



ISSN 0370-3908 · eISSN 2382-4980

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





ISSN 0370-3908 · eISSN 2382-4980

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

Vol. 48 · Número 189 · Págs. 715-1012 · Octubre - Diciembre de 2024 · Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editora

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

Asistente editorial Carolina Acosta

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

Editores asociados

Ciencias Biomédicas

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

Ciencias del Comportamiento

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

Ciencias Físicas

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

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

Ciencias Naturales

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

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

Ciencias Químicas

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

Ciencias de la tierra

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

Matemáticas

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

Comité científico internacional

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

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

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

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

Periodicidad: trimestral
Fecha de inicio: 1936

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

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

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



ISSN 0370-3908 · eISSN 2382-4980

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

Vol. 48 · Número 189 · Págs. 715-1012 · Octubre - Diciembre de 2024 · Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Ciencias del Comportamiento Behavioral Sciences

Artículo original

Primeras fechas arqueológicas tempranas en la sierra de Nariño (Colombia): asentamientos humanos y actividad del volcán Galeras

First early archaeological dates in the Sierra of Nariño (Colombia):
Human settlements and activity of the Galeras volcano

*Felipe Cárdenas-Arroyo, Víctor González-Fernández, Alejandro Bernal-Vélez,
Daniel Alejandro Gómez, Natalia Acevedo Gómez* 723

Original article

Effect of granularity on the superconducting parameters of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconducting material

Efecto de la granularidad en los parámetros superconductores del material
superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

*Ibrahim Torres-Mahmud, Nicolás Piragua-Ortiz, Eliana M. Vargas-Pineda,
David A. Landínez Téllez, Jairo Roa-Rojas* 742

Ciencias Físicas Physical Sciences

Artículo original

Desarrollo y evaluación de celdas fotovoltaicas orgánicas nanoestructuradas

Development and evaluation of nanostructured organic photovoltaic cells

*Jonathan Romero-Atencio, Andrea Carolina Ramos-Hernández, Mario Alberto Romero-Colange,
Jean Christian Guy-Bernede, Linda Cattin Guenadez, Guy Louarn,
Gean Carlos Arteaga-Arroyo* 752

Original article

Quantum operator for non-paraxial single photon interference

Operador cuántico para la interferencia no-paraxial con fotones individuales

Román Castañeda, Camilo Hurtado 768

Artículo original

Determinación de los parámetros orbitales subyacentes en las efemérides solares de Abraham Zacuto

Determination of the underlying orbital parameters in Abraham Zacuto's solar ephemerides

J. Gregorio Portilla 784

Artículo original

Notas sobre la ecología poblacional de *Pholidobolus montium* (Sauria: Gymnophthalmidae) en una localidad de Mulaló, Ecuador

Notes on the population ecology of *Pholidobolus montium* (Sauria: Gymnophthalmidae) in a locality of Mulaló, Ecuador

Salomón M. Ramírez-Jaramillo 797

Artículo original

La vegetación de los páramos de Chile y del nevado del Quindío, Colombia

The vegetation of the páramos of Chile and Nevado del Quindío (Colombia)

J Orlando Rangel-Ch, Jairo H. Pinto-Z, James L. Luteyn 807

Original article

Diversity and phorophyte preferences of lichens in the Cerro Machín volcano cloud forest (Tolima, Colombia)

Diversidad y preferencias de forófito de los líquenes en el bosque de niebla del volcán Cerro Machín, Tolima, Colombia

Diego Rincón-Murillo, Diego Simijaca, Héctor Esquivel, Robert Lücking, Bibiana Moncada 831

Artículo original

Condición de la población de *Ageneiosus pardalis* (Siluriformes: Auchenipteridae) en el río Tuira, Panamá

Condition of the *Ageneiosus pardalis* (Siluriformes: Auchenipteridae) population in the Tuira River, Panama

Samuel Valdés-Díaz, Humberto Garcés B., Francisco Barahona, Indra Candanedo 852

Artículo original

Desarrollo de un modelo dinámico mecanicista para predecir el crecimiento de cuyes (*Cavia porcellus*) machos del genotipo Perú

Development of a mechanistic dynamic model to predict the growth of male Perú genotype guinea pigs (*Cavia porcellus*)

William Armando Tapie, Sandra Lucía Posada-Ochoa, Jaime Ricardo Rosero-Noguera, Rafael Muñoz-Tamayo 859

Artículo original

Escenarios y alternativas de restauración ecológica en paisajes andinos degradados: el caso de la cuenca alta del río Bogotá (Suesca, Cundinamarca)

Scenarios and alternatives for ecological restoration in degraded Andean landscapes: the case of the upper basin of the Bogotá River (Suesca, Cundinamarca)

Esperanza Ruiz-Marín, Alejandro Peña, Sabina Alejandra Hernández-Abril, Lina María Pachón-Blanco, Orlando Vargas-Ríos, Nelly Rodríguez-Eraso 871

Artículo original

Análisis multitemporal de la frecuencia de observación de *Phimosus infuscatus* (Threskiornithidae) en Colombia

Multi-temporal analysis in observation frequency of *Phimosus infuscatus* (Threskiornithidae) in Colombia

Valentina Ramos-Mosquera, Edwin O. López-Delgado 886

Artículo original

Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XII. Nuevas especies de *Matisia* de Colombia y Panamá

Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XII. New species of *Matisia* from Colombia and Panamá

José Luis Fernández-Alonso, Ernesto Campos-Pineda 897

Original article

A Late Holocene Lecythidaceae wood record from Valle del Cauca, Colombia

Registro de madera de Lecythidaceae del Holoceno tardío en el Valle del Cauca, Colombia

Diana Karen Pérez-Lara, Camila Martínez, Camila Pizano, Carlos Jaramillo, Víctor Vásquez 922

Artículo original

Una nota acerca del método de la función inversa de codificación de redes

A note on the inverse function method for network coding

Victor Peña-Macías 936

Ensayo/ Essay

Nobel 2024 en Fisiología o Medicina para los microARN

Nobel 2024 in Physiology or Medicine for microRNAs

Moisés Wasserman, Ph.D. 952

Premio Nobel de Química 2024

Nobel Prize in Chemistry 2024

Juan Guillermo McEwen MD. Ph.D. 955

El camino hacia una memoria asociativa del conocimiento humano

The road to an associative memory of human knowledge

Andrés Pérez-Uribe. 957

El Nobel de Economía concedido a Daron Acemoglu y Simon Johnson, del Instituto Tecnológico de Massachussets, y James A. Robinson, de la Universidad de Chicago

The Nobel Prize in Economics was awarded to Daron Acemoglu and Simon Johnson of the Massachusetts Institute of Technology and James A. Robinson of the University of Chicago

Salomón Kalmanovitz 961

The first terror bird of Colombia: a giant rewriting the paleoecology and palaeobiogeography of La Venta Miocene

La primera ave del terror de Colombia: se reescribe la paleoecología y paleobiogeografía del Mioceno de La Venta

Jonathan S. Pelegrin 963

Opinión/ Opinion

La amenaza silenciosa de la deforestación química en los países amazónicos: un nuevo desafío para la conservación y la legislación ambiental

The silent threat of chemical deforestation in Amazonian countries: a new challenge for conservation and environmental legislation

Dolors Armenteras, Ph.D. 967

Reflexiones sobre por qué no trascendemos en ciencia y tecnología	
Reflections on why we do not transcend in science and technology	
<i>Horacio Torres Sánchez</i>	970
Microbial Solutions for Climate Change	
Soluciones microbianas para el cambio climático	
<i>María Mercedes Zambrano, Ph. D.</i>	977
Club de revistas/Journal Club	
Explorando la materia oscura microbiana	
Exploring microbial dark matter	
<i>María Mercedes Zambrano, Ph. D.</i>	982
La persistencia de la memoria	
The persistence of memory	
<i>John M. González MD, Ph. D.</i>	985
Agradecimientos	
Acknowledgements	988
Índice autores	
Authors Index	989
Índice de artículos	
Article Index	000
Enfoque y alcance	
Focus and Scope	000

Nuestra portada/ Our cover



La imagen presenta una composición visual de microfotografías y una muestra física que destacan características anatómicas de una madera fósil no mineralizada bajo diferentes aumentos. Las imágenes (a-h) ilustran detalles anatómicos como vasos, radios, fibras, parénquima, punteaduras y placas de perforación, vistos en cortes: transversal, tangencial y radial.

Características anatómicas de la madera momificada. **a.** Corte transversal (TS). Madera con porosidad difusa. **b.** TS. Vasos en múltiples radiales (flecha) y parénquima axial apotraqueal difuso, además de parénquima axial en bandas estrechas de hasta cinco células de ancho. **c.** Corte longitudinal tangencial (LTS). Elementos de vaso, placas de perforación simples (flecha negra) y tílides (flecha blanca). **d.** Punteaduras intervasculares alternas. **e.** LTS. Tílides (flecha negra), fibras septadas (flecha blanca), radios uniseriados y biseriados. **f.** LTS. Fibras no septadas (flecha blanca), hebras de parénquima (flecha negra) y radios uniseriados. **g.** Corte longitudinal radial (LRS). Radios heterogéneos con células del cuerpo procumbentes y, generalmente, una hilera de células marginales. **h.** Punteaduras vaso-radio con bordes reducidos, alargadas horizontalmente y similares a las punteaduras intervasculares (flecha). **i.** Madera fosilizada.

