivalence class is a singleton (i.e., if $* = 1_{\mathcal{P}}$), the ordered set with involution $(\mathcal{P}, \preceq, \Theta)$ is simply (isomorphic to) the ordinary partially ordered set (\mathcal{P}, \preceq) .

Let's now define the category of representations of an ordered set with involution over a field k . For our purposes, it is sufficient to use the treatment in **Zavadskij** (1991); for a more comprehensive description of the category, see **Cifuentes** (2021, Sections 1.2 and 1.3).

If U_0 is a finite-dimensional k -vector space, for a large point $x \in \mathcal{P}$ with $[x] = (x, x_1)$, we denote by $U_0^{r(x)}$ the direct sum $U_0 \oplus U_0$ of two copies of U_0 , where the first summand is indexed by x and the second summand is indexed by x_1 :

$$U_0^{r(x)} = U_{0,x} \oplus U_{0,x_1}.$$

If x is a small point, we let $U_0^{r(x)} = U_0$.

For a point $w \in \mathcal{P}$, we denote

$$\pi_w : U_0^{r(w)} \rightarrow U_{0,w}$$

the canonical projection onto the summand indexed by w , and we call

$$\iota_w : U_{0,w} \rightarrow U_0^{r(w)}$$

the canonical injection of the summand indexed by w . For $v, w \in \mathcal{P}$, the composite

$$U_0^{r(v)} \xrightarrow{\pi_v} U_{0,v} = U_0 = U_{0,w} \xrightarrow{l_w} U_0^{r(w)}$$

will be denoted $\varepsilon_{v,w}$. Therefore, we have

$$\varepsilon_{v,w} = l_w \circ \pi_v : U_0^{r(v)} \rightarrow U_0^{r(w)}.$$

Definition 1.3. Given a field k and a partially ordered set with involution (\mathcal{P}, Θ) , a collection

$$U = (U_0, U_{[x]})_{[x] \in \Theta}$$

is called a *representation of (\mathcal{P}, Θ) over k* if it satisfies the following conditions:

1. U_0 is a finite-dimensional k -vector space.
2. $U_{[x]} \subseteq U_0^{r(x)}$, for all classes $[x] \in \Theta$.
3. $\varepsilon_{x,y}(U_{[x]}) \subseteq U_{[y]}$, if $x \prec y$ in \mathcal{P} .

If x is a small point, we write simply U_x instead of $U_{[x]}$. If x is a big point with $[x] = (x, x_1)$, we can also write $U_{(x,x_1)}$ as an alternative to $U_{[x]}$.

Definition 1.4. For a representation over k

$$U = (U_0, U_{[x]})_{[x] \in \Theta}$$

of the poset with involution (\mathcal{P}, Θ) , its *dimension* is the vector

$$d = \underline{\dim}U = (d_0, d_{[x]})_{[x] \in \Theta},$$

where

$$d_0 = \dim U_0 \quad \text{and} \\ d_{[w]} = \dim \left(U_{[w]} \Big/ \sum_{\substack{x \prec y \\ y \in [w]}} \varepsilon_{xy}(U_{[x]}) \right),$$

A *morphism $f: U \rightarrow V$* between two representations $U = (U_0, U_{[x]})_{[x] \in \Theta}$ and $V = (V_0, V_{[x]})_{[x] \in \Theta}$ of (\mathcal{P}, Θ) over k is a k -linear transformation $f: U_0 \rightarrow V_0$ such that

$$f^{|C|}(U_C) \subseteq V_C, \text{ for all } C \in \Theta,$$

where $f^{|C|}: U_0^{|C|} \rightarrow V_0^{|C|}$ is the map induced by f in a natural way ($|C|$ denotes the cardinality of the set C). A morphism $f: U \rightarrow V$ is an *isomorphism* if $f: U_0 \rightarrow V_0$ is an isomorphism of vector spaces such that $f^{|C|}(U_C) = V_C$ for every $C \in \Theta$. If there exists an isomorphism between U and V , we write $U \simeq V$.

It is easy to see that, with the objects and morphisms defined above, we obtain a category, which we denote as $\text{rep}(\mathcal{P}, \Theta, k)$, and which we call the *category of representations of (\mathcal{P}, Θ) over k* .

Definition 1.5. If U and V are representations of (\mathcal{P}, Θ) over k , the set

$$\text{Hom}(U, V) = \{f \mid f: U \rightarrow V \text{ is morphism}\}$$

of morphisms from U to V with the usual operations of addition and scalar multiplication by elements of k has the structure of a k -vector space; it is called the *homomorphism space from U to V* . Moreover, the composition of morphisms is bilinear. In particular, the set

$$\text{End}(U) = \text{Hom}(U, U)$$

with the operations of addition, scalar multiplication by elements of k , and composition conforms the *endomorphism algebra of U* . This algebra is a subalgebra of the algebra $\text{End}_k(U_0)$ of k -linear transformations from U_0 to U_0 .

The *direct sum* of two representations $U = (U_0, U_{[x]})_{[x] \in \Theta}$ and $V = (V_0, V_{[x]})_{[x] \in \Theta}$ in the category $\text{rep}(\mathcal{P}, \Theta, k)$ is the representation $U \oplus V$ defined as follows:

$$U \oplus V = (U_{[x]} \oplus V_{[x]})_{[x] \in \Theta}.$$

A representation W is *indecomposable* if $W \simeq U \oplus V$ implies $U = 0$ or $V = 0$; otherwise, W is called *decomposable*.

Now we summarize some of the properties of the category $\text{rep}(\mathcal{P}, \Theta, k)$:

Proposition 1.6. *Given a field k and a partially ordered set with involution (\mathcal{P}, Θ) , the following holds:*

- (a) *The category $\text{rep}(\mathcal{P}, \Theta, k)$ is additive.*
- (b) *$\text{rep}(\mathcal{P}, \Theta, k)$ is a Krull-Schmidt category.*
- (c) *The category $\text{rep}(\mathcal{P}, \Theta, k)$ is, in general, **not** abelian.*

Proof. (a) The zero object is the *zero representation* 0 in which all vector spaces are 0 (for small points) or $0 \oplus 0$ (for big points). The direct sum, as defined, can be extended inductively to any finite number of objects, and it can be easily shown to be their biproduct.

(b) Thanks to (a), the category is additive. An inductive argument shows that every non zero object either is indecomposable or decomposes in a finite direct sum of indecomposable objects. It only remains to establish that each indecomposable has a local endomorphism ring. For this, let U be a representation of (\mathcal{P}, Θ) . Since $\text{End}U$ is a finite-dimensional k -algebra, it is an Artinian ring and thus, a semiperfect ring. Then, there exists a set $\{e_1, \dots, e_n\} \subseteq \text{End}U$ of orthogonal idempotents such that $\sum_{i=1}^n e_i = 1$ and such that $e_i \text{End}U e_i$ is local, for all $i \in \{1, \dots, n\}$. For an indecomposable U , necessarily $n = 1$ and $\text{End}U$ is a local ring.

(c) Let's consider the following partially ordered set with involution, which we will call *dyad with involution*:

$$\mathcal{D} = \left\{ \begin{array}{cc} \bullet & \bullet \\ a & b \end{array} \right\},$$

that is, \mathcal{D} consists of a pair of incomparable points which are equivalent ($\Theta = \{(a, b)\}$). Let's consider the following representations for \mathcal{D} over an arbitrary field k :

$$U = (U_0, U_{(a,b)}) = (k, 0 \oplus k) \quad \text{and} \quad U' = (U'_0, U'_{(a,b)}) = (k, 0 \oplus 0).$$

The identity $1_k: k \rightarrow k$ is a morphism from U' to U which is a monomorphism: if we consider morphisms $g, h: U' \rightarrow U$ such that $1_k \circ g = 1_k \circ h$, then it is immediate that $g = h$. Analogously one can also see that $1_k: k \rightarrow k$ is an epimorphism. On the other hand, it is not an isomorphism, since $1_k^2(0 \oplus 0) \neq 0 \oplus k$. Our result follows because $\text{rep}(\mathcal{D}, \Theta, k)$ is not a balanced category (See **Pareigis**, 1970, Lemma 2(c), p. 165). \square

1.3 Matrix problems

Representations of partially ordered sets with an equivalence relation were introduced by Nazarova and Roiter in matrix language (**Nazarova & Roiter**, 1973). Here we will follow the ideas of **Zavadskij** (1991) for the special case of partially ordered sets with involution.

A matrix presentation of a partially ordered set with involution (\mathcal{P}, Θ) over the field k is a matrix M over k divided into vertical blocks M_x , indexed by the elements $x \in \mathcal{P}$, such that $x \sim y$ implies that the number of columns of M_x equals the number of columns of M_y .

Two matrix presentations are called isomorphic if one of them can be turned into the other by applying a finite sequence of the following *admissible transformations*:

- AT1. Elementary row transformations of the whole matrix M .
- AT2. Simultaneous transformations of columns of the matrices M_x and M_y , if $x \sim y$.
- AT3. Additions of columns of M_x to columns of M_y , if $x \prec y$.

For the dyad with involution

$$\mathcal{D} = \left\{ \begin{array}{cc} \bullet & \bullet \\ a & b \end{array} \right\}$$

the problem then consists in finding canonical forms for matrices of the form

$$M = \begin{array}{|c|c|} \hline A & B \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array},$$

where the number of columns of the blocks A and B are equal, under admissible transformations of type AT1 and AT2 (the solid dots below both blocks are used to indicate that the corresponding points are equivalent as well as a reminder that column transformations inside those blocks must be performed simultaneously).

Let's reformulate these ideas in a more precise way, following **Gabriel and Roiter (1992)**.

Definition 1.7. Given a field k , a *matrix problem of size $r \times s$* is a pair (G, \mathfrak{M}) formed by an *underlying set* $\mathfrak{M} \subseteq k^{r \times s}$ and a group $G \subseteq GL_r(k) \times GL_s(k)$ acting on \mathfrak{M} by $(X, Y)M = XMY^{-1}$. The matrix problem is *separated* if $G = G_1 \times G_2$, where $G_1 \subseteq GL_r(k)$ and $G_2 \subseteq GL_s(k)$. The matrix problem (G, \mathfrak{M}) is *linear* if G is the group D^i of invertible elements of a subalgebra $D \subseteq k^{r \times r} \times k^{s \times s}$. Solving a matrix problem (G, \mathfrak{M}) consists in classifying the orbits of \mathfrak{M} under the action of G .

In other words, a matrix problem of size $r \times s$ is a pair (\mathfrak{M}, G) consisting of a set \mathfrak{M} of matrices of size $r \times s$, together with a group G , which corresponds to the admissible row and column transformations of the matrices of \mathfrak{M} which determines an equivalence relation. The goal is then to find a *canonical form*, i.e., to determine a set of canonical matrices such that each G -equivalence class contains exactly one canonical matrix.

In particular, for the dyad with involution

$$\mathcal{D} = \left\{ \begin{array}{cc} \bullet & \bullet \\ a & b \end{array} \right\}$$

we have the separated linear matrix problem (G, \mathfrak{M}) with $\mathfrak{M} = k^{m \times 2n}$ and

$$D = \left\{ (X, Z) \mid X \in k^{m \times m} \text{ and } Z = \begin{bmatrix} Y & 0 \\ 0 & Y \end{bmatrix}, \text{ with } Y \in k^{n \times n} \right\}.$$

In this case, $G = D^i$ is

$$D^i = \left\{ (X, Z) \mid X \in GL_m(k) \text{ and } Z = \begin{bmatrix} Y & 0 \\ 0 & Y \end{bmatrix}, \text{ with } Y \in GL_n(k) \right\}.$$

A matrix $M \in \mathfrak{M}$ can be interpreted as a block matrix $M = \begin{array}{|c|c|} \hline A & B \\ \hline \end{array}$ with $A, B \in k^{n \times n}$. With this interpretation, the action of G on \mathfrak{M} is given by

$$(X, Y)M = XMZ^{-1} = X \begin{array}{|c|c|} \hline A & B \\ \hline \end{array} \begin{bmatrix} Y^{-1} & 0 \\ 0 & Y^{-1} \end{bmatrix} = \begin{array}{|c|c|} \hline XAY^{-1} & XBY^{-1} \\ \hline \end{array}.$$

But this is nothing more than reducing pairs of matrices of the same size by simultaneous equivalence, as explained in Section 1.1. In other words, the matrix problem associated to the dyad with involution is essentially the same as the matrix version of the Kronecker problem.