The image presents a visual composition of microphotographs and a physical sample highlighting the anatomical features of non-mineralized fossil wood under different magnifications. Images (a-h) illustrate anatomical details such as vessels, rays, fibers, parenchyma, pits, and perforation plates, observed in transverse, tangential, and radial sections.

Wood anatomical features of the mummified wood. **a.** Transverse section (TS). Diffuse porous wood. **b.** TS. Vessels in radial multiples (arrow) and axial parenchyma apotracheal diffuse, and axial parenchyma in narrow bands up to five cells wide. **c.** Longitudinal tangential section (LTS). Vessel elements, simple perforation plates (black arrow), and tyloses (white arrow) **d.** Alternate intervessel pitting. **e.** LTS. Tyloses (black arrow), septate fibers (white arrow), uniseriate rays and biseriate rays. **f.** LTS. Non-septate fibers (white arrow), parenchyma strands (black arrow) and uniseriate rays. **g.** LRS. Heterogeneous with procumbent body cells and usually one marginal row. **h.** vessel-ray parenchyma pitting with reduced borders, horizontally elongate and similar to intervessel pits (arrow). **i.** fossilized wood.

Carlos Alberto Jaramillo, Ph. D.

Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá
Editor asociado Revista de la Academia Colombiana de Ciencias,
Exactas, Físicas y Naturales

Referencia/Reference

Pérez-Lara, DK., Martínez, C., Pizano, C., Jaramillo, C., Vásquez, V. (2024). A Late Holocene Lecythidaceae wood record from Valle del Cauca, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 48(189), 922-935. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.3085>

Ciencias del Comportamiento

Artículo original

Primeras fechas arqueológicas tempranas en la sierra de Nariño (Colombia): asentamientos humanos y actividad del volcán Galeras

First early archaeological dates in the Sierra of Nariño (Colombia): Human settlements and activity of the Galeras volcano

✉ Felipe Cárdenas-Arroyo^{1,2,*}, ✉ Víctor González-Fernández³, ✉ Alejandro Bernal-Vélez¹,
✉ Daniel Alejandro Gómez⁴, ✉ Natalia Acevedo Gómez⁵

¹ Grupo Norandinos, Bogotá, Colombia

² Peabody Museum Research Affiliate, Boston, Estados Unidos

³ Instituto Colombiano de Antropología e Historia, Bogotá, Colombia

⁴ Investigador independiente, Manizales, Colombia

⁵ Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín

Resumen

En este trabajo presentamos los resultados de las excavaciones arqueológicas adelantadas en el municipio de Consacá, vereda Bajo Bomboná, en el departamento de Nariño (Colombia), donde se evidenció la presencia de asentamientos humanos fechados por radiocarbono a partir del segundo milenio a.C. Este sitio temprano se caracteriza por la presencia de artefactos de obsidiana y la ausencia de cerámica asociada a ellos. El origen de esta obsidiana es la fuente natural de Mullumica, en Ecuador y, posiblemente, también de fuentes naturales de obsidiana del complejo volcánico de Sotará (Cauca/Huila). Su presencia en Nariño no se debe a un fenómeno geológico sino a su transporte por parte de personas hace cuatro milenios. En las excavaciones también se evidenció la contemporaneidad de la actividad del volcán Galeras y otros fenómenos geológicos caóticos con la presencia de poblaciones humanas asentadas en el curso medio del río Guáitara en los siglos X y XI d.C. La evidencia arqueológica sugiere que el territorio ha estado ocupado por poblaciones humanas durante cuatro mil años. Los análisis petrográficos realizados tanto en la cerámica, fechada mediante termoluminiscencia en época más tardía, como en los artefactos líticos distintos de la obsidiana sugieren que las materias primas que se usaron en su fabricación son de origen local.

Palabras clave: Cronología; Actividad volcánica; Asentamientos humanos; Consacá.

Abstract

Here, we present the results of the archaeological excavations carried out in the municipality of Consacá, Bajo Bomboná, department of Nariño (Colombia), where we evidenced the presence of human settlements dated by radiocarbon to the second millennium BC. Obsidian artifacts with no associated pottery characterize this early site. The origin of the obsidian is the natural source of Mullumica, in Ecuador, and possibly also from natural obsidian sources of the Sotará Volcanic Complex (Cauca/Huila). The presence of this obsidian in Nariño is not due to a geological phenomenon but to its transportation by people four millennia ago. The excavations also showed the contemporaneity of the activity of the Galeras Volcano and other chaotic geological phenomena with the presence of human populations living in the area of the middle Guáitara River during the 10th and 11th centuries AD. Archaeological evidence suggests that human populations have occupied the territory for 4,000 years. Petrographic analyses carried out on both the pottery—dated by thermoluminescence to a later period—and on the lithic artifacts other than obsidian suggest that the raw materials used in their manufacture have a local origin.

Keywords: Chronology; Volcanic activity; Human settlements; Consacá.

Citación: Cárdenas-Arroyo F, *et al.* Primeras fechas arqueológicas tempranas en la sierra de Nariño (Colombia): asentamientos humanos y actividad del volcán Galeras. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(189):723-741, octubre-diciembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.3102>

Editor: Carlos Alberto Jaramillo Muñoz

***Correspondencia:**

Felipe Cárdenas Arroyo;
felipeca2@aol.com

Recibido: 5 de noviembre de 2024

Aceptado: 26 de noviembre de 2024

Publicado en línea: 10 de diciembre de 2024



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

Introducción

El estudio de la cronología arqueológica del departamento de Nariño se ha venido actualizando con investigaciones recientes en diferentes lugares del departamento (**Cárdenas-Arroyo**, 2020; **Mendoza-Acosta et al.**, 2023; **Maya-Cabrera**, 2024;). Actualmente la información cronológica disponible corresponde a dos regiones: la costa del Pacífico y la Sierra, ambas con una serie de fechas radiocarbónicas provenientes de muestras obtenidas mediante excavaciones científicas y también de materiales gaaqueados. Aunque son pocas, las de la costa sirven para construir una cronología arqueológica en el contexto del complejo La Tolita-Tumaco, pues coinciden con procesos de cambio sociocultural a lo largo del tiempo. Estos procesos se han reconstruido a partir de los resultados de las excavaciones estratigráficas que se realizaron desde la década de 1950 en cercanías y alrededores de Tumaco (**Cubillos**, 1955; **Reichel-Dolmatoff**, 1961, 1962, 1986; **Bouchard**, 1989, 1996; **Patiño**, 1991, 1993); allí la cerámica excavada se halló en estratos culturales comparables a los de La Tolita en Ecuador, ya que la región arqueológica de Tumaco pertenece a esta misma manifestación cultural (**Valdéz**, 1987; **Bouchard**, 1996). Así, el área de interés se extiende desde La Tolita hasta Buenaventura, lo que suministra un buen corpus de información y varios puntos de referencia para fines comparativos. Ello permitió asociar los cambios observados en la cerámica de la costa con fechas radiocarbónicas absolutas y organizarlos en una cronología que va de más antigua a más reciente con base en el principio de superposición estratigráfica.

A inicios de la década de 1960, el Institute of Andean Research (IAR) llevó a cabo un ambicioso proyecto de investigación arqueológica en la costa pacífica desde Mesoamérica hasta Ecuador. Su objetivo principal era determinar la presencia de sociedades del período Formativo en las costas del continente americano, donde se creía que se habían desarrollado la agricultura y la producción de cerámica y establecido las primeras aldeas sedentarias. Este interés fue, en gran medida, impulsado por los hallazgos del sitio arqueológico Valdivia, en la costa de la provincia de Guayas, Ecuador (**Estrada**, 1956). La iniciativa explica por qué hoy contamos con una cronología para la costa nariñense, pero no para la sierra: el proyecto del IAR formuló una pregunta específica: averiguar si existía una secuencia cronológica del período Formativo en las zonas costeras de Suramérica, Centroamérica y México, y para responderla los métodos diseñados se centraron en la construcción de una cronología arqueológica.

El caso de la sierra, que abordamos aquí, fue totalmente distinto. La arqueología de la sierra nariñense surge, desafortunadamente, como respuesta a la actividad ilegal de la gaaquería. La llegada de arqueólogos al departamento de Nariño a inicios de la década de 1970 fue impulsada por la necesidad de intervenir para proteger el patrimonio arqueológico de la nación, una iniciativa liderada por el Instituto Colombiano de Antropología. Se buscaba frenar el saqueo de las célebres tumbas descubiertas en los municipios de Ipiales y Pupiales, en el sur del departamento (**Morales-Gómez**, 1985; **Groot-de Mahecha**, 2019). La arqueología de contextos funerarios suministra evidencias limitadas sobre los procesos culturales que ocurrieron a lo largo de períodos prolongados debido a la ausencia de estratigrafía cultural. A lo largo del tiempo, los arqueólogos han recopilado múltiples fechas de radiocarbono obtenidas en tumbas, pero estas resultan difíciles de comparar entre sí, lo que dificulta aún más la posibilidad de proponer una cronología secuencial para la sierra, ya que dichas fechas no están vinculadas a una estratigrafía natural. Por ello la arqueología de la sierra nariñense ha construido la cronología de las sociedades prehispánicas serranas con base en una seriación cerámica armada a partir de materiales gaaqueados y excavados en los alrededores de la población ecuatoriana de San Gabriel (**Francisco**, 1969). Aunque sin duda aquella fue una propuesta valiosa en su momento, la secuencia de Francisco tiene ya 55 años y los nuevos hallazgos arqueológicos en Nariño sugieren que debe ser revisada. Su mayor limitación, sin embargo, es que solamente tiene en cuenta la cerámica decorada que pertenece a tres estilos decorativos conocidos como Capulí, Piartal y Tuza que vienen de contextos funerarios, pero deja a la cerámica utilitaria

no decorada por fuera de su esquema, y es ésta la que se encuentra mayoritariamente en las excavaciones arqueológicas. Resolver el problema de esta secuencia temporal ha sido uno de los objetivos clásicos de la arqueología nariñense desde hace más de cinco décadas, lo que ha dejado de lado la búsqueda de otros aspectos que incumben directamente al tema de la cronología y el origen de las sociedades prehispánicas de esta región del país.

En este corto ensayo presentamos las primeras fechas tempranas correspondientes a la sierra nariñense. Específicamente para la cuenca media del río Guaitara sugerimos aquí una secuencia cronológica que abarca desde el segundo milenio a.C. hasta la actualidad. Las fechas tempranas a las que haremos alusión son un milenio y medio anteriores a las más tempranas obtenidas hasta hoy para la arqueología de Tumaco, las cuales datan aproximadamente de los siglos VI o VII a.C. (2420±90 AP, cal 793-364 a.C.) (Patiño-Castaño, 2003) como lo indica el rango de fechas calibradas (calibradas con IntCal20, calculadas con OxCal v.4.4.4, octubre de 2024). Además, sugieren que hubo contactos y movimiento de personas entre el norte de Ecuador y Nariño hace más de cuatro milenios. Nuestras excavaciones arqueológicas se enmarcan en el proyecto titulado “Nariño: arqueología en áreas de habitación, distribución espacial y cronología (cuenca media del río Guaitara)” que busca entender cuál fue el patrón de asentamiento humano en la región antes del siglo XVI y la relación que tuvieron esos asentamientos con la actividad del volcán Galeras, así como determinar científicamente desde cuándo ha estado habitada esta región. Los resultados pueden servir de modelo para entender otras áreas arqueológicas de Nariño. El curso medio del río Guaitara se eligió para estas excavaciones porque amplía la información que ya existe en la vereda de San Rafael Bajo y Argüello Alto sobre asentamientos prehispánicos y su adaptación a la geomorfología en las cercanías del volcán Galeras. El material cerámico y la actividad volcánica son dos variables fundamentales para el estudio de la cronología de la zona. El proyecto está pensado por etapas (esta es la segunda) para así incluir una porción significativa del área cuyo eje central es el río Guaitara.

Materiales y métodos

Los materiales que sustentan nuestras interpretaciones fueron excavados arqueológicamente por nosotros en terrenos de la actual Hacienda San Antonio de Bomboná, departamento de Nariño (Figura 1). Estos materiales incluyen los suelos naturales que componen los diferentes estratos, así como la cerámica y los artefactos líticos que hallamos asociados con esos estratos naturales, convirtiéndolos en estratos culturales. También se incluyen los restos de carbón vegetal y la materia orgánica hallada en esos mismos estratos, lo que

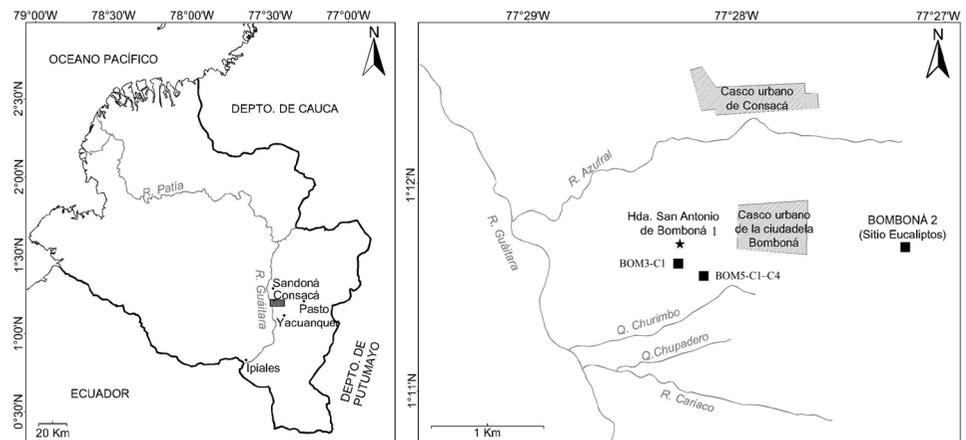


Figura 1. Mapas con la localización geográfica de los sitios arqueológicos que hacen parte de este proyecto. Las coordenadas geográficas se dan en la tabla cronológica al final.

se aprovechó para la fechación mediante radiocarbono, pues están directamente asociados con los objetos culturales. Aquí hacemos referencia específica a la cerámica no decorada de uso diario hallada en cuatro cortes arqueológicos en cuyas paredes pudimos identificar estratos naturales superpuestos, así como a los artefactos líticos que acompañaban dicha cerámica en los niveles superiores de las excavaciones. En los niveles más profundos, los artefactos líticos aparecieron sin asociación con la cerámica.

Para el caso particular que nos ocupa hicimos un corte arqueológico en el sitio Bomboná 3 y cuatro en el sitio Bomboná 5, en los cuales excavamos sistemáticamente desde la superficie del terreno hasta alcanzar 1,40 m de profundidad en promedio; registramos la ubicación de todos los objetos culturales y materiales geológicos con respecto a los estratos que los contenían. Estos cortes se rotularon como C1, C2, C3 y C4. El C1 se excavó en un área de 2,25 m² y los otros tres en un área de 1 m². Aunque la excavación se hizo por niveles artificiales, estos se correlacionaron luego con los estratos naturales que les correspondían, de manera que pudiéramos ubicar los materiales arqueológicos estratigráficamente. Toda la tierra que salió de las excavaciones fue cernida en seco según cada nivel, por lo que todos los artefactos recuperados de esta manera se pudieron correlacionar con el estrato natural que les correspondía. En los cortes registramos materiales cerámicos y artefactos líticos de origen prehispánico, además de la evidencia geológica de la actividad prehistórica del volcán Galeras. Encontramos depósitos coluviales masivos que podrían haberse formado tanto por la actividad directa del volcán como por otros eventos geológicos o ambientales secundarios o la inestabilidad provocada por la acumulación de grandes cantidades de agua y lodo en las laderas superiores. También hallamos evidencia de acumulaciones de piroclastos en períodos prehistóricos relativamente recientes (siglos X y XI d.C), cuando ya existían asentamientos humanos en la región. Este dato sería el primer reporte arqueológico para la sierra nariñense, específicamente en la cuenca media del río Guaitara, en la que se evidenció la contemporaneidad de la actividad volcánica del Galeras con la presencia de asentamientos humanos prehispánicos. **Banks et al.** (1997) suministran una extensa lista de fechados radiocarbónicos de la actividad del volcán Galeras, pero no están asociados con información arqueológica. Asimismo, se cuenta con un registro historiográfico de varios tipos de eventos relacionados con la actividad del volcán durante los últimos cinco siglos (**Díaz del Castillo**, 2017), si bien no se cuenta aún con estudios de arqueología histórica que evalúen la relación entre las ocupaciones durante la colonia o la república y tales eventos eruptivos o sísmicos.

La excavación de estos cuatro cortes profundos nos permitió constatar que la evidencia geológica y cultural de fecha temprana no se halla en un solo lugar y que no se trató de un hallazgo fortuito o afortunado. La arqueología sistemática que aplicamos tenía como objeto confirmar la extensión y distribución de los materiales arqueológicos en un área horizontal (el espacio) y su control vertical (el tiempo). La aparición recurrente de artefactos líticos y cerámicos, y la confirmación de las fechas tempranas asociadas directamente con esos artefactos líticos, nos permiten sugerir por primera vez la presencia de sociedades humanas en la sierra nariñense desde hace por lo menos cuatro mil años.

Los materiales que describimos en la siguiente sección fueron analizados en los laboratorios de las sedes de Medellín y Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia (secciones delgadas de líticos y cerámica y análisis petrográfico), de la Universidad de Nariño en Pasto (análisis de 15 muestras de suelos), en el laboratorio de termoluminiscencia TTA de la Universidad de Torino en Italia, y en el laboratorio para arqueometría de Beta Analytic Inc. en los Estados Unidos (fechados). Dichos análisis nos suministraron información sobre la composición mineral de las arcillas que conforman los fragmentos cerámicos, la composición y el origen geológico de todos los artefactos líticos y de los componentes geológicos de los estratos naturales, la caracterización de los suelos de todas las excavaciones, y las fechas absolutas de los materiales culturales. Toda esta información nos permitió asociar los eventos geológicos con la presencia de poblaciones humanas en tiempos claramente determinados por los métodos más confiables de datación que existen hoy, como lo son el ¹⁴C y la termoluminiscencia.