Remark 2. From the categorical point of view, quadruples $U = (U_1, U_2, \varphi_\alpha, \varphi_\beta)$ over a field k correspond to representations of the well known *Kronecker quiver*, see, for example, **Auslander et al.** (1997)

$$\mathcal{K} = \left\{ 1 \begin{array}{c} \xrightarrow{\alpha} \\ \xleftarrow{\beta} \end{array} 2 \right\}.$$

Morphisms between such representations can be defined by dropping the condition of bijectivity from the definition of isomorphic quadruples (See Definition 1.1). We have then the category $\text{rep}(\mathcal{K}, k)$, of representations of \mathcal{K} over k . Even though the matrix problems for the dyad with involution and for the Kronecker problem are the same, the categories $\text{rep}(\mathcal{D}, \Theta, k)$ and $\text{rep}(\mathcal{K}, k)$ are **not** equivalent. Since the category $\text{rep}(\mathcal{K}, k)$ is abelian (See, for example, **Schiffler** (2014)), having an equivalence between $\text{rep}(\mathcal{K}, k)$ and $\text{rep}(\mathcal{D}, \Theta, k)$, would imply that the latter would also be an abelian category (See **Schubert**, 1972, Proposition 16.2.4, p. 169), which contradicts Proposition 1.6(c).

2 The solution to the Kronecker problem

In this section we will solve the matrix problem corresponding to the dyad with involution. According to Section 1.3, this is tantamount to obtaining the classification of all indecomposable presentations of the Kronecker problem. To describe the indecomposable representations of the dyad with involution, we will follow a similar idea to the one given in **Zavadskij** (2007, Theorem 1), which is actually a variation of the “reduction” mechanism used in **Medina and Zavadskij** (2004, Theorem 1) to solve the Four Subspace Problem. First, let us set some notation we will use in the matrix forms.

For an integer $n \geq 1$, the matrices $I_n^\uparrow, I_n^\downarrow$ are the $(n + 1) \times n$ matrices obtained by adjoining a row of zeroes above, below, the identity matrix I_n ; i.e.,

$$I_n^\uparrow = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{(n+1) \times n} \quad \text{and} \quad I_n^\downarrow = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{(n+1) \times n}.$$

Analogously, the matrices $I_n^\rightarrow, I_n^\leftarrow$ are the $n \times (n + 1)$ matrices obtained by adjoining a column of zeroes to the right, to the left, of the identity matrix I_n ; i.e.,

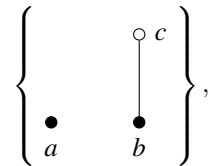
$$I_n^\rightarrow = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}_{n \times (n+1)} \quad \text{and} \quad I_n^\leftarrow = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{n \times (n+1)}.$$

For $n = 0$, the matrices I_0^\uparrow and I_0^\downarrow are equal and they are “formal” matrices having one row and zero columns, and representing the linear operator $0 \rightarrow k$. The matrices I_0^\rightarrow and I_0^\leftarrow are also equal and they are “formal” matrices having zero rows and one column, and representing the linear operator $k \rightarrow 0$.

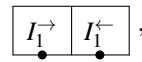
By $F_n(p^s(t))$, for $n \geq 1$, we denote the Frobenius cell of order n corresponding to the minimal polynomial $p^s(t)$, where $p(t)$ is monic and irreducible over k ; notice that, in particular, $n = s \cdot \deg p(t)$.

For $n \geq 1$, we denote by $J_n^-(0)$ the Jordan block or order n with eigenvalue 0 and entries 1 below the principal diagonal.

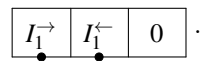
In the matrix presentations we do not draw a block M_x , if all its entries are null. For example, for the partially ordered set with involution



we draw



instead of the matrix presentation



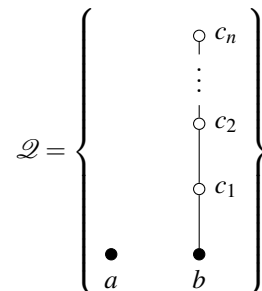
Remark 3. Throughout this section, one could replace all occurrences of $J_n^-(0)$ with $J_n^+(0)$ (the Jordan block or order n with eigenvalue 0 and entries 1 above the principal diagonal). In both representations of type I, one can substitute $J_n^-(0)$ with $J_n^+(0)$ and the resulting matrix forms are equivalent to the original ones. For type V, if one uses $J_n^+(0)$ instead of $J_n^-(0)$, then one must at the same time substitute the rightmost column $[1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ with $[0 \ 0 \ \dots \ 1]^T$.

Now, we present a lemma that will be used in the proof of the main result.

Lemma 2.1. *If U is an indecomposable representation of a partially ordered set with involution \mathcal{P} such that $U_l = U_0$ for some small point $l \in \mathcal{P}$, then the restriction $U' = (U_0, U_i)_{i \in \mathcal{P} \setminus \{l\}}$ to the ordered subset $\mathcal{P} \setminus \{l\}$ is also indecomposable.*

Proof. If we had U' decomposing into a nontrivial direct sum $U' = V \oplus W$, then immediately U would also be decomposable since $U_l = U_0 = V_0 \oplus W_0$. □

Theorem 2.2. *All the indecomposable representations of the following partially ordered set with involution*



are exhausted, up to isomorphism, and up to duality, by the following six types of matrix presentations:

$$\begin{aligned}
 &0 \quad \begin{array}{|c|c|} \hline a & b \\ \hline I_n & F_n \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array}, \text{ where } F_n = F_n(p^s(t)) \text{ and } p(t) \neq t. \\
 &\qquad\qquad\qquad n \geq 1 \\
 \\
 &I \quad \begin{array}{|c|c|} \hline a & b \\ \hline I_n & J_n^-(0) \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array} \quad \text{and} \quad \begin{array}{|c|c|} \hline a & b \\ \hline J_n^-(0) & I_n \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array}. \\
 &\qquad\qquad\qquad n \geq 1 \qquad\qquad\qquad n \geq 1 \\
 \\
 &II \quad \begin{array}{|c|c|} \hline a & b \\ \hline I_n^{\rightarrow} & I_n^{\leftarrow} \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array}. \\
 &\qquad\qquad\qquad n \geq 0 \\
 \\
 &III \quad \begin{array}{|c|c|} \hline a & b \\ \hline I_n^{\downarrow} & I_n^{\uparrow} \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array}. \\
 &\qquad\qquad\qquad n \geq 0 \\
 \\
 &IV \quad \begin{array}{|c|c|c|} \hline a & b & c_i \\ \hline I_n^{\downarrow} & I_n^{\uparrow} & \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{array} \\ \hline \bullet & \bullet & \\ \hline \end{array}, \text{ for } i \in \{1, \dots, n\}. \\
 &\qquad\qquad\qquad n \geq 0 \\
 \\
 &V \quad \begin{array}{|c|c|c|} \hline a & b & c_i \\ \hline I_n & J_n^-(0) & \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{array} \\ \hline \bullet & \bullet & \\ \hline \end{array}, \text{ for } i \in \{1, \dots, n\}. \\
 &\qquad\qquad\qquad n \geq 1
 \end{aligned}$$

Proof. Let $U = (U_0, U_{(a,b)}, U_{c_1}, \dots, U_{c_n})$ be an indecomposable representation for \mathcal{Q} . We will consider two cases:

(a) There are no points c_i . In this situation we have

$$\mathcal{Q} = \mathcal{D} = \left\{ \begin{array}{cc} \bullet & \bullet \\ a & b \end{array} \right\}$$

and a matrix presentation for U will have the form

$$M = \begin{array}{|c|c|} \hline A & B \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array}.$$

We will examine two subcases:

Subcase A: the block A is non singular. By applying appropriate admissible operations, we can reduce the block A to an identity block and transform M into the following form:

$$\begin{array}{|c|c|} \hline I_n & B' \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array}.$$

By examining which admissible operations can be applied without altering the identity block, we observe that B' reduces by similarity, and the indecomposability of U

implies that B' can be transformed into the form $F_n = F_n(p^s(t))$ of a unique Frobenius block, resulting in the following form:

$$\begin{array}{|c|c|} \hline I_n & F_n \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array}, \quad n \geq 1.$$

The symmetric situation, in which the block B of the presentation M_U is non-singular, is treated similarly. In this case, we obtain the form:

$$\begin{array}{|c|c|} \hline F_n & I_n \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array}, \quad n \geq 1.$$

Now, if $\det(F_n(p^s(t))) \neq 0$, then

$$\begin{array}{|c|c|} \hline F_n & I_n \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array} \simeq \begin{array}{|c|c|} \hline I_n & F'_n \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array},$$

for some non-singular Frobenius block F'_n . Otherwise (i.e., if $\det(F_n(p^s(t))) = 0$), we obtain

$$\begin{array}{|c|c|} \hline F_n & I_n \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array} \simeq \begin{array}{|c|c|} \hline J_n^-(0) & I_n \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array}, \quad n \geq 1,$$

and thus, M_U is of type 0 or I.

Subcase B: one of the blocks A or B is singular. Since we are working up to duality and in the case being considered we can also assume that we are working up to permutations of the points, we can take the block B as being singular by rows. We proceed by induction on $d_0 = \dim U_0$. If $d_0 = 1$, then the dimension vector of U is of the form $(1, d_{(a,b)})$, with $d_{(a,b)} \in \{0, 1, 2\}$. If $d_{(a,b)} = 0$, then M_U is a “formal” matrix with 1 row and 0 columns, corresponding to type III, with $n = 0$. If $d_{(a,b)} = 1$, then $M_U \simeq \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 0 \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array}$, corresponding to type I, with $n = 1$. The case $d_{(a,b)} = 2$ cannot occur as it would lead to $M_U \simeq \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 1 \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array}$, which contradicts our assumption of the block B being singular.

Let $d_0 \geq 2$ and suppose the theorem holds for every representation

$$U' = (U'_0, U'_{(a,b)}, U'_{c_1}, \dots, U'_{c_n}),$$

in which $\dim U'_0 = d'_0$ is such that $d'_0 < d_0$. Consider an indecomposable representation U with $\dim U_0 = d_0$, any of its matrix presentation M_U has the form

$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline A & B & C_1 & \cdots & C_n \\ \hline \bullet & \bullet & & & \\ \hline \end{array}$$

By applying suitable row operations, all linearly dependent rows within the block B become zero and we move the remaining linearly independent rows to the bottom of the matrix, obtaining the following form (from now on, the unmarked blocks in the matrices correspond to zero blocks):

$$\begin{array}{|c|c|} \hline A_1 & \\ \hline A_2 & B_2 \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array}.$$

The upper block A_1 cannot have zero rows, otherwise, U would have trivial direct summands, contradicting its indecomposability. Therefore, we can assume that the rows of A_1 are linearly independent. By applying admissible row operations, we bring A_1 to its row echelon form (by the previous comment, this row echelon form does not

contain zero rows), and maybe using some column exchanges, we get an identity block in the upper-right corner in the stripe corresponding to the point a . Then by using row operations, we nullify the block below this identity, producing the matrix form

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline & I_r & \\ \hline A' & B' & C \\ \hline \end{array}, \quad r \geq 1, \quad (2.1)$$

where we have separated the bottom right block into two sub-blocks $\begin{bmatrix} B' & C \end{bmatrix}$, with the condition that the number of columns in B' matches the number of columns in A' .