Tipificación de los suelos, material volcánico y presencia de objetos culturales prehispánicos

En términos generales, la unidad básica en el área explorada corresponde a terrazas fluvio-volcánicas formadas a partir del Cuaternario tardío que se extienden desde el cañón del río Azufral hasta los límites con el río Cariaco. Son superficies planas, comúnmente de forma cóncava, y otras ligeramente inclinadas, fuertemente disecadas con taludes de incisión muy abruptos y algún grado de erosión sobre las pendientes. Esta geoforma, compuesta por tres tipos de dinámicas volcánicas, consiste en depósitos de calda de tefra, depósitos piroclásticos y depósitos de flujo de lodo. En estas dinámicas se identifican diferentes bancos deposicionales pronunciados con superficies irregulares sustentadas por diferentes avalanchas de escombros (Calvache, 1990; Banks *et al.*, 1997; Calvache *et al.*, 1997; Monsalve, 2020). Estas características se observan en los cortes arqueológicos. En Bomboná 5, corte 1, se observó en el horizonte CB un depósito de materiales rocosos compuesto por clastos subredondeados de tamaños variables formados por material ígneo (grava, cantos rodados y bloques), estructuras graníticas con matriz félsica y rocas hipoabisales de estructuras porfídicas dispersos por todo el corte de la excavación. La formación de este depósito podría ser el resultado de un movimiento coluvial originado en el costado nororiental de la terraza aprovechando los movimientos de agua intrínsecos de la zona. La formación de este horizonte de suelo podría estar relacionada con un posible flujo repentino de agua desde la parte superior de la ladera que transportó lodo y rocas a través de estos afluentes efímeros. Debido a la energía del desplazamiento, dichos materiales se depositaron de forma poco uniforme a lo largo de los bordes del afluente, lo que sugiere un momento de energía media a alta. Registramos estas particularidades geológicas en los cortes arqueológicos de Bomboná 3, corte 1 y Bomboná 5, corte 1. En la **figura 2a, b** la gráfica reconstruye el perfil de Bomboná 5, corte 1, observándose claramente el nivel CB entre los 0,35 m y los 0,80 m. En este suelo mezclado se halló material antrópico fragmentado (cerámica y artefactos líticos). De manera análoga, la formación de los suelos en el sitio Bomboná 3, corte 1, se relaciona con posibles movimientos en masa de sedimentos y conglomerados de la parte más alta de la ladera. Estos depósitos no necesariamente son el resultado de la acción directa del volcán. También pueden serlo de eventos secundarios, como lahares provocados por el derretimiento de glaciares, o por la acumulación de agua en las áreas altas que, en momentos de cambio, se desplaza a través de flujos activos arrastrando sedimentos, lodo y materia orgánica.

En el horizonte A2u (entre los 0,25 m y los 0,50 m) (**Figura 2 c,d**) se evidencia un nivel con actividad volcánica piroclástica constante que modela la superficie, con presencia de material volcánico posiblemente volátil disgregado o meteorizado en pequeñas proporciones. Se observan procesos de eluviación y es posible que el material cultural de este perfil tenga leves procesos de translocación o de redeposición. Algunas de las rocas de origen volcánico que identificamos en este nivel son andesitas porfiríticas, basalto con alteraciones de tipo hidrotermal y tobas de lapilli con clastos basálticos. En los niveles ACu y Cu (entre 0,50 m y 1,00 m de profundidad), se observa un aumento de la presencia de clastos ígneos meteorizados con estructura fuerte, que es el estado de meteorización y transformación de una actividad volcánica masiva. La inestabilidad probablemente implicó una ocupación humana intermitente. Es posible que el depósito de rocas de tamaño variable con formas subredondeadas y subangulares que se ve en las imágenes y en las gráficas de la **figura 2**, sea parte de un movimiento masivo de lodo y escombros de largo transporte que se asienta en este sitio, algo parecido a lo que describimos en Bomboná 5, corte 1. Este material puede ser trastocado del área y de la unidad litológica según la composición TQv1, así como de las partes más altas e inclinadas de las largas laderas que componen el paisaje.

A diferencia de los cortes 1 de los sitios Bomboná 3 y Bomboná 5, en los cortes 2, 3 y 4 del sitio Bomboná 5 no hallamos el depósito coluvial, pero sí evidencia de la actividad del Galeras y materiales antrópicos asociados (**Figura 3**). Aquí no incluimos la gráfica del corte 3 porque replica muy de cerca la estratigrafía del corte 2, localizado a pocos metros de distancia. Se identificó un depósito piroclástico de tipo tefra (horizonte C entre los

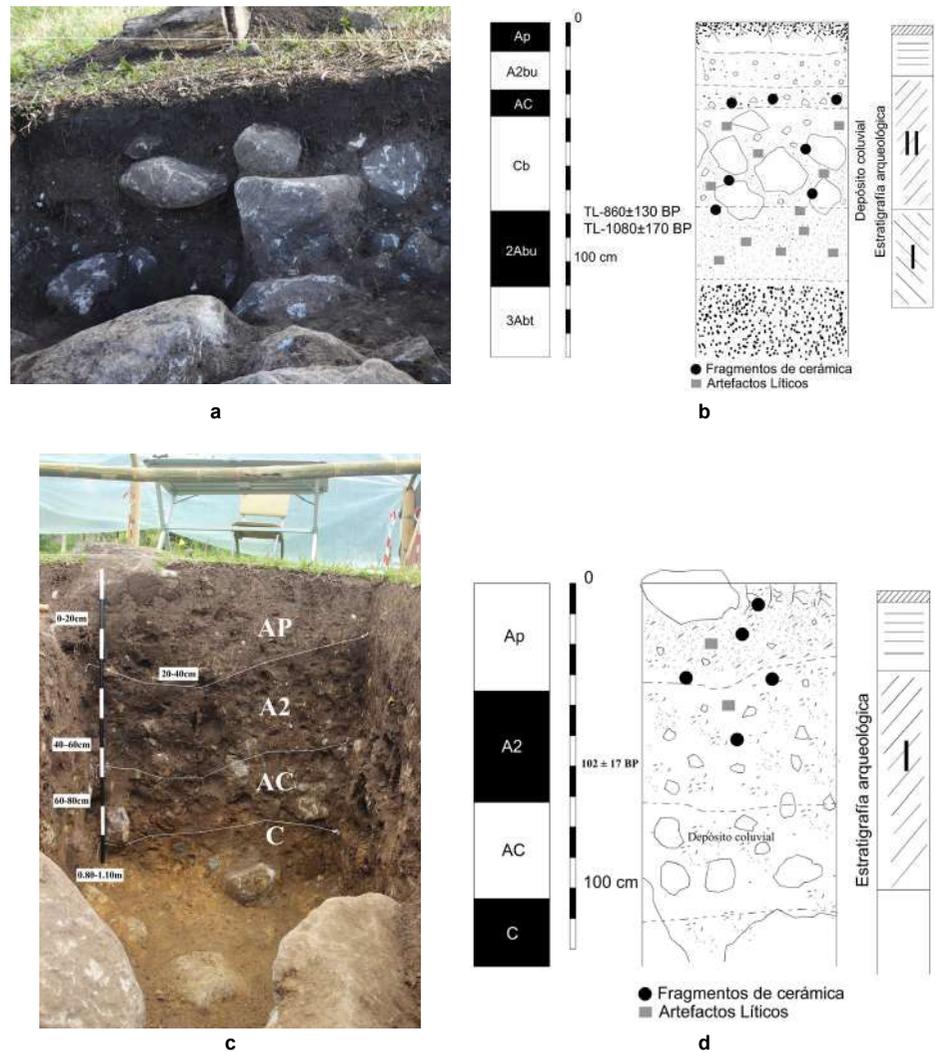


Figura 2. (a, b) BOM5-C1 perfil oeste: gran depósito coluvial. (c, d) BOM3-C1 perfil este: horizonte A2, se evidencia actividad piroclástica y grandes rocas que representan un depósito coluvial.

0,35 m y los 0,60 m de profundidad), que modela la topografía actual. Se observan rocas volcánicas meteorizadas con procesos pedogenéticos producto de una actividad volcánica continua. El material parental varía en tamaño, desde grava hasta bloques en algunas áreas, y es producto de eventos piroclásticos. A diferencia del corte 1, aquí no observamos ningún depósito de material caótico y se observa una estabilidad estratigráfica en su horizontalidad. El material cerámico aparece continuamente, desde la superficie hasta el límite entre los horizontes C y 2Ab, es decir, hasta cerca de los 0,60 m de profundidad en cada corte. A partir de este punto desaparece la cerámica, pero no así el material antrópico lítico, que ocupa el horizonte 2Ab, el cual es un paleosuelo orgánico sepultado por la actividad volcánica (Figura 3b,c). La tefra depositada en este sector evidencia la continua pero poca energía del volumen y la distribución de los depósitos piroclásticos.

Materiales antrópicos: cerámica y artefactos líticos

Los materiales culturales hallados en nuestras excavaciones dentro de los estratos naturales y los niveles culturales que hemos descrito, se clasifican en dos tipos: cerámica y artefactos líticos. La cerámica se encontró en todos los cortes realizados, desde la superficie hasta una profundidad de 0,60 m a 0,70 m. En el caso de Bomboná 5, corte 1, algunos fragmentos se

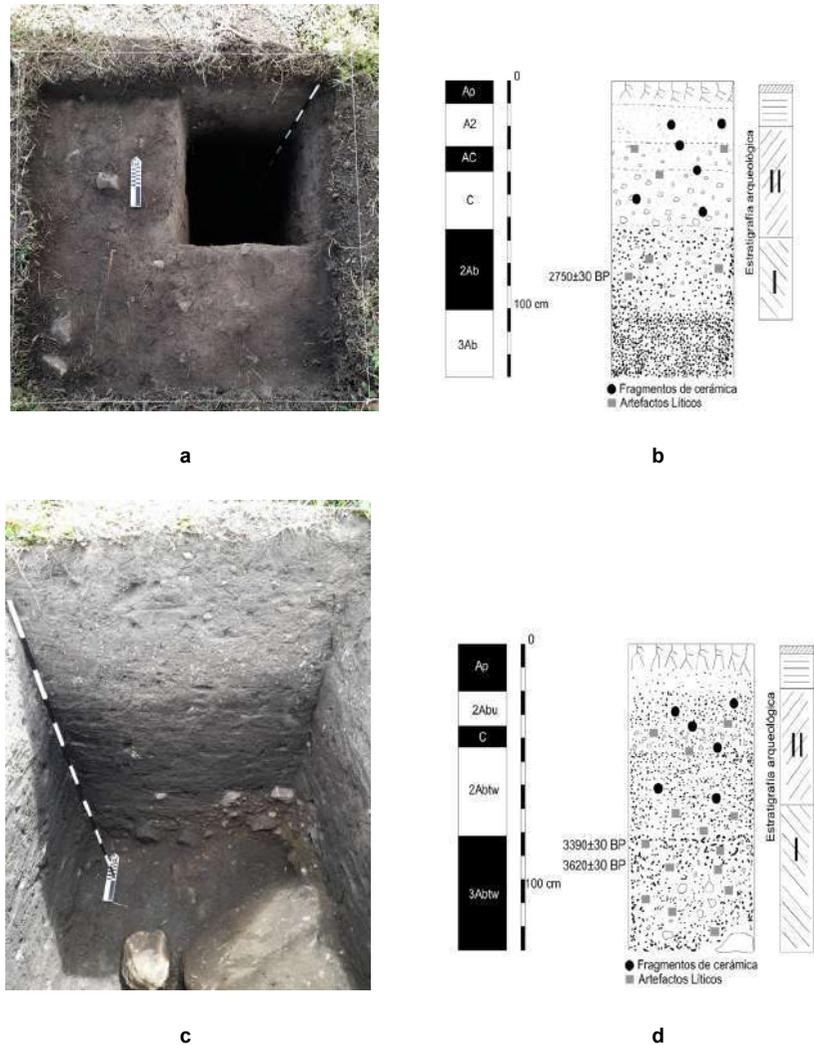


Figura 3. Corte BOM-5 C2 (a, b) en planta que muestra el cuadrante donde se profundizó la excavación y la gráfica del perfil norte con los niveles y la distribución de los materiales antrópicos. Corte BOM-5 C4 (c, d) perfil norte que provee información sobre los niveles y la distribución de los materiales antrópicos

hallaron a una profundidad de 0,80 m debido al arrastre provocado por los movimientos de lodo y rocas descritos, es decir, se hallaron en el límite inferior del depósito coluvial. Esta cerámica es utilitaria, a diferencia de la cerámica decorada que se encuentra en contextos funerarios. La tipología que hemos usado para caracterizar estos materiales cerámicos se basa en trabajos anteriores publicado sobre esta área arqueológica (Bernal-Vélez, 2011; Cárdenas-Arroyo & Bernal-Vélez, 2019). La recurrencia de los mismos tipos cerámicos en un área de más de 180 km² durante aproximadamente 700 años demuestra la presencia de una tradición cultural de larga duración en la fabricación de estos tipos que definimos como carmelito-rojizo, habano, negro y naranja, con sus respectivas subdivisiones determinadas por atributos formales como su porosidad y densidad (Cárdenas-Arroyo *et al.*, 2024)

Estos fragmentos hallados en el límite inferior del depósito coluvial de Bomboná 5, corte 1, nos permitieron obtener dos fechas por termoluminiscencia, pues, dada su posición estratigráfica justo debajo del deslizamiento caótico de lodo y rocas, suministraron una fecha del momento en que ocurrió el evento (Figura 2b). Además, representarían dos fechas obtenidas directamente de cerámica utilitaria por primera vez en Nariño. Este

segundo dato es muy importante, porque las fechas nos permiten asociar cronológicamente la cerámica utilitaria hallada fuera de los contextos funerarios con la cerámica decorada hallada en esta misma área pero en dichos contextos. Las dos muestras fueron procesadas en el laboratorio para análisis de termoluminiscencia TTA en Torino, Italia, y los resultados se presentan en la siguiente sección. Los otros materiales antrópicos consisten en artefactos líticos o desechos de talla líticos en los que registramos la presencia de pequeñas lascas de obsidiana. Las excavaciones de los cortes 1, 2, 3 y 4 del sitio Bomboná 5 suministraron estos materiales en sus estratos y su relación con los perfiles estratigráficos es consistente en todos los cortes. Damos a continuación los resultados que se obtuvieron del análisis formal de los materiales recién descritos.

Resultados

Cerámica

En cuanto al origen de las materias primas usadas para hacer esta cerámica utilitaria, los análisis petrográficos de dos muestras indicaron que son locales. Macroscópicamente, la primera muestra (BOM-5 C1-I) (**Figura 4a**) presenta una superficie externa alisada, una

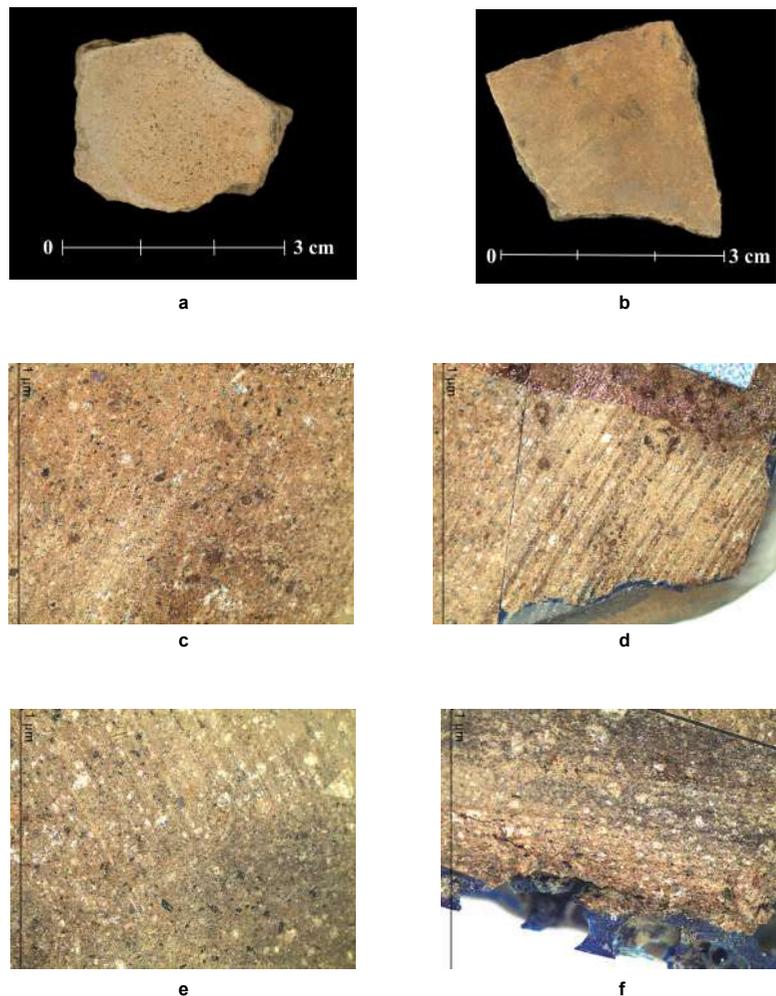


Figura 4. Cerámica: BOM5 C1-I (**a**); BOM5 C1-II (**b**): macrofotografías (**a,b**); estereofotografías (**c,d,e,f**). En ambos fragmentos se identifican granos de feldespato, anfíbol, cuarzo y fragmentos de roca (**c,d**). En la sección transversal del fragmento II (**f**) se observa una capa gris oscura y otra café, lo que muestra mayor contenido de arenas medias y gruesas en la zona oscura.

pasta compacta y no porosa, con un color carmelito claro. La segunda muestra (BOM-5 C1-II) (**Figura 4b**) también tiene la superficie externa alisada y una pasta compacta y no porosa, aunque su color es ligeramente más oscuro (ambos fragmentos corresponden a nuestro Grupo VIII: carmelito fino compacto. Color Munsell: varía entre 7.5YR 6/4 *light brown* y 7.5YR 5/4 *brown*). Entre sus componentes más gruesos se identificaron granos de feldespato, anfíbol, cuarzo y fragmentos de roca en ambos fragmentos (**Figura 4c,d**), con granos de mayor tamaño en el fragmento II (**Figura 4e,f**). Además, en la sección transversal de este fragmento (**Figura 4f**) se observa una capa gris oscura, seguida de una en diferentes tonalidades de color café, lo que evidencia un mayor contenido de arenas medias y gruesas en la zona oscura. El contenido de la matriz de arcilla de estos fragmentos es de aproximadamente el 60 %.