Admissible transformations which do not change the upper part of the whole matrix presentation, include column additions from B' to C and the same additions must be performed from the corresponding columns of A' to the zero block to its right. But this block can be turned again to zero, with suitable row transformations involving the identity block above it. Elementary column transformations of C , are allowed, and when these operations transform the identity block, its form can be recovered by applying the corresponding inverse row transformations. Therefore the matrix problem to solve in the blocks

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline A' & B' & C \\ \hline \end{array}$$

coincides with the matrix problem of the following ordered set with involution

$$\mathcal{Q}' = \left\{ \begin{array}{c} \circ c \\ | \\ \bullet b' \\ | \\ \bullet a' \end{array} \right\}.$$

This matrix presentation corresponds to an indecomposable representation, since otherwise, replacing a non-trivial direct sum decomposition for this presentation in the matrix (2.1), we would obtain a non-trivial direct sum decomposition for M_U , which contradicts its indecomposability. Moreover, it satisfies $d'_0 < d_0$ (since $r \geq 1$), which means, by the induction hypothesis, it has one of the matrix forms 0 to V.

We then just need to replace in the matrix (2.1) the blocks $\begin{bmatrix} A' & B' & C \end{bmatrix}$ with matrices of the forms 0 to V, and verify that the resulting matrix again has one of the types 0 to V. This process is straightforward and we describe it in detail below: the types 0 to III have zeroes in the block C , so the matrix (2.1) would have direct summands of the form $\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$, and the hypothesis of indecomposability implies that $M_U \simeq \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$, which is of type I with $n = 1$. If the blocks $\begin{bmatrix} A' & B' & C \end{bmatrix}$ are of type IV, then $r = 1$, and the matrix (2.1) would have the form

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline & 1 & \\ \hline I_n^\downarrow & I_n^\uparrow & \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{array} \\ \hline \end{array}$$

With a convenient permutation, the rightmost column of each vertical stripe become the first one, and the matrix turns into the form

$$\begin{array}{|c|c|} \hline I_{n+1}^\downarrow & I_{n+1}^\uparrow \\ \hline \end{array}$$

which is of type III. Finally, if the blocks $\begin{bmatrix} A' & B' & C \end{bmatrix}$ are of type V, then $r = 1$, and the matrix (2.1) would have the form:

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline & 1 & \\ \hline I_n & J_n^-(0) & \begin{matrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{matrix} \\ \hline \bullet & \bullet & \curvearrowright \end{array}$$

Once again, with the permutation that sends the column i to the column $i + 1$, and the column $n + 1$ to the first one, we obtain:

$$\begin{bmatrix} I_{n+1} & J_{n+1}^-(0) \end{bmatrix}$$

which is of type I.

- (b) Let us now assume that there exist $n \geq 1$ points c_1, c_2, \dots, c_n . We will proceed by induction on

$$m = \sigma(d) = d_0 + d_{(a,b)} + d_{c_1} + d_{c_2} + \dots + d_{c_n},$$

where

$$\begin{aligned} d_0 &= \dim(U_0), \\ d_{(a,b)} &= \dim(U_{(a,b)}), \\ d_{c_1} &= \dim(U_{c_1}/U_b), \\ d_{c_2} &= \dim(U_{c_2}/U_{c_1}), \\ &\vdots \\ d_{c_n} &= \dim(U_{c_n}/U_{c_{n-1}}). \end{aligned}$$

We will consider two subcases:

Subcase A: let's assume that $U_{c_j} = U_0$ for some $j \in \{1, \dots, n\}$. Since it is impossible to have $m = 1$ according to our assumptions, we will start the induction with $m = 2$. In this case, it is necessary $d_0 = 1$ and $d_{c_j} = 1$ for a unique $j \in \{1, \dots, n\}$, and all other coordinates of the dimension vector are zero. This corresponds to a representation such that $U_{c_j} = U_0 \simeq k$ and $U_{(a,b)} = U_{c_\ell} = 0$, for $\ell \neq j$, its matrix presentation is type IV with $n = 0$.

Let us consider the case $m \geq 3$. We assume the result holds for any representation of dimension d' with $\sigma(d') < m$. Consider an indecomposable representation U with $\sigma(d) = m$ and set

$$t = \min\{j \mid U_{c_j} = U_0\}.$$

By repeatedly applying Lemma 2.1, the restriction U' , of U to $\mathcal{Q} \setminus \{c_n, c_{n-1}, \dots, c_{t-1}\}$, is also indecomposable. Since $d_t = \dim(U_t/U_{t-1}) > 0$, we have $\sigma(d') < \sigma(d)$, and the induction hypothesis implies that U' belongs to one of the types 0 to V. In types IV and V, we have $U_{c_i} = U_0$ for all $i \in \{1, \dots, n\}$, which implies $U_{t-1} = U_0$. We would have $d_t = \dim(U_t/U_{t-1}) = 0$, which is absurd. Therefore, we must have $n = 1$, $\mathcal{Q} \setminus \{c_1\} = \mathcal{D}$, and thus U' can only be of types 0, I, II, or III.

In the following matrix forms:

$$\begin{bmatrix} a & b \\ I_n & F_n \end{bmatrix}, \text{ where } F_n = F_n(p^s(t)) \text{ y } p(t) \neq t, \\ n \geq 1$$

and

$$\begin{array}{cc} a & b \\ \boxed{J_n^-(0) \quad I_n} \\ \bullet & \bullet \\ n \geq 1 \end{array}$$

the block F_n , in the first case, and the block I_n , in the second case, allow us to nullify all the entries in the c_1 block by using appropriate column additions. Therefore, among the types 0 and I, the only possible case remaining is that U' has the form

$$\begin{array}{cc} a & b \\ \boxed{I_n \quad J_n^-(0)} \\ \bullet & \bullet \\ n \geq 1 \end{array},$$

then U will have the following form:

$$\begin{array}{ccc} a & b & c_1 \\ \boxed{I_n \quad J_n^-(0) \quad \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{array}} \\ \bullet & \bullet & \bullet \end{array},$$

which corresponds to type V (any other column of c_1 can be annihilated with suitable column operations using the $J_n^-(0)$ block).

Moreover, U' cannot be of type II either, because once again, when considering U , we could eliminate all the elements in the c_1 block by adding the columns of the I_n^{\leftarrow} block. It only remains to examine what happens when U' is of type III:

$$\begin{array}{cc} a & b \\ \boxed{I_n^\downarrow \quad I_n^\uparrow} \\ \bullet & \bullet \\ n \geq 0 \end{array}.$$

Upon “reconstructing” U , we would obtain the following matrix

$$\begin{array}{ccc} a & b & c_1 \\ \boxed{I_n^\downarrow \quad I_n^\uparrow \quad \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{array}} \\ \bullet & \bullet & \bullet \end{array},$$

which corresponds to type IV (any other column of c_1 can be annihilated with appropriate column operations using the I_n^\uparrow block).

Subcase B: let’s now assume that for every $j \in \{1, \dots, n\}$, we have $U_{c_j} \neq U_0$. For the base case of the induction with $m = 1$, we have $d_0 = 1$ and all other coordinates of the dimension vector must be zero, so U is of type III with $n = 0$. Now, let’s consider the case for $m \geq 2$. We assume that the result holds for representations with $\sigma(d') < m$, and we consider an indecomposable representation U with $\sigma(d) = m$. Under our assumption, we have in particular that $U_{c_n} \neq U_0$, and we can place the rows corresponding to U_{c_n} at the bottom of M_U , obtaining a matrix presentation of the form:

$$\begin{array}{ccccc} A'' & & & \cdots & \\ A''' & B''' & C'_1 & \cdots & C'_n \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{ccccc} A'' & & & \cdots & \\ A''' & B''' & C'_1 & \cdots & C'_n \end{array}} \right\} U_{c_n}$$

Similarly to what we did at the beginning of this proof, we observe that the upper block A'' does not have any zero rows (otherwise, we would have trivial direct summands for U , contradicting its indecomposability), and we can assume that the rows of A'' are linearly independent. By applying admissible row operations, we can bring A'' to its row echelon form (as mentioned earlier, this row echelon form does not contain any zero rows) and maybe using some column exchanges we can obtain an identity block. Furthermore, using appropriate row operations, we can eliminate the elements below this identity block, resulting in a matrix of the following form:

$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline & I_s & & & \cdots & \\ \hline A' & & B' & E & C'_1 & \cdots & C'_n \\ \hline \bullet & & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \hline \end{array}, \quad \text{with } s \geq 1. \tag{2.2}$$

In this matrix, the block B' has the same number of columns as the block A' . The lower horizontal stripe of this matrix corresponds to a matrix presentation of an indecomposable representation (if it decomposed non-trivially into a direct sum, by placing those summands in the matrix (2.2), this would imply that M_U can also be written as a non-trivial direct sum, which is absurd) of the following ordered set with involution:

$$\mathcal{Q}'' = \left\{ \begin{array}{c} \circ c_n \\ \vdots \\ \circ c_1 \\ \circ e \\ \bullet a \\ \bullet b \end{array} \right\}$$

This indecomposable representation also satisfies $\sigma(d') < \sigma(d)$ (since $s \geq 1$), and due to our construction, the block E , which admits the same transformations as a small point, is a zero block. Otherwise, we would be in a situation analogous to the one treated above in subcase A, in which the chain of small points has at least two points and the subspace associated with one of them coincides with the main space of the representation, which contradicts our assumption. Thus, U has s direct summands of the form $\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$ and its indecomposability implies $s = 1$ and $M_U \simeq \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$, which is of type I, with $n = 1$. This finishes our proof. \square

Corollary 2.3. *All the indecomposable representations of the dyad with involution*

$$\mathcal{D} = \left\{ \begin{array}{c} \bullet \\ 1 \end{array}, \begin{array}{c} \bullet \\ 2 \end{array} \right\}$$

are exhausted, up to isomorphism, by the presentations of the four types shown in Table 1.

Proof. The result follows immediately from the considerations of the case (a) in the proof of Theorem 2.2. \square

Corollary 2.4. *All the indecomposable matrix presentations of the Kronecker problem are exhausted, up to isomorphism, by the presentations of the four types shown in Table 1.*

Proof. The result follows from Corollary 2.3 and the remarks at the beginning of this section. \square

Table 1. Indecomposable representations for the Kronecker quiver. Types 0 and I are autodual ($0 = 0^*$ and $I = I^*$), while for types II and III it is the case that $II^* = III$ and $III^* = II$.

0	$I_n \quad X$	$X = F_n(p^s(t))$ $p(t) \neq t$	}	Regular case
$n \geq 1$				
I	$I_n \quad J_n^-(0)$	and	$J_n^-(0) \quad I_n$	}
$n \geq 1$		$n \geq 1$		
II	$I_n^{\rightarrow} \quad I_n^{\leftarrow}$		}	Non-regular case
$n \geq 0$				
III	$I_n^{\downarrow} \quad I_n^{\uparrow}$			
	$n \geq 0$			

Conclusions

By using an elementary matrix based approach related to partially ordered sets with involution, we obtained another solution to the classical Kronecker problem of classifying pair of linear operators between a pair of finite-dimensional spaces over a field k .

The problems we solved in Theorem 2.2, Corollaries 2.3 and 2.4 are of tame representation type, in the sense of **Simson** (1992, Section 14.4); in fact, they are of finite growth type.

In the process of obtaining our solution, we found two non equivalent categories of representations with the same associated matrix problem. In the case of partially ordered sets, matrix problems appeared earlier than the corresponding vector space or categorical approach and they are often a very valuable tool to describe objects and their isomorphism classes. But matrices do not conform a category, actually they do not involve information about morphisms.

The authors aim to research about the precise relation between the categories $\text{rep}(\mathcal{D}, \Theta, k)$ and $\text{rep}(\mathcal{K}, k)$, and to translate that relation to some combinatorial objects such as the corresponding Auslander-Reiten quivers.

Acknowledgements

We want to express our gratitude to the late Alexander Zavadskij. His work with the authors and the academic discussions held with him served as inspiration for this project.

Authors' contribution

ID and GM: both authors actively participated in the conception and development of the project; they worked together to elaborate and review the manuscript.

Conflict of interest

None to declare.

References

- Auslander, M., Reiten, I., Smalø, S. O.** (1997). *Representation theory of artin algebras*. Cambridge University Press.
- Benson, D. J.** (1995). *Representations and cohomology* (Vol. 1). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511623615>
- Bondarenko, V. M., Zavadskij, A. G.** (1991). Posets with an equivalence relation of tame type and of finite growth. *Conference Proceedings, Canadian Mathematical Society, 11*, 67-88.
- Cifuentes, V.** (2021). *Algorithms of differentiation for posets with an involution* [Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia]. Bogotá.
- De Vries, H.** (1984). Pairs of linear mappings. *Indagationes Mathematicae (Proceedings)*, 87(4), 449-452. [https://doi.org/10.1016/1385-7258\(84\)90047-7](https://doi.org/10.1016/1385-7258(84)90047-7)
- Dieudonné, J.** (1946). Sur la réduction canonique des couples de matrices. *Bulletin de la Société Mathématique de France*, 74, 130-146. <https://doi.org/10.24033/bsmf.1380>
- Dmytryshyn, A., da Fonseca, C. M., Rybalkina, T.** (2016) Classification of pairs of linear mappings between two vector spaces and between their quotient space and subspace. *Linear Algebra and its Applications*, 509, 228-246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.laa.2016.07.016>
- Gabriel, P., Roiter, A. V.** (1992). *Representations of finite-dimensional algebras* (A.Kostrikin I. Shafarevich, Eds.; Vol. 73). Springer-Verlag.
- Gantmacher, F. R.** (1959). *The theory of matrices*. MIR Titles.
- Kronecker, L.** (1890). Algebraische reduction der schaaren bilinearer formen. *Sitzungsber. Akad. Berlin*, 763-776.
- Medina, G., Zavadskij, A. G.** (2004). The four subspace problem: An elementary solution. *Linear Algebra and its Applications*, 392, 11-23.
- Nazarova, L. A., Roiter, A. V.** (1973). Categorical matrix problems and the brauer-thrall conjecture. *Inst. Mat. AN UkSSR*, 73.9, 1-100 Preprint.
- Pareigis, B.** (1970). *Categories and functors*. Academic Press.
- Ringel, C. M.** (1984). *Tame algebras and integral quadratic forms* (Vol. 1099). Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/bfb0072873>
- Schiffler, R.** (2014). *Quiver representations*. Springer-Verlag.
- Schubert, H.** (1972). *Categories*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-65364-3_1
- Simson, D.** (1992). *Linear representations of partially ordered sets and vector space categories*. Gordon; Breach Science Publishers.
- Weierstrass, K.** (1868). Zur theorie der quadratischen und bilinearen formen. *Monatsber. Akad. Wiss.*, 311-338.
- Zavadskij, A. G.** (1991). An algorithm for posets with an equivalence relation. *Conference Proceedings, Canadian Mathematical Society, 11*, 299-322.
- Zavadskij, A. G.** (2007). On the kronecker problem and related problems of linear algebra. *Linear Algebra and its Applications*, 425, 26-62. <https://doi.org/10.1016/j.laa.2007.03.011>

Ensayo/Assay

El Premio Nobel de Fisiología o Medicina 2023 The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2023

“Los descubrimientos de los dos premios Nobel fueron fundamentales para desarrollar vacunas de ARNm eficaces contra la COVID-19 durante la pandemia que comenzó a principios de 2020. A través de sus descubrimientos innovadores, que han cambiado fundamentalmente nuestra comprensión de cómo interactúa el ARNm con nuestro sistema inmunológico, los galardonados contribuyeron al desarrollo de vacunas a un ritmo sin precedentes, durante una de las mayores amenazas a la salud humana en los tiempos modernos”.

Comunicado de prensa, The Nobel Assembly at Karolinska Institutet, 2 de octubre de 2022
<https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2023/advanced-information/>

El Premio Nobel de Fisiología o Medicina 2023 fue otorgado a Katalin Karikó y Drew Weissman por sus “descubrimientos sobre modificaciones de bases de nucleósidos que permitieron el desarrollo de vacunas de ARNm eficaces contra la COVID-19”. Para el desarrollo de vacunas a base de ARNm sintéticos debían resolverse dos problemas fundamentalmente: la degradación rápida y espontánea de las moléculas de ARNm, con la consecuente producción limitada de la proteína vacunal en las células, y la inducción de una respuesta inflamatoria perjudicial por el ARN. Después de varios lustros de investigación, en el 2005 ambos autores publicaron un artículo seminal para la viabilidad de las vacunas a base de ARNm (Karikó *et al.*, 2005). En el artículo demostraron que el reconocimiento inmunológico innato del ARN por parte de tres receptores de tipo Toll (TLR3, TLR7 o TLR8) está controlado por la modificación de nucleósidos, incluida la metilación. Es decir, que la introducción en el ARNm sintético de modificaciones similares a las que ocurren naturalmente en el ARN de las células era suficiente para evitar la respuesta inflamatoria. Posteriormente mostraron que el cambio del nucleósido uridina por pseudouridina en el ARNm sintético evitaba la respuesta inflamatoria e incrementaba la producción de la proteína en las células.



https://www.science.org/content/article/mrna-discovery-paved-way-covid-19-vaccines-wins-nobel-prize-physiology-medicine?utm_source=sfmc&utm_medium=email&utm_campaign=ScienceAdviser&utm_content=di%E2%80%A6

Además del trabajo de los doctores Karikó y Weissman, otros estudios también fueron determinantes para el rápido desarrollo de las vacunas a base de ARNm contra la COVID-19: la formulación de un adecuado sistema para la entrega óptima del ARNm a las células (nanopartículas lipídicas) y la definición del método de estabilización de la proteína de la espícula viral que permitiera desencadenar una apropiada respuesta inmune en el huésped. Con el otorgamiento del premio Nobel, los jurados de la Academia destacaron el aporte que consideraron fundamental para el “...desarrollo de vacunas a un ritmo sin precedentes, durante una de las mayores amenazas a la salud humana en los tiempos modernos” (Comunicado de prensa, The Nobel Assembly at Karolinska Institutet, 2 de octubre de 2022).

Los análisis retrospectivos de procesos exitosos, más aún si conducen al otorgamiento del premio Nobel, hacen parecer la estrategia escogida como la elección obvia, lo que claramente no ocurre en este caso. Efectivamente, cuando se conocieron los resultados positivos de las “pruebas de concepto” sobre el uso de ADN y ARN para el desarrollo de vacunas, la mayoría de investigaciones se concentraron en el uso de ADN, por ser más estable, y de vectores virales, por facilitar el ingreso de los ácidos nucleicos de interés a las células. En cambio el uso de ARNm como plataforma para desarrollar vacunas fue relegado e incluso descartado por muchos.

En este contexto, lo que subyace en el éxito del uso de ARNm en el desarrollo de vacunas es el tesón de un par de científicos convencidos de la importancia de sus investigaciones y decididos a vencer la resistencia de sus colegas y el poquísimo apoyo de los financiadores, que incluso los llevó a continuar en solitario con los experimentos durante muchos años, como quedó claro en las entrevistas que concedieron a www.nobelprize.org horas después de conocer el otorgamiento del premio Nobel.

En este sentido, el Dr. Weismann afirmó: “Durante los 20 años que trabajamos juntos antes de que alguien supiera qué es el ARN, o le importara, estábamos nosotros dos, literalmente uno al lado del otro en un mesón, trabajando juntos. Y hablando y discutiendo nuevos datos”. Cuando fue obligada a retirarse de la Universidad de Pensilvania, la Dra. Karikó, por su parte, decidió que la mejor forma de continuar su investigación era trabajar en la industria farmacéutica, con la compañía BioNTech, aunque ello le implicara desplazarse continuamente de su casa en las afueras de Filadelfia hasta la sede alemana de la compañía y realizar personalmente los experimentos, según lo cuenta en su entrevista: “De hecho, hice todos estos experimentos con mis propias manos, tenía 58 años, todavía estaba cultivando plásmidos y alimentando células...”.

En el futuro próximo se espera que esta plataforma permita avances en el tratamiento de otras enfermedades como el cáncer y enfermedades autoinmunes y “con suerte, este premio inspirará a las mujeres, los inmigrantes y todos los jóvenes a perseverar y ser resilientes”, como lo anhela la Dra. Karikó (entrevista concedida a la revista *Nature*, Callaway & Naddaf, 2023), quien apenas es la decimotercera mujer galardonada con el Premio Nobel de Fisiología o Medicina.

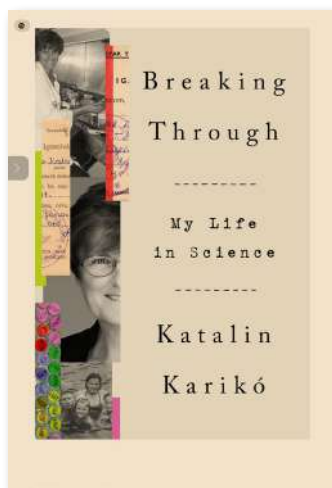
📧 Juana Ángel, MD, PhD

Miembro correspondiente ACCEFYN

Referencias

- Callaway, E., Naddaf, M. (2023). Pioneers of mRNA COVID Vaccines Win Medicine Nobel. *Nature*, 622(7982), 228-29.
- Karikó, K., Buckstein, M., Ni, H., Weissman, D. (2005). Suppression of RNA Recognition by Toll-like Receptors: The Impact of Nucleoside Modification and the Evolutionary Origin of RNA. *Immunity*, 23(2), 165-75. doi: 10.1016/j.immuni.2005.06.008.
- Karikó, K., Weissman, D. (2023). Advanced information, Scientific background Discoveries concerning nucleoside base modifications that enabled the development of effective mRNA vaccines against COVID-19. <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2023/advanced-information/>
- 2023 Nobel Prize lectures in physiology or medicine | Katalin Karikó and Drew Weissman. <https://www.youtube.com/watch?v=DOLoFM4NwoY>

Comentario bibliográfico



Breaking Through: My Life in Science

por Katalin Karikó
Editorial Crown (2023)
Penguin Random House
Editorial Group LLC, New York
ISBN 9780593443170

Breaking Through: My Life in Science

Este libro autobiográfico relata la determinación de una mujer que trabajó en el anonimato, intensamente, durante décadas, con la certeza de que su labor era importante porque salvaría vidas. Aunque fue una estudiante promedio, estaba convencida de que lo que le faltaba en habilidad natural lo podría remediar con su tesón y su esfuerzo.