Vistos bajo luz polarizada plana (LPP) y luz polarizada cruzada (LPC), los fragmentos I (**Figura 5 a,b**) y II (**Figura 5c,d**) presentan una matriz arcillosa de color marrón claro a oscuro con color de interferencia negro. En estos fragmentos se identificaron principalmente inclusiones monominerálicas con grano de tamaño variable (tamaño de arena fina, media y gruesa) de plagioclasa y feldespato, seguido de inclusiones de hornblenda, cuarzo,

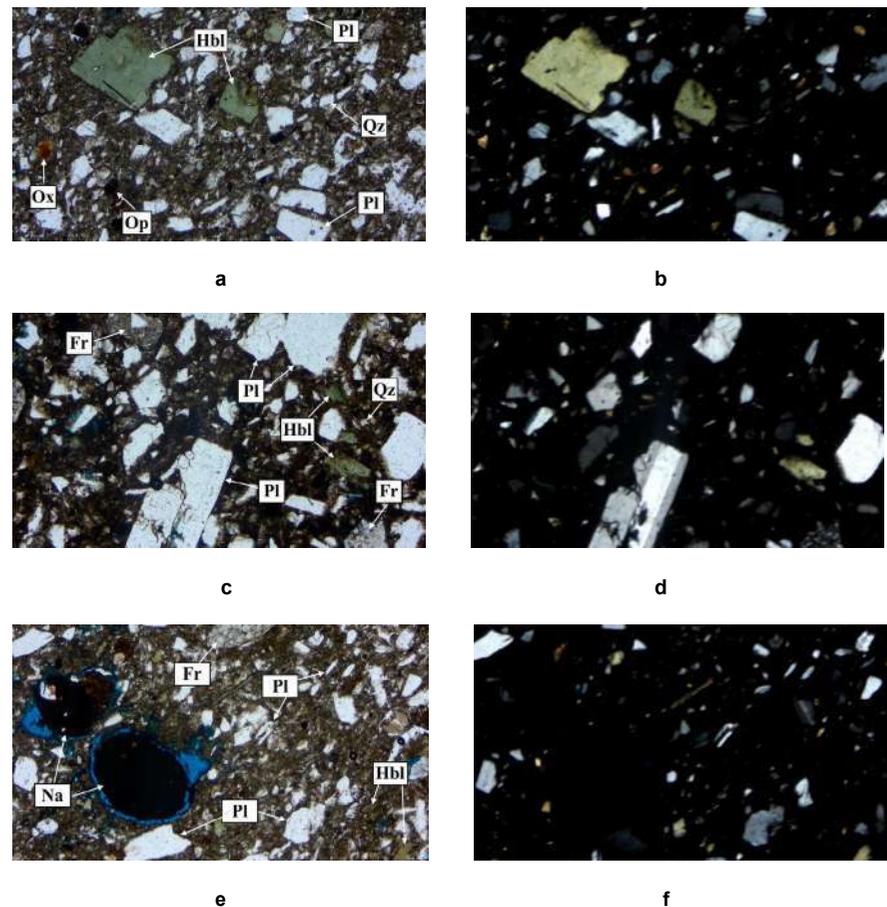


Figura 5. Microfotografías de la cerámica: luz polarizada plana (LPP), luz polarizada cruzada (LPC). BOM-5 C1(I) **a** y **b** (LPP y LPC x4, respectivamente): inclusiones de plagioclasa, hornblenda, cuarzo, minerales opacos y óxidos de hierro; BOM-5 C1(II) **c** y **d** (LPP y LPC x4, respectivamente): inclusiones de feldespato, plagioclasa, hornblenda, cuarzo y fragmentos de roca. BOM-5 C1(I) **e** y **f** (LPP y LPC x4, respectivamente): inclusiones de nódulos arcillosos y foliación de las inclusiones marcada por la plagioclasa y la hornblenda. Plagioclasa: Pl; hornblenda: Hbl; cuarzo: Qz; óxidos de hierro: Ox; minerales opacos: Op; fragmentos de roca: Fr y nódulos arcillosos: Na

minerales opacos y fragmentos líticos de origen ígneo volcánico y sedimentario. Además, contienen nódulos arcillosos, fragmentos de tiesto molido y agregados de óxidos de hierro. En general, tienen baja porosidad (8 %) y muestran vacíos irregulares interconectados.

La plagioclasa es incolora, con colores de interferencia del primer orden, tiene una composición sódica y cálcica (albita y anorita) y algunos cristales muestran maclas polisintéticas y zonación composicional; el feldespato es incoloro con relieve bajo y bordes sinuosos y la hornblenda tiene color verde con forma subhedral y colores de interferencia del segundo orden. Se evidencia una mala selección en las inclusiones, siendo la plagioclasa y el anfíbol los minerales que presentan mayor diversidad de tamaños, entre arenas finas, medias y gruesas (0,05 a 2 mm). Los vacíos hallados son irregulares, algunos de ellos se encuentran como canales interconectados bordeando los nódulos arcillosos, los tiestos y los agregados de óxidos de hierro. En el corte transversal también se logra observar una foliación de las inclusiones marcada por la plagioclasa y la hornblenda.

Las inclusiones que sustentan la relación con la geología regional son los fragmentos de rocas volcánicas y sedimentarias. Por lo tanto, no se deben mencionar únicamente las rocas hipoabisales e ignimbritas sino también las rocas sedimentarias. Las inclusiones de las pastas estudiadas concuerdan con el ambiente geológico regional donde se ubican los yacimientos arqueológicos de interés y, así, estarían relacionadas con las diferentes unidades del Grupo Dagua (unidad Kmsv), el Grupo Diabásico (unidades Kvs, Kvd y Kv), rocas hipoabisales (unidad Th), depósitos ignimbriticos (unidades TQva y TQvl) y lavas andesíticas (unidad TQvlc). La cercanía de estas unidades se puede ver en el mapa de la **figura 6**.

Las rocas sedimentarias estarían asociadas al Grupo Dagua y al Grupo Diabásico y representan períodos de sedimentación marina contemporáneos o alternantes con la actividad volcánica en un ambiente oceánico. Las rocas hipoabisales presentan una estructura inequigranular porfídica y están asociadas espacialmente a las rocas del Grupo Diabásico.

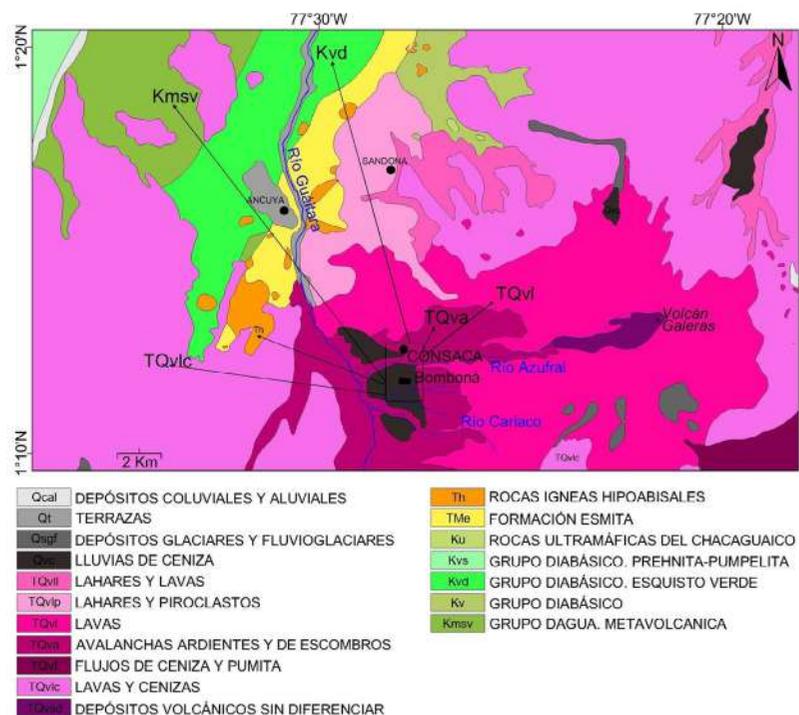


Figura 6. Mapa geológico de Nariño modificado de Ingeominas (1991), plancha 429 de Esc: 1.100.000. En el rectángulo negro se indica la zona donde se encuentran los sitios arqueológicos de interés (escala modificada).