Katalin Karikó nació en Hungría en 1955. Allí realizó sus estudios de pregrado en Biología (1972) y su doctorado en Bioquímica (1982). Cuando perdió su puesto de investigadora en el Centro de Investigaciones Biológicas (CRB) de Hungría, decidió emigrar a los Estados Unidos con su esposo Béla Francia y su hija de tres años Susan.

Entre 1985 y 1988 hizo su posdoctorado en el laboratorio de Robert J. Suhadolnik de la Universidad de Temple en Filadelfia. Justo en el momento en que le ofrecieron un trabajo en la Universidad Johns Hopkins en Boston, su jefe la amenazó con hacerla deportar y le informó a la oficina de inmigración que ella estaba trabajando ilegalmente en los Estados Unidos. Mientras solucionaba este problema, la Universidad Johns Hopkins le retiró su oferta, por lo que se vio obligada a trabajar en una universidad asociada con las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos (Uniformed Services University of the Health Sciences) entre 1988 y 1989, con lo que solucionó su estatus migratorio. Sin embargo, su nuevo sitio de trabajo quedaba en Bethesda, Maryland, a tres horas de Filadelfia, y debía viajar desde las tres de la mañana cada lunes para cumplir con su trabajo toda la semana y regresar los viernes en la noche a su casa.

En 1989 logró conseguir una plaza en la Universidad de Pensilvania, donde se dedicó al estudio del ARN mensajero (ARNm) y su papel en la terapia génica al lado del cardiólogo Elliot Barnathan. Durante esos años trató de conseguir financiación para sus investigaciones sin lograrlo; tampoco pudo acceder a una posición como profesora de la universidad, teniendo que contentarse con la posición de investigadora asociada. El profesor Barnathan la apoyó hasta 1997, año en que se trasladó a laborar en otra universidad. Entonces recibió el respaldo de uno de sus estudiantes, el profesor David Langer, para que pudiera continuar estudiando el ARNm. A partir de 1997 comenzó a colaborar con el profesor Drew Weissman, un inmunólogo recién llegado a la universidad cuyos estudios se centraban en la obtención de una vacuna contra el VIH. El trabajo colaborativo entre el inmunólogo y la bioquímica fue extremadamente efectivo. Gracias a la financiación que recibía el profesor Weissman y a la persistencia de la doctora Karikó, en el 2005 lograron modificar el ARNm sintético reemplazando la uridina por la pseudouridina para que no se produjera la reacción inflamatoria. Este gran descubrimiento, rechazado por las revistas Nature y Science, finalmente se publicó en Immunity, pero pasó desapercibido. También lograron usar nanopartículas lipídicas para transportar el ARNm en aplicaciones terapéuticas. En el 2006, Karikó y Weissman fundaron una pequeña compañía, RNARx, y patentaron los nucleótidos modificados. Dichas patentes fueron vendidas con exclusividad por la Universidad de Pensilvania a una compañía farmacéutica.

A pesar de su labor, y luego de más de veinte años de trabajar para la Universidad de Pensilvania, en el 2013 la Dra. Karikó fue despedida porque la universidad consideró que no tenía los méritos exigidos para ser profesora. Se retiró como profesora adjunta y sólo pudo mantener el carné que le permitía usar la biblioteca. En esas circunstancias fue contratada para el cargo de vicepresidenta por la compañía farmacéutica BioNTech en Alemania, por lo que sólo podía visitar a su familia cada dos o tres meses. En el 2020,

la tecnología que habían desarrollado Karikó y Weissman fue usada por BioNTech en asociación con *Pfizer* para desarrollar la vacuna de ARNm contra el virus de la COVID-19 en un tiempo record de ocho meses y con una eficacia del 95 %. Su aporte a este proceso lo hizo virtualmente desde los Estados Unidos, pues la visita a su familia coincidió con el cierre de las fronteras debido a la pandemia de COVID-19.

En el relato de su vida cabe destacar la persistencia de la Dra. Karikó para alcanzar lo que se había propuesto superando las dificultades y transformando lo que tenía en lo que necesitaba. Cuando no se quiere hacer algo, pueden encontrarse innumerables excusas, pero todos tenemos una responsabilidad con el mundo y, aunque las excusas parezcan más reales que nuestras futuras contribuciones, si cedemos ante ellas, nunca lograremos lo que soñamos y le da sentido a nuestra vida.

Otro aspecto que sobresale en el recuento de las experiencias de la Dra. Karikó es lo estresante que pueden ser las relaciones interpersonales y cómo entran la tensión entre dos derroteros opuestos: la venganza y el agradecimiento. Mudar la una en la otra es necesario, porque la primera sólo lleva a lastimar a los implicados en la relación, en tanto que la gratitud la enriquece, disminuye el estrés y da tranquilidad. En toda situación, por adversa que sea, es posible encontrar algo bueno, por ello debemos agradecer las enseñanzas que nos deja.

En el libro la profesora Karikó expresa su agradecimiento a su esposo, quien la apoyó en el cuidado de la familia, permitiendo que ella pudiera desarrollar su labor como investigadora; agradece, asimismo, al buen sistema de cuidado infantil en Hungría, que le permitió continuar su carrera de investigadora; al profesor Suhadolnik, quien le dio la oportunidad de adelantar su trabajo posdoctoral en los Estados Unidos, así como a los profesores Elliot y David, por haberle permitido seguir con su investigación sobre el ARNm y establecer la colaboración con el profesor Weissman en los últimos diez años en la Universidad de Pensilvania. Incluso su despido de la Universidad fue beneficioso, porque la forzó a buscar trabajo en BioNTech, compañía que la acogió y le permitió continuar sus estudios en torno al ARNm y desarrollar la vacuna contra la COVID-19.

La Dra. Karikó señala cómo el resultado final se alcanza con mucha suerte, superando las dificultades, o aprovechándolas para cambiar el rumbo, y desplegando la tenacidad y la persistencia. Así logró hacer una gran contribución a la ciencia y a la humanidad. Una vez se desarrolló la vacuna de COVID-19 en el 2020, esta mujer admirable ha recibido más de 130 premios internacionales, incluido el Premio Nobel de Medicina, 2023.

La profesora Karikó ha aceptado esta última fase de su vida con serenidad. Espera que cuando este momento de fama pase, pueda volver a estudiar y a internarse en la ciencia para formular nuevas preguntas y nuevos experimentos. Se estima que sólo en los Estados Unidos la vacuna de COVID-19 previno la muerte de tres millones de personas y la hospitalización de dieciocho millones, economizándole al país un trillón de dólares.

Juan Guillermo McEwen MD. PhD.

Profesor, Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia
Investigador, Grupo de Biología Celular y Molecular, Corporación para Investigaciones Biológicas, Medellín, Colombia

Entre mitos y conceptos erróneos: el caso del microbioma

Between myths and misconceptions: the case of the microbiome

En años recientes he notado un aumento en el uso del término “microbioma” tanto en revistas científicas como en conversaciones, redes sociales y noticieros. Pero, ¿qué es el microbioma y por qué es relevante? Mas allá de su indiscutible importancia en diversos ámbitos de la biología, desde la ecología hasta la salud humana, una publicación reciente resalta que este campo de estudio también sirve como ejemplo de las falacias y errores que se propagan en torno a la ciencia (**Walker & Hoyles, 2023**).

El estudio de un microbioma es complejo, porque busca entender los microorganismos como comunidades y no de forma aislada. Las comunidades microbianas, que habitan toda suerte de ambientes: desde aquellos con condiciones extremas hasta los hospederos humanos, generalmente se componen de múltiples especies que interactúan y se comunican entre sí. Por ello, su estudio requiere estrategias capaces de descifrar complejidades taxonómicas y funcionales, como la secuenciación masiva, el análisis bioinformático y la metabolómica, entre otras. Estas tecnologías complementan las técnicas de cultivo y aislamiento en el laboratorio constitutivas de la microbiología clásica.

La palabra “microbioma” se ha utilizado para designar ideas que no son necesariamente equivalentes, razón por la cual un grupo de investigadores se puso a la tarea de unificar conceptos en este campo (**Berg et al., 2020**). Los autores definen “microbioma” como la comunidad de microorganismos que ocupa un nicho de propiedades físico-químicas distintivas que interactúan entre sí y con su entorno y, por lo tanto, comprende los microorganismos y también el lugar en donde actúan (**Berg et al., 2020; Konopka, 2009**). Una comunidad microbiana, gracias a sus propiedades, actividades e interacciones, existe en un hábitat con nichos ecológicos específicos. Tales nichos incluyen ácidos nucleicos, proteínas, metabolitos y otras moléculas que hacen parte del entorno. La microbiota se distingue del microbioma, puesto que hace referencia a los organismos vivos que componen el microbioma. Se incluyen bacterias, arqueas, hongos, algas y protistas, pero quedan por fuera elementos como plásmidos, además de fagos, virus y priones ya que muchos investigadores no los consideran como organismos vivos. Sin embargo, estos elementos son parte del entorno y hacen parte del microbioma. El metagenoma microbiano, expresión muy empleada en los estudios de ecología microbiana, se refiere a la colección de genomas y genes presente en el microbioma. Se entiende, entonces, que el microbioma es más que la sola composición del material genético de un ecosistema, pues incluye a todos los miembros que viven o interactúan en un mismo hábitat para formar un nicho ecológico.

El conocimiento científico se construye de forma sistemática y gradual, en un proceso que implica cambios en nociones y paradigmas que, cuando son interpretados equivocadamente, se perpetúan como conceptos erróneos (*misconceptions*), que convertidos en mitos, se propagan sin mayor cuestionamiento. El estudio de los microbiomas no ha sido ajeno a esta tendencia.

Contrario a lo que se cree, la investigación en torno a los microbiomas no es reciente. Es cierto que los avances tecnológicos, especialmente la secuenciación masiva, han revelado con gran detalle la complejidad de la composición y la función de estas comunidades, pero hay estudios sobre ellas y su comportamiento en el ambiente y en los humanos que datan del siglo pasado, o son incluso anteriores. Otra idea que se ha propagado es que el término “microbioma” se usó por primera vez en el año 2001, pero, al igual que el de microbiota, se vienen utilizando desde mucho antes.

Además de estas inexactitudes, se han divulgado otros conceptos erróneos que merecen mención. Muchos creen, por ejemplo, que la microbiota es heredada de la madre al nacer, una simplificación que no hace justicia al proceso de desarrollo y cambio que resulta en la microbiota única de un individuo. Esta diferencia es evidente incluso en gemelos que crecen en el mismo hogar. Otra idea que campea en la literatura científica tiene que ver con la cantidad de bacterias que alberga un individuo. En los cálculos iniciales se estimaba que había aproximadamente 10^{12} bacterias por gramo de heces y un peso total de 1 a 2 kg de bacterias por individuo. Hoy se cree que estos valores son bastante menores y que el número oscila entre 10^{10} y 10^{11} bacterias/g, la mayoría en el colon.

En este mismo sentido, un estudio en el que se estimó que en nuestro cuerpo hospedamos 10 veces más células bacterianas que células propias obtuvo mucha publicidad. Al reevaluar estas cifras, resultó que el número de las células propias del individuo y las bacterianas parece ser equivalente, con una relación cercana a 1:1 (Sender *et al.*, 2016). Lo que sí es cierto es que la cantidad de información génica en el microbioma supera la información de nuestro genoma, lo que constituye una riqueza funcional y metabólica que robustece las propiedades del hospedero humano. Otro concepto que persiste es que hay grupos de microorganismos o “patobionomas” que determinan la aparición de algunas enfermedades. Hoy se sabe que la realidad es más compleja y el efecto de los microorganismos depende, en gran parte, de su contexto ambiental y de las interacciones entre ellos y con su hospedero. Así, los humanos podemos albergar patógenos como *Clostridioides difficile* o *Escherichia coli* sin mostrar síntomas de enfermedad. La clave residiría, entonces, en mantener un equilibrio sano (cuya definición, aún vaga, dificulta posibles terapias) entre los múltiples organismos del microbioma.

Gracias a los avances tecnológicos y metodológicos, hoy podemos analizar centenares de muestras simultáneamente, cuando antes sólo se podían estudiar y comparar unos pocos microbiomas. Estas metodologías, aunque más poderosas y sensibles, no están exentas de sesgos y limitaciones. La secuenciación masiva de ácidos nucleicos, ampliamente usada para explorar la composición de una comunidad microbiana, involucra diversos pasos experimentales que generan sesgos. Es el caso del método de obtención y preservación de muestras, la extracción del ADN, la plataforma de secuenciación y las herramientas bioinformáticas utilizadas para la interpretación y el análisis de los datos. Por este motivo, casi cualquier cambio en el flujo de trabajo, incluidas las variaciones en las cohortes de individuos, las condiciones de estudio y las aproximaciones metodológicas, se refleja en los resultados y dificulta su reproducibilidad (Schloss, 2018). Algunos investigadores han sugerido que deben implementarse protocolos estandarizados para minimizar las diferencias experimentales y facilitar las comparaciones. Sin embargo, la estandarización no elimina los sesgos y no es siempre posible, dado el gran número de estudios sobre microbiomas a nivel global y la variedad de diseños experimentales empleados. Es imprescindible, por lo tanto, el rigor en los ensayos y la transparencia en los reportes, desde el montaje experimental hasta el análisis de datos, información que debería quedar abierta y disponible para análisis posteriores, comparaciones y validaciones.

Las innovaciones tecnológicas también tienen impacto en los resultados, a veces, incluso, contradiciendo conclusiones anteriores. Por ejemplo, la observación original sobre los cambios en las familias bacterianas Firmicutes y Bacteroidetes dependiendo del estado de obesidad de un individuo, no necesariamente se mantiene en los metaanálisis recientes de datos provenientes de múltiples estudios independientes. En otro caso, los avances en las técnicas de cultivo de microorganismos han permitido recuperar algunos antes considerados no cultivables, con lo que se desnudó el mito, que todavía se mantiene, sobre la imposibilidad de cultivar la gran mayoría de microorganismos de la microbiota humana. Estos cultivos permiten estudiar el crecimiento, las interacciones y los posibles efectos de microorganismos específicos en su hospedero.

Es preocupante la propagación de información errónea, de mitos o, peor aún, de desinformación, en particular la que se disemina de forma deliberada, ya que puede amplificarse y perjudicar la credibilidad de los avances científicos. Todos tenemos la

responsabilidad de combatirla (**Waldrop**, 2023). La verificación previa de la información que circula, desde la literatura científica hasta las redes sociales, es una tarea necesaria para mitigar el efecto nocivo de la desinformación en los avances científicos y su impacto en la toma de decisiones.

✉ **María Mercedes Zambrano, Ph. D.**
Editora asociada, ACCEFYN

Referencias

- Berg, G., Rybakova, D., Fischer, D., Cernava, T., Vergès, M.-C. C., Charles, T., Chen, X., Cocolin, L., Eversole, K., Corral, G. H., Kazou, M., Kinkel, L., Lange, L., Lima, N., Loy, A., Macklin, J. A., Maguin, E., Mauchline, T., McClure, R., ... Schloter, M.** (2020). Microbiome definition re-visited: Old concepts and new challenges. *Microbiome*, 8(1), 103. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00875-0>
- Konopka, A.** (2009). What is microbial community ecology? *The ISME Journal*, 3(11), 1223-1230. <https://doi.org/10.1038/ismej.2009.88>
- Schloss, P.D.** (2018). Identifying and Overcoming Threats to Reproducibility, Replicability, Robustness, and Generalizability in Microbiome Research. *MBio*, 9(3), e00525-18. <https://doi.org/10.1128/mBio.00525-18>
- Sender, R., Fuchs, S., Milo, R.** (2016). Revised Estimates for the Number of Human and Bacteria Cells in the Body. *PLOS Biology*, 14(8), e1002533. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002533>
- Waldrop, M.M.** (2023). How to mitigate misinformation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120 (36), e2314143120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2314143120>
- Walker, A. W. Hoyles, L.** (2023). Human microbiome myths and misconceptions. *Nature Microbiology*, 8(8), 1392-1396. <https://doi.org/10.1038/s41564-023-01426-7>

Agradecimientos - Acknowledgements

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Volumen 47, números 182, 183, 184 y 185.

El comité editorial de la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales expresa sincero agradecimiento a los revisores que han participado durante el año 2023, en la valoración crítica de los artículos presentados a la revista, por su valiosa contribución, esfuerzo y tiempo dedicado.

Adriana Espinosa Ramírez
Adriana Bermúdez
Alejandro Oyono Ondo Méndez
Alfredo Lora
Abdul Mauricio Reyes Usuga
Álvaro González García
Anderson Dussan Cuenca
Andrés Cárdenas
Ángela Gutiérrez Cortés
Camila Martínez Aguillón
Carlos Alberto Jaramillo Muñoz
Carlos Alberto Parra Osorio
Cacier Zilahy Hadad
Carmenza Duque Beltrán
César Augusto Polanco
César Augusto Sierra
Concepción J Puerta
Claudia Huertas
Damián Cárdenas Loboguerrero
Daniel José Nisperuza Toledo
Daniel Valencia Rodríguez
Denisse Cortés
Diana Ochoa
Eduardo Brieve Bustillo
Edwin Baquero
Edwin Chaves Esquivel
Elia Mercedes Alonso Guzmán
Enrique Martines
Evangelina Ramírez-Lara

Farid Bernardo Cortés Correa
Federico Moreno
Fernando Prieto-Martínez
Francisco Alejandro Sánchez Barrera
Frank Bungartz
Freddy Moreno Cárdenas
Harrie Sipman
Hernán González Osorio
Humberto Mendoza Cifuentes
Germán Díaz
Gilberto Domínguez Torrejón
Giovanni Pinzón Estrada
Gladys-Parra
Jairo Roa Rojas
José Alberto Iannacone
José Iván Campos Roza
José Luis Fernández Alonso
Juan Carlos Moreno
Juan Camilo Buitrago Casas
Juan Camilo Ríos-Orjuela
Juan Felipe Lazarus Agudelo
Laura Valderrama
León Darío Pérez Pérez
Luis Humberto Mendoza-Huizar
Manuel Antonio Franco Cortes
María Isabel Ríos
María Eugenia Morales
María Luisa Serrano
María M. Torres-Martínez

Mario Armando Higuera Garzón
Mauricio Vinasco Téllez
Miguel Hernando Parra
Milena Benavides Serrato
Mónica Patricia Valencia Rojas
Nelly Rodríguez Eraso
Nicolas Pérez
Orlando Acevedo-Charry
Omar Triana Chávez
Oscar Diego Evangelista Vargas
Oscar Galindo
Óscar Ernesto González Medina
Pablo Antonio Castro López
Pablo Mauricio Medrano Vizcaíno
Paula Jaramillo
Rafael González Hernández
Rodolfo Sosa Echeverría
Rodrigo Bernal
Rubén Ardila
Robert C Navarro
Rosa Emilia Pérez Pérez
Sandra Uribe Soto
Sergio Solari
Whady Felipe Flórez Escobar
Vladimir Minorta-C.
William López Pérez
Yazmín Agamez

Índice de autores - Index of Authors

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Volumen 47, números 182, 183, 184 y 185.

- Abdiel Jover-Capote, 122
Adriana Gracia-Clavijo, 315
Agustín Cardona, 904
Aida-Elena Baca-Gamboa, 996
Alberto Gómez Gutiérrez, 191, 731
Aleidy Galindo-Cuervo, 591
Alejandro Soto-Ospina, 8
Alejandro Zamora, 520, 541
Alfonso Esquivel-Herrera, 141
Alonso Barrios-Trilleras, 641
Álvaro Botero-Botero, 520, 541
Ana Milena López-Aguirre, 641
Andrés Cárdenas, 177, 943
Andrés F. Guerrero-Guio, 242
Andrés F. Vargas-Arboleda, 520, 541
Andrés Gómez-Giraldo, 837
Andrés J. Bohórquez, 270
Andrés Merchán-Cepeda, 604
Andrés Pardo-Trujillo, 412, 925
Andrés Villegas-Lanau, 8
Ángela Catalina Franco-Becerra, 259
Angela M. Mendoza-Henao, 194
Angela Stella Camacho Beltrán, 733, 716
Angelo Plata-Torres, 412, 925
Aníbal González, 520, 541
Arlid Meneses, 765
Arturo Acero P., 181
Asiel Cabrera-Guerrero, 122
Astrid Siachoque, 904
Azubuike S. Ekwere, 371
Beatriz H. Cogollo-Olivo, 37
Benjamín Calvo-Mozo, 445
Betty L. López-Osorio, 654
Bibiana Moncada, 619
Bilson Castro, 693
Carl Henrik Langeback, 188
Carlos Alberto Trujillo Solarte, 1024
Carlos Andrés Naranjo, 8
Carlos Jaramillo, 177, 734
Carlos Nisperuza-Pérez, 135
Carlos William Sánchez, 101
Clemencia Gómez-González, 412
Cristian Castro, 329
Cristian Goéz-Therán, 242
Christian C. Carmona-Vargas, 668
Christy Till, 904
Daniel Alfonso Urrea, 765
Daniel Monterrosa, 943
Danilo Zambrano, 22
Darío Valencia Restrepo, 735
Darwin M. Morales-Martínez, 882
David Montes-Iturrizaga, 352
Diana Carolina Hernández, 765
Diego Camargo-Trillos, 81
Diego Gamboa-García, 571
Diego Rincón-Murillo, 619
Diego Zambrano V, 160
Edwin Orlando López-Delgado, 556
Edwin Ramírez, 925
Eliana Bohórquez-Bedoya, 837
Elizabeth Flórez, 151
Elizabeth Hodson, 736
Elsa Vásquez, 8
Elvio Gayozo-Melgarejo, 385
Enrique Arbeláez-Cortés, 456
Erika Alejandra Cardona-Galvis, 868
Esteban Uribe, 8
Farid Chejne, 81
Favián Arenas-Aparicio, 160
Federico Cuadros-Jimenez, 952
Federico Mosquera-Guerra, 520, 541
Felipe Gómez-Montoya, 520
Felipe Guhl, 172, 765
Felipe Vallejo-Hincapié, 925
Felipe Velásquez-Ruiz, 952
Fernando Antonio Álvarez-Ortiz, 141
Fidel Rodríguez, 335
Francisco Antonio Villa-Navarro, 556
Francisco Gaba, 335
Francisco J. Díaz, 484
Froilán Tanguila, 335
Gabriel de Jesús Bedoya, 8
Gabriel Martínez, 668
Germán Bayona, 177
Giomar Borrero-Pérez, 135
Gladys Eliana Botello, 904
Gonzalo Andrade, 738
Gonzalo Medina, 1045
Guillermo A. González, 51
Guillermo Duque, 571
Gustavo Adolfo Vallejo, 765
Hamilton Julián Barbosa, 765
Héctor Aponte, 352, 962
Hector Castro, 270
Héctor E. Ramírez-Chaves, 520, 541, 722, 868, 882
Héctor F. Arias-Monsalve, 868
Helena Groot, 739
Henry Pantí, 1008
Hernán Álvarez, 81
Hugo Mantilla-Meluk, 520, 541
Humberto Mendoza-Cifuentes, 329
Israel Espinoza, 400
Iteca Enqueri, 335
Iván Jácome-Negrete, 335
Ivon Dorado, 1045
Ivonne J. Garzón-Orduña, 197
J. Gregorio Portilla, 678, 822
J. Orlando Rangel-Ch., 185, 281
Jahir Orozco, 221
Jairo Arbey Rodríguez, 72
Jairo E. Romero-Paz, 315
Jairo Lizarazo, MD FACP, 729
Jairo Pinto-Zárate, 281
Jairo Roa-Rojas, 72
James E. Richardson, 301
Javier A. Montoya, 37
Javier Muñoz-Garay, 520, 541
Jesús Leonardo Soto-Summano, 141
Jhon Restrepo, 977
Jhonier Andrés Guevara-Cáceres, 837
John Jairo Pías-Barragán, 807
Jorge Molina, 591
Jorge Quirós-Rodríguez, 135
José Abel Flores, 412
José Daniel Giraldo, 943
José Iannacone, 849
José J. Henao-Osorio, 868
José Luis Batún, 1008
José Luis Fernández Alonso, 740
José Otálora-Acevedo, 72
José Tavera, 181
José Vivas-Sánchez, 571
Juan Azorín-Nieto, 141
Juan C. Maya, 81
Juan Camilo Buitrago-Casas, 445
Juan Carlos Martínez Oliveros, 445
Juan David Hernández, 270
Juan David Ramírez, 765
Juan Gabriel León-Hernández, 837
Juan Gabriel Ramírez, 101
Juan Guillermo McEwen, 439, 727, 1063
Juan Restrepo, 977
Juan Sebastián Jaramillo-Ríos, 904