Estas rocas se presentan como apófisis pequeños o *stocks* al oeste de Consacá y la mayoría parecen ser la continuación septentrional del cinturón plutónico de la cordillera Occidental ecuatoriana (Hall & Calle, 1982) que se prolonga a lo largo de la misma cordillera en Colombia como intrusión en las rocas cretácicas de los grupos Dagua y Diabásico. La composición varía de andesítica y dacítica a tonalítica, con plagioclasa y cuarzo como minerales esenciales y hornblenda y biotita como caracterizantes en proporciones variables de un cuerpo a otro, predominando la presencia de fenocristales de plagioclasa y cuarzo.

Los depósitos ignimbríticos representan flujos piroclásticos con estructura porfídica, con abundante pómez y láminas de biotita relacionados con erupciones volcánicas explosivas. Están constituidos en proporciones variables por fragmentos juveniles de pómez; líticos accidentales tanto de vulcanitas recientes como de basaltos del Grupo Diabásico; cristales de cuarzo, biotita, hornblenda, feldespatos y opacos en una matriz vítrea que puede presentar diversos grados de vitrificación, desarrollo de fragmentos, textura de flujo, esferulitos y trozos aplanados de pumita. Por último, las lavas andesíticas, asociadas a la evolución geológica del volcán Azufral o sus antecesores y probablemente al volcán Cumbal, aparecen relacionadas con depósitos ignimbríticos y, en muchos casos, son difíciles de separar de éstos, puesto que presentan características morfológicas similares y a veces han sido parcial o totalmente cubiertas por depósitos piroclásticos recientes provenientes del volcán Azufral. Algunas de estas lavas aparecen depositadas discordantemente sobre las ignimbríticas, en tanto que otras no presentan una relación directa con estos depósitos y parecen cubrir directamente las rocas basálticas del Grupo Diabásico que constituyen el basamento de los volcanes recientes en el área. La composición de estas lavas es andesítica, varía según la proporción y la naturaleza de los minerales máficos con presencia de cuarzo accesorio y contienen principalmente fenocristales de plagioclasa e inclusiones de minerales opacos, así como olivino, biotita y hornblenda en menor proporción.

Por lo tanto, el material utilizado para la fabricación de las piezas arqueológicas puede considerarse de origen local, aunque esto no significa que fueran fabricadas en este sitio específicamente. El mapa de la **figura 6** muestra las áreas de donde pudieron provenir las materias primas.

Artefactos líticos

En todos los cortes se encontraron tanto artefactos líticos como rocas sin modificación cultural. La cerámica apareció acompañada de artefactos líticos hasta el nivel de 0,60 m a 0,70 m, pero de ahí hacia abajo la cerámica desaparece por completo, hallándose solamente los artefactos líticos en los estratos inferiores. En términos generales, estos artefactos son mayoritariamente de basalto, basalto porfídico, andesita porfídica, toba, granito, chert y obsidiana. Para este conjunto, la clasificación tipológica según criterios funcionales, morfológicos y tecnológicos corresponde a nódulos, núcleos, lascas, láminas, microlitos geométricos y restos de talla (**Figura 7**).

Al igual que con los componentes naturales de la cerámica ya descritos, en el análisis del tipo de rocas presentes en el conjunto lítico representativo de los sitios Bomboná 3 y 5, se identificaron once tipos de materias primas, incluidas rocas de origen ígneo volcánico, ígneo plutónico, ígneo hipoabisal, sedimentario y metamórfico, además de minerales. En la fabricación de los artefactos líticos se evidenció un uso preferencial de las rocas de grano fino como el basalto, con un porcentaje mayoritario de 54,3 %, seguido de la toba y el chert con 20,8 % y 10,9 %, respectivamente. Las rocas hipoabisales (andesita y dacita) representan un 5,5 %, las rocas plutónicas (granito y diorita) un 2,74 %, las rocas metamórficas (metagabro y anfibolita) un 1,09 % y el cuarzo un 1,09 %. Se identificó, además, un material que sería ámbar y representa un 0,5 % del conjunto analizado. Sin duda la abundancia regional de estos materiales es una indicación de que sirvieron como materia prima, y que este tipo de formaciones fueron la fuente original aprovechada por los antiguos pobladores de la región, conocedores del entorno en que se movían.



Figura 7. Ejemplos de artefactos líticos. (a) BOM-C4: 1,20 m-1,30 m; chert de superficie muy fina, fractura concoidea asociada posiblemente a marcas de impacto; (b) 0,90 m-1,00 m; basalto, lasca laminar con estrias continuas por presión o percusión; (c) BOM-3 A3: 020 m-040 m; chert rojo, fractura concoidea y bordes filosos denticulados que sugieren patrones de uso; (d) BOM-C4; 0,90 m-1,00 m; desechos de talla y lascas de obsidiana de Mullumica, Ecuador

Estas rocas están presentes en toda la región de Nariño y han sido reportadas y estudiadas en varios trabajos (Nelson, 1959; Kroonenberg, 1983; Litherland *et al.*, 1994; Maya & González, 1995; Toussaint, 1996; Gómez *et al.*, 2015). En este sentido, se correlacionaron los materiales estudiados y los eventos geológicos que pudieron haber servido como fuente. Es importante anotar que tanto en el caso de la cerámica como en el de los líticos, determinar y comparar las fuentes con mayor precisión requiere de análisis químicos y físicos más detallados tanto del posible material fuente como de los materiales arqueológicos.

De particular interés resultan los artefactos de obsidiana excavados (Figura 7d). Se trata de pequeñas lascas producidas por desconchamiento de un núcleo principal. Estos artefactos se encontraron en todos los cortes y en diferentes estratos culturales, lo que sugiere su uso continuado en este lugar durante milenios. En varias de nuestras muestras de obsidiana se observan bordes muy afilados y fractura concoidea con marcas de impacto en la superficie, incluyendo el punto de percusión donde se aplicó el golpe y las ondas de choque que se propagan desde ese punto. Los resultados obtenidos hasta ahora de

los análisis de 20 muestras de obsidiana excavados en los cortes BOM-5 C1 y BOM-5 C2, y el sondeo en BOM-5 S49 indican que estos materiales provienen de la fuente de obsidiana de Mullumica, Ecuador, al noreste de Quito y, posiblemente, del Cerro Volcán Azafatudo (Dyrdahl, 2024, comunicación personal) del Complejo Volcánico Sotará (Cauca/Huila, Colombia). Hay una tercera fuente de obsidiana representada en los artefactos recuperados, pero su identificación es todavía incierta. El origen de la obsidiana se identificó mediante fluorescencia de rayos X (FRX). La fuente de Mullumica se detectó en seis de nuestros artefactos de Bomboná al comparar su composición química con tablas de referencia conocidas para dicha fuente (Dyrdahl, 2022), así como en la lasca de posible origen en el CVS. Las 13 restantes posiblemente provienen del sur de Colombia, aunque por el momento no podemos hacer esta aseveración con certeza. En la siguiente sección presentamos su cronología.

Cronología

Las fechas absolutas que se han obtenido en las excavaciones arqueológicas en Bomboná son seis (Tabla 1): dos mediante termoluminiscencia y cuatro mediante radiocarbono. En nuestro análisis tuvimos en cuenta una fecha más de radiocarbono obtenida anteriormente

Tabla 1. Fechas radiocarbónicas y de termoluminiscencia. Calibraciones para ¹⁴C: BetaCal 5.0; HPD: IntCal20 (mayo de 2024)