- Juan Sebastián Ospina, 556
Juana Ángel, 1061
Julián A. Rojas-Morales, 868
Julián A. Zúñiga, 785
Julián Correa, 151
Juliana Palacio-Betancur, 654
Julio César Carranza, 765
Kennet J. Rueda-Espinosa, 242
L. Santiago Caicedo-Martínez, 868
Laura Cristina Calderon-Díaz, 904
Laura Rojas-Aguadé, 385
Leidy Johanna Sánchez-Alzate, 520, 541
Leonardo Palacios-Duque, 347
Lina Paola Garzón, 889
Liseth Paola Piñeros-U., 301
Lorena Marín, 101
Luis F. García, 484, 741
Luis Fernando Echeverri, Ph. D., 453
Luis Fernando Muñoz-Martínez, 72
Manuel N. Chaur, 668
Margarita Velásquez, 8
María Elena Gómez, 101
María Mercedes Zambrano, 1065
- Marion Weber, 943, 952
Mauricio Vinasco-Téllez, 242
Moisés Wassermann, 742
Natalia Hoyos, 977
Nelcy Y. Ortiz-Rodríguez, 281
Nelson Alejandro Lozano-Mendoza, 604
Nelson Vera-Villamizar, 259
Nestor Crisanto-Rojas, 849
Néstor Hernando Campos-Campos, 604
Néstor Roncancio-Duque, 882
Oliver Saavedra, 400
Onguine Nemquimo, 335
Orlando J. Katime-Santrich, 259
Oscar Mauricio Gómez, 439
Pedro Hernandez-Rizzo, 693
Pedronel Araque, 8
Rafael Robayo-Salazar, 505
Ramón Salazar-Quevedo, 122
Raúl Trejos-Tamayo, 925
Robert Lücking, 619
Roberto Sánchez, 281
Rocío Cortés-B., 301
Rogelio Roberto Muñoz-Li, 122
- Román Castañeda, 795
Ronald Chavez, 962
Rubén Cool, 1008
Ruby Mejía-de-Gutiérrez, 505
Samia-del-Mar Yela-Lara, 996
Samuel Tomas, 400
Sandra Y. Galván-Carvajal, 281
Santiago Vargas-Domínguez, 242, 445
Sara Castellanos, 335
Sebastián Cuadrado-Ríos, 520, 541
Sebastián O. Montilla, 520, 541
Sebastián Vásquez-Palacios, 520, 541
Sebastián Zapata, 904
Sol Jiménez, 8
Sonia Valle-Rubio, 352
Tania Pineda-Enríquez, 135
Victor Valencia, 904
William Oswaldo Sosa-Correa, 72
William Valencia-Saavedra, 505
Yamid Bermudez-Tobón, 693
Yazmín Suarez, 765
Yesid Alvarez, 8
Yully F. Contreras-Rueda, 315

Índice de artículos - Index of Articles

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Volumen 47, números 182, 183, 184 y 185.

Ciencias Biomédicas Biomedical Sciences	Artículo original	
	Modelamiento molecular y análisis estructural de la variante I684S en la enzima TYK2 y su relación con la propensión a la psoriasis	
	Molecular modeling and structural analysis of variant I684S in the TYK2 enzyme and its relation with the susceptibility to psoriasis	8
	Review article	
	Nanoscience, nanotechnology, and disruptive technologies in the context of precision medicine	
Nanociencia, nanotecnología y tecnologías disruptivas en el contexto de la medicina de precisión	221	
	Artículo original	
	La tolerancia inmunitaria a las infecciones virales en murciélagos y su relación con las pandemias	
	Immune tolerance to viral infections in bats and its relation with pandemics	484
	Artículo original	
	La respuesta inmune de algunas especies del género <i>Rhodnius</i> modifica la circulación de genotipos de <i>Trypanosoma cruzi</i> y <i>T. rangeli</i> en varias regiones de América Latina	
	The immune response of some <i>Rhodnius</i> species modifies <i>Trypanosoma cruzi</i> and <i>T. rangeli</i> genotype circulation in several Latin American regions	765
Ciencias del Comportamiento Behavioral Sciences	Artículo de revisión	
	La evolución, la percepción y los mecanismos cerebrales implicados en el atractivo facial: un análisis desde la Psicología Evolucionista	
Evolution, perception, and brain mechanisms involved in facial attractiveness: An analysis from an evolutionary psychology perspective	22	
Ciencias Físicas Physical Sciences	Original article	
	Estimation of suitable upper-limits for temperature, in stability comparisons between solid phases at high pressures. Study cases: carbon, oxygen, and fluorine	
	Estimación de valores máximos razonables de temperatura, para comparaciones de estabilidad entre fases sólidas a altas presiones. Casos de estudio: carbono, oxígeno y flúor	37
	Artículo original	
Cohomología de Čech y Cuantización Topológica de Parámetros Físicos		
Čech Cohomology and Topological Quantization of Physical Parameters.....	51	
	Original article	
	Theoretical study of structural stability and electronic properties of $\text{Sr}_2\text{MnSbO}_6$ perovskite	
Estudio teórico de la estabilidad estructural y propiedades electrónicas de la perovskita $\text{Sr}_2\text{MnSbO}_6$	72	

<p>Ciencias Físicas Physical Sciences</p>	Original article	Chemical process modelling from a micro to a macro approach: Closing the gap	
		Modelado de procesos químicos desde un enfoque micro a uno macro: cerrando la brecha	81
	Artículo original	Fenómenos interfaciales en multicapas y superredes magnéticas: revisión y perspectivas	
		Interfacial phenomena in multilayers and magnetic superlattices: review and perspectives	101
	Original article	Illuminating the threat: a decade-long analysis of light pollution in Colombian main urban centers through satellite imagery	
		Iluminando la amenaza: análisis de una década de contaminación lumínica en los principales centros urbanos de Colombia mediante imágenes satelitales	242
	Artículo original	Análisis espectroscópico de estrellas enanas y gigantes en los cúmulos abiertos IC 2391 y NGC 6475	
		Spectroscopic analysis of dwarf and giant stars in the open clusters IC 2391 and NGC 6475	259
	Artículo original	Caracterización del desempeño de una celda de punto fijo de indio (In) y estimación de incertidumbre de medición debido a la repetibilidad de la transición de fase de solidificación	
		Characterization of the performance of an Indium (In) fixed-point cell and estimation of the uncertainty measurement due to the phase transition repeatability	270
	Artículo original	Residuos de construcción y demolición como materia prima de concretos y elementos de construcción obtenidos mediante activación alcalina	
		Construction and demolition waste as raw material for concrete and construction elements obtained through alkaline activation	505
	Artículo original	Análisis teórico de la incidencia del vector de magnetización en el plano de la barrera sobre la TMR a temperatura cero	
		Theoretical analysis of the incidence of the magnetization vector in the barrier plane on TMR at zero temperature	785
	Original article	Geometric uncertainty in non-paraxial interference	
	Incertidumbre geométrica en interferencia no-paraxial	795	
Original article	Influence of the temperature on the band-gap energy of reduced graphene-oxide nanoplatelets described with the Varshni model		
	Influencia de la temperatura en la brecha energética de nanoplaquetas de óxido de grafeno reducido según el modelo de Varshni	807	
Artículo original	Información astronómica en la primera publicación periódica del Nuevo Reino de Granada		
	Astronomical information in the first periodical of the New Kingdom of Granada	822	
Artículo original	Ajuste de los modelos de velocidad de transferencia de gases en el embalse tropical andino Porce III		
	Adjustment of gas transfer velocity models in the tropical Andean reservoir Porce III	837	

Artículo original

Área climática adecuada para tres especies de *Phlegmariurus* (Lycopodiaceae) en Cuba: distribución potencial y áreas prioritarias para la conservación

Suitable climatic area for three species of *Phlegmariurus* (Lycopodiaceae) in Cuba: potential distribution and priority areas for conservation 122

Artículo original

Primer registro de la estrella quebradiza *Hemipholis cordifera* (Echinodermata: Ophiuroidea) en Colombia, con algunas notas ecológicas

First record of brittle star *Hemipholis cordifera* (Echinodermata: Ophiuroidea) for Colombia, with some ecological notes 135

Original article

Study of non-ionizing radiation emissions in two zones of Xochimilco, México City

Estudio de las emisiones de radiación no ionizante en dos zonas de Xochimilco, Ciudad de México 141

Artículo original

Sinopsis del género *Micropholis* (Sapotaceae) en Colombia y clave para la identificación de sus especies

A synopsis of the genus *Micropholis* (Sapotaceae) in Colombia with an identification key 301

Original article

Contributions to the biodiversity of Echinoderms (Echinodermata) in the Department of Atlántico, Caribbean Sea, Colombia

Contribuciones a la biodiversidad de los equinodermos en el departamento del Atlántico, mar Caribe de Colombia 315

Artículo original

Una nueva especie de *Chaetolepis* (Melastomeae, Melastomataceae) en Bogotá, Colombia

A new species of *Chaetolepis* (Melastomeae, Melastomataceae) in Bogotá, Colombia 329

Artículo original

Riqueza y abundancia de Tinamiformes, Galliformes, Columbiformes y Gruiformes en la comunidad waodani de Toñampade, Amazonía ecuatoriana: una aproximación inicial por fototrampeo

Richness and abundance of Tinamiformes, Galliformes, Columbiformes and Gruiformes in the waodani community of Toñampade, Ecuadorian Amazon: an initial approach by camera trapping 335

Comunicación breve

La presencia de *Sloanea multinervis* (Elaeocarpaceae) en Colombia

Presence of *Sloanea multinervis* (Elaeocarpaceae) in Colombia 347

Artículo original

Un nuevo humedal artificial en la costa central de Perú: primera caracterización de su avifauna

A new artificial wetland in the central coast of Perú: First characterization of its avifauna 352

Artículo original

Los mamíferos del Quindío, Colombia. I. Reseña histórica sobre el desarrollo de la mastozoología

Mammals of the department of Quindío, Colombia. I. Historical review on the development of mammalogy 520

Artículo original

- Los mamíferos del Quindío, Colombia. II. Patrones de diversidad y lista anotada de especies**
Mammals of the Department of Quindío, Colombia. II. Diversity patterns and annotated checklist 541

Artículo original

- Estructura y diversidad de las comunidades ícticas a lo largo de un gradiente longitudinal en ríos costeros de la Sierra Nevada de Santa Marta**
Structure and diversity of fish communities along a longitudinal gradient in coastal rivers of the Sierra Nevada de Santa Marta 556

Artículo original

- Ecología trófica y consumo incidental de microplásticos en peces (Sciaenidae) y su relación con la dinámica ambiental en la bahía de Tumaco, Pacífico colombiano**
Trophic ecology and incidental ingestion of microplastics in fish (Sciaenidae) and its relationship with environmental dynamics in Tumaco Bay, Colombian Pacific 571

Original article

- Spectral sensitivity of the compound eyes and behavioral attraction to light stimuli with different intensities and wavelengths in *Lucilia sericata* (Meigen, 1826) from Colombia**
Sensibilidad espectral de los ojos compuestos y atracción conductual a estímulos lumínicos con diferentes intensidades y longitudes de onda en *Lucilia sericata* (Meigen, 1826) de Colombia 591

Artículo original

- Variabilidad fenotípica en la población de la jaiba invasora *Charybdis hellerii* (Milne-Edwards, 1867) (Decapoda: Portunidae) en el margen continental del Caribe colombiano**
Phenotypic variability in the population of the invasive crab *Charybdis hellerii* (Milne-Edwards, 1867) (Decapoda: Portunidae) in the continental margin of the Colombian Caribbean 604

Original article

- Three new lobarioid lichens (lichenized Ascomycota: Peltigeraceae) from Colombia in memory of Enrique Forero**
Tres nuevos líquenes lobarioides (Ascomycota liquenizados: Peltigeraceae) de Colombia en memoria de Enrique Forero 619

Artículo original

- Variación genética de los rasgos de crecimiento y las características de la madera en razas locales de *Gmelina arborea* Roxb. en el alto Magdalena, Colombia**
Genetic variation of growth traits and wood characteristics among landraces of *Gmelina arborea* Roxb. in the upper Magdalena, Colombia 641

Artículo original

- Evaluación del impacto de la acidificación en la calidad del agua de la quebrada Quilcayhuanca, Ancash, Perú**
Evaluation of the impact of acidification on the water quality of Quebrada Quilcayhuanca, Ancash, Perú 849

Original article

- Historical perspective and state of knowledge of the non-avian reptiles (Vertebrata: Sauropsida) of the Department of Caldas, Central Andes of Colombia**
Perspectiva histórica y estado del conocimiento de los reptiles no aviares (Vertebrata: Sauropsida) en el departamento de Caldas, Andes centrales de Colombia 868

Ciencias Naturales Natural Sciences	Original article	Beyond hippos: Evidence of an introduced deer in Colombia	
		Más allá de los hipopótamos: evidencia de un venado introducido en Colombia	882
	Original article	Analysis of the distribution and abundance of two species of cat's claw (<i>Uncaria</i> sp.) based on the knowledge of Tikuna indigenous communities in the southern Colombian Amazon	
	Análisis de la distribución y abundancia de dos especies de uña de gato (<i>Uncaria</i> sp.) con base en el conocimiento de comunidades indígenas Tikuna del sur de la Amazonia colombiana	889	
Ciencias Químicas Chemical Sciences	Artículo original	Análisis DFT de fosforeno y fosforeno oxidado como materiales adsorbentes de Cu²⁺ a partir de una solución acuosa	
		DFT analysis of phosphorene and oxidized phosphorene as Cu ²⁺ adsorbent materials from aqueous solution	151
	Original article	Rainwater chemistry of a developing urban-industrial metropolis in Southeast Nigeria	
	Química del agua de lluvia de una metrópoli urbano-industrial en desarrollo en el sureste de Nigeria	371	
Ciencias de la Tierra Earth Sciences	Artículo original	Evaluación computacional de las interacciones de compuestos naturales y el dominio unión al ARN de las nucleolinas utilizando acoplamiento molecular y simulaciones de dinámica molecular	
		Computational evaluation of the interactions of natural compounds with the RNA binding domain of nucleolins using molecular docking and molecular dynamics simulations	385
	Original article	Poly(lactic acid): Synthesis, modification and applications in controlled drug delivery	
	Poli(ácido láctico): síntesis, modificación y aplicaciones en el transporte controlado de medicamentos	654	
Ciencias de la Tierra Earth Sciences	Original article	Design, synthesis, and electrochemical studies of a new [60]fullerene pyrrolidine as a precursor for the construction of supramolecular systems	
		Diseño, síntesis y estudios electroquímicos de una nueva [60]fullero pirrolidina como precursora para la construcción de sistemas supramoleculares	668
	Artículo original	Predicción del ciclo solar 25 mediante modelos ARIMA y redes neuronales LSTM	
	Prediction of solar cycle 25 using ARIMA models and LSTM neural networks	400	
Ciencias de la Tierra Earth Sciences	Review article	Paleopalynology in Colombia: A review	
		Paleopalinología en Colombia: una revisión	412
	Artículo original	Evolución de la teoría geocéntrica del movimiento del Sol y su uso en la primera circunnavegación del mundo	
	Evolution of the geocentric theory of the Sun's movement and its use in the first circumnavigation of the world	678	

Nota editorial/Editorial note	902
Original article	
Miocene paleogeography of northwest Colombia: A review of the sedimentary and magmatic evolution of the Amagá Basin a century after Grosse's work Paleogeografía del Mioceno en el noroccidente de Colombia: una revisión de la evolución sedimentaria y magmática de la cuenca de Amagá un siglo después del trabajo de Grosse	904
Original article	
Eocene to Miocene palynology of the Amagá Basin (Cauca Valley, Colombia) compared to the Caribbean Region Palinología del Eoceno al Mioceno de la cuenca de Amagá (Valle del Cauca, Colombia) comparada con la Región Caribe	925
Original article	
Fossil leaves, woods, gastropods, and a crocodile tooth: Is the Amagá Formation worth exploring? Fósiles de hojas, maderas, gasterópodos y un diente de cocodrilo, ¿vale la pena explorar la Formación Amagá?	943
Essay	
Deciphering the footprint of Emil Grosse from Germany to Brazil: a brief review Siguiendo la huella de Emil Grosse entre Alemania y Brasil: una breve reseña	952
Artículo original	
Carbono en el Pacífico sudamericano: reservas en comunidades vegetales de un humedal costero en Perú Carbon in the South American Pacific: discovering the reserves in vegetal communities of a coastal wetland in Perú	962
Artículo original	
Dinámicas espacio-temporales de la deforestación en los municipios de Riosucio y Río Quito, Chocó, Colombia Spatial and temporal dynamics of deforestation in Riosucio and Río Quito municipalities, Chocó, Colombia	977
Artículo original	
Dinámicas de cambio de las coberturas del suelo y su impacto en el sector suroriental de Pasto, Colombia Dynamics of land cover change and its impact in the southeastern sector of Pasto, Colombia	996
Artículo original	
Comparación numérica de métodos tipo Newton generalizado y el algoritmo extragradiante para el problema de complementariedad no lineal Numerical comparison of generalized Newton-type methods and the extragradient algorithm for the nonlinear complementarity problem	160
Artículo original	
La función zeta sobre superficies abstractas de Riemann: Un primer acercamiento The zeta function on abstract Riemann surfaces: A first approach	693

Matemáticas
Mathematics

Original article

Analysis of academic trajectories of higher education students by means of an absorbing Markov chain

Análisis de las trayectorias académicas de estudiantes de educación superior utilizando una cadena de Markov absorbente 1008

Artículo original

Conjuntos Sidon en Contextos Finitos

Sidon Sets in Finite Contexts 1024

Original article

On the Kronecker problem and partially ordered sets with involution

Sobre el problema de Kronecker y conjuntos parcialmente ordenados con involución 1045

Ensayo/ Essay

Alfred Russel Wallace: el evolucionista controversial

Alfred Russel Wallace: The controversial evolutionist 172

Secuenciación de genomas utilizando lectura de cadenas largas

Genome sequencing using long-read sequencing 439

El Grupo de Astrofísica Solar (GoSA) del Observatorio Astronómico Nacional de Colombia: 10 años indagando sobre la ciencia del Sol

The Group of Solar Astrophysics (GoSA) of the National Astronomical Observatory of Colombia: 10 years exploring the science of the Sun 445

Rosalind Franklin: un caso para analizar con enfoque de género

Rosalind Franklin: A case to analyze with a gender approach 716

El Premio Nobel de Fisiología o Medicina 2023

The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2023 1061

Opinión/ Opinion

The Anthropocene, should it be a new geological time unit?

El Antropoceno, ¿debería ser una nueva unidad geológica de tiempo? 177

¿Y para qué dos mares?

Two seas for what? 181

Tres lecciones: de azules, biodiversidad, acceso y otras yerbas apropiables

Three lessons: blues, biodiversity, access and other appropriable weeds 453

Entre mitos y conceptos erróneos: el caso del microbioma

Between myths and misconceptions: the case of the microbiome 1065

Comentario bibliográfico/ Bibliographic commentary

Ancestors in Evolutionary Biology, linear thinking about Branching Trees

Ancestros en Biología Evolutiva, pensamiento lineal sobre árboles ramificados 197

El Código de la Vida, Jennifer Doudna, la edición genética y el futuro de la especie humana de Walter Isaacson	
The Code Breaker: Jennifer Doudna, Gene Editing, and the Future of the Human Race	727
Diagnóstico y tratamiento de infecciones por hongos, tercera edición, 2023	
Diagnosis and Treatment of Fungal Infections, third edition, 2023	729
Breaking Through: My Life in Science	
Rompiendo avances: mi vida en la ciencia	1063
Club de revistas/Journal Club	
La flor más grande conservada en ámbar	
The largest amber-preserved flower revisited	185
Análisis biomoleculares permiten nuevos conocimientos sobre el embalsamamiento egipcio antiguo	
Biomolecular analysis increase our knowledge on ancient Egypt embalming	188
De la inmunidad a la autoinmunidad: 10.000 años de evolución de la respuesta inmune en los seres humanos	
From immunity to autoimmunity: 10,000 years of evolution of the immune response in humans	191
La transparencia como estrategia adaptativa	
Transparency as an adaptive strategy	194
Proyecto Zoonomia: los genomas de cientos de mamíferos dan pistas claras sobre su evolución	
Zoonomia Project: Genomes of hundreds of mammals give clear clues about their evolution	456
<i>The Bat Lands</i>, un proyecto que busca explorar áreas potenciales de brotes zoonóticos mediados por murciélagos	
The Bat Lands: a project that seeks to explore potential areas of zoonotic outbreaks mediated by bats	722
Semblanza/Profile	
La Academia soy yo: el liderazgo de Enrique Forero	
I am the Academy: the leadership of Enrique Forero	731
Enrique Forero y su legado a las mujeres científicas colombianas	
Enrique Forero and his legacy on Colombian scientific women	733
Remembranza	
Remembrance	734
Una carta para Enrique Forero	
A letter for Enrique Forero	735
Enrique Forero G.: su gran legado	
Enrique Forero G.: his legacy	736
Enrique Forero: su paso a paso por diversas instituciones	
Enrique Forero: his step by step through various institutions	738

Enrique Forero	
Enrique Forero	739
Profesor Enrique Forero, toda una vida dedicada a las plantas y a la investigación en Colombia	
Professor Enrique Forero, a lifetime dedicated to plants and research in Colombia	740
El Enrique Forero que conocí	
The Enrique Forero I met	741
Enrique Forero	
Enrique Forero	742
In Memoriam	
Carlos Eduardo Vasco Uribe	460

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.