Sitio	Laboratorio Material Procedimiento RCYBP	Calibraciones BetaCal 5.0 HPD: IntCal20	Observaciones sobre el contexto
BOM-5 C4 Muestras #040-041 1,19295N 77,47015W	B-689435 carbón AMS 3620 ± 30 AP	(89,8 %) 2040-1891 cal a.C. (5,6 %) 2123-2095 cal a.C. IRMS δ ¹³ C = -22,5 ‰ %C = 63,72 ± 0,24 pMC D ¹⁴ C: -362,78 ± 2,38 ‰ Δ ¹⁴ C: -368,46 ± 2,45 ‰	Obtenida de dos muestras de carbón en BOM-5, corte 4 a 0,90 m-1,00 m de profundidad. Suelo con alto contenido de fósforo mg/Kg=37,4. Estratigrafía 3Abtw, masiva acumulación de material orgánico. Material antrópico: 74 líticos, de los cuales 13 lascas de obsidiana: lascas y desechos de talla de basalto, andesita, toba, chert y basalto porfídico con estrías paralelas asociadas con superficies de presión o percusión, fractura concoidea asociada posiblemente a marcas de impacto. Cerámica ausente. Intersección entre RCYBP y curva de calibración: cal 2020 a.C.
BOM-5 C4 Muestra #053 1,19295N 77,47015W	B-689433 tierra AMS 3390 ± 30 AP	(92,6 %) 1753-1611 cal a.C. (2,8 %) 1863-1552 cal a.C. IRMS δ ¹³ C = -15,7 ‰ %C = 65,57 ± 0,24 pMC D ¹⁴ C: -344,27 ± 2,45 ‰ Δ ¹⁴ C: -350,12 ± 2,45 ‰	Obtenida de una muestra de tierra correspondiente al estrato 3Abtw en BOM-5, corte 4, a 0,80 m-0,90 m de profundidad. Suelo con alto contenido de fósforo mg/Kg=37,4. Masiva acumulación de material orgánico. Material antrópico: 82 líticos, de los cuales 9 lascas de obsidiana: lascas y desechos de talla de basalto, andesita, toba, chert y basalto porfídico con estrías paralelas asociadas con superficies de presión o percusión, fractura concoidea asociada posiblemente a marcas de impacto. Cerámica ausente. Intersección entre RCYBP y curva de calibración: cal 1680 a.C.
BOM-5 C2 Muestra #042 1,19221N 77,46866W	B-689436 carbón AMS 2750 ± 30 AP	(87,4 %) 940-817 cal a.C. (8 %) 981-948 cal a.C. IRMS δ ¹³ C = -15,3 ‰ %C = 71,01 ± 0,27 pMC D ¹⁴ C: -289,89 ± 2,65 ‰ Δ ¹⁴ C: -350,12 ± 2,45 ‰	Obtenida de una muestra de carbón en BOM-5, corte 2, a 0,90 m-1,00 m de profundidad. Suelo contenido de fósforo mg/Kg=5,56 a 0,85 m-0,95 m; 9,83 a 1,00 m-1,10 m. Estratigrafía 2Abtw, posible paleosuperficie. Estabilidad ambiental. Material antrópico: 9 líticos, de los cuales una lasca de obsidiana con fractura concoidea asociada posiblemente a marca de impacto. Cerámica ausente. Intersección entre RCYBP y curva de calibración: cal 910 a.C.
BOM-5 C1 Muestra #053 1,19248N 77,46891W	TTA-053 cerámica TL-ADITIVE 1080 ± 170 AP	943 ± 170 d.C Paleodose 2,6 ± 0,2 Dosis ambiental 1115 ± 327 Cont. Alpha 8,3 ± 0,1 (Presente: 2023 d.C)	TL-obtenida de una muestra de cerámica utilitaria de tipo carmelito fino compacto. Excavada en la base inferior del depósito coluvial de BOM-5 C1 (0,80 m). Concuerda con fechas de 1-1,2 ka de actividad volcánica del Galeras y flujos caóticos de lodo y lahares.
BOM-5 C1 Muestra #043 1,19248N 77,46891W	TTA-043 cerámica TL-ADITIVE 860 ± 130 AP	1163 ± 130 d.C Paleodosis 2,6 ± 0,2 Dosis ambiental 1115 ± 327 Cont. Alpha 8,1 ± 0,1 (Presente: 2023 d.C)	TL-obtenida de una muestra de cerámica utilitaria de tipo carmelito fino compacto. Excavada en la base inferior del depósito coluvial de BOM-5 C1 (0,80 m). Concuerda con fechas de 1-1,2 ka de actividad volcánica del Galeras y flujos caóticos de lodo y lahares.
BOM-3 C1 Muestra #020 1,19431N 77,47071W	MAMS-66723 hueso animal AMS 102 ± 17 AP	(68 %) 1698-1911 cal d.C (95 %) 1693-1918 cal d.C AMS δ ¹³ C = -21,3 ‰ C:N = 3,3 %C = 42,7 %Col = 3,9	Obtenida de una muestra de hueso animal en BOM-3, corte 1 a 0,64m de profundidad. Material muy seguramente intruso. Suelo con alto contenido de fósforo mg/Kg=123,5. Material antrópico: 62 fragmentos cerámicos. Intersección entre RCYBP y curva de calibración: cal 1700 AD

B = BETA Analytic Inc., FL, USA; MAMS = Curt-Engelhorn-Center for Archaeometry, Mannheim (Alemania); TTA = Turin Thermoluminescence Analysis

en esta misma área (**Fernández, 1994**) que consideramos pertinente para el estudio. Para el sitio Bomboná 5, corte 1, se obtuvieron dos fechas mediante termoluminiscencia de dos fragmentos cerámicos hallados en el límite inferior del depósito coluvial (**Figura 2b**): 1080 ± 170 AP (943 ± 170 d.C) y 860 ± 130 AP (1163 ± 130 d.C). Se aclara que en el caso de las fechas determinadas mediante termoluminiscencia, antes de presente (AP) alude a la fecha desde el presente actual en que se hace el análisis (en este caso el año 2023 d.C), y no la fecha convencional de 1950 que se usa para los fechados radiocarbónicos.

Estas fechas son importantes por dos razones: primero, porque coinciden muy cercanamente con la fecha de 1-1,2 ka (1000-1200 d.C) publicada por **Banks et al.** (1997: 47), la cual se asocia con un flujo de lava por el río Azufral y depósitos de flujos de lodo, flujos piroclásticos hacia el norte y otros eventos asociados con una erupción del Galeras. Es decir, que los depósitos piroclásticos y los depósitos coluviales que aparecen en nuestros cortes corresponden a eventos volcánicos del Galeras fechados previamente por vulcanólogos (**Banks et al.**, 1997: 44). Tales fechas coinciden cercanamente con las nuestras; los autores señalan específicamente que en 1-1,2 ka “dominan los flujos de lava en el Valle del Azufral y flujos piroclásticos en las laderas exteriores” (**Banks et al.**, 1997: 47), y que hacia la falda norte hay “paquetes de flujos piroclásticos, aluviones, lluvia de material [*air fall*], depósitos de flujos de lodo, y paleosuelos ricos en cenizas y una capa [formada por] lluvia local de pumita [*local pumice airfall*]”. La presencia de cerámica justo en medio de estos eventos geológicos suministra evidencia arqueológica de que en ese tiempo, entre los siglos X y XI de nuestra era, hubo poblaciones prehispánicas afectadas directamente por la actividad del Galeras en este lugar. Segundo, porque estas fechas también coinciden con la única fecha de radiocarbono registrada antes de nuestro trabajo específicamente para el área de Bomboná. Esta fecha es la del 825 ± 125 AP (cal 989-1400 d.C) (**Fernández, 1994**). La fecha corresponde a una tumba de pozo con cámara lateral en el sitio Los Eucaliptos en la cual se halló cerámica de estilo Tuza y cuatro piezas más de cerámica utilitaria. Al comparar nuestra fecha de 1163 d.C y la fecha calibrada de Fernández, la contemporaneidad de los dos sitios arqueológicos es cercana. Nuestras fechas corroboran que la cerámica Tuza ya era de uso corriente en el siglo XII d.C y que seguramente puede ser más temprana de lo que se piensa. Actualmente, las fechas más tempranas para la cerámica del estilo Tuza obtenidas de contextos arqueológicos excavados científicamente en Nariño son 1240 ± 70 AP (cal 656-973 d.C), pieza proveniente de Guachucal (**Gómez, 1991**), y 1440 ± 50 AP (cal 543-668 d.C), pieza proveniente de La Laguna (**Patiño-Castaño, 1995**).

En el caso de los cortes BOM-5 C2 y BOM-5 C4, tomamos muestras de carbón y de suelo con contenido orgánico para fechar el contexto estratigráfico en el que aparecieron los artefactos líticos, incluidos los de obsidiana, que no estaban asociados con cerámica y se encontraron a profundidades entre los 0,85 m y 1,00 m. Las siguientes fechas de radiocarbono suministraron información sobre la presencia de actividades humanas muy tempranas: 2750 ± 30 AP (cal 981 a.C.-817 a.C.), 3390 ± 30 AP (cal 1753 a.C.-1611 a.C.), y 3620 ± 30 AP (cal 2123 a.C.-1891 a.C.). Estas tres fechas son las primeras obtenidas hasta ahora para la sierra nariñense en un contexto arqueológico temprano. Si bien se han registrado otras fechas muy tempranas anteriormente (**Banks et al.**, 1996: 44), esas solo están asociadas a la actividad del volcán Galeras y no tienen una relación directa con la presencia de poblaciones humanas. En la **tabla 1** se presentan las fechas obtenidas, cuyo reporte se hizo siguiendo las convenciones para fechas de radiocarbono publicadas por **Millard (2014)**. En la columna de los datos del contexto arqueológico aparece la fecha en años calendario dada por la intersección de la curva entre los años AP y los años calibrados como guía rápida, pero se recomienda hacer referencia al rango de la fecha calibrada en cada caso (columna 3).

Discusión

Los resultados obtenidos en el transcurso de nuestras excavaciones arqueológicas sugieren que los pobladores prehispánicos de la cuenca media del río Guaitara, en el área comprendida entre el cañón del río Azufral y el cañón del río Cariaco, vivieron en estrecha

relación con la actividad del volcán Galeras y otros eventos secundarios que pudieron estar directamente relacionados o no con dicha actividad volcánica. La estratificación natural del área es una clara indicación de esto, dado que los diferentes estratos están formados por lahares, a veces con rocas de arrastre de gran tamaño, capas formadas de tefra o piroclastos, y rocas volcánicas como andesitas porfíricas, basaltos y tobas. Todas estas formaciones se relacionan con los depósitos de basamento del CVG y sus etapas de formación: Cariaco, Pamba, Urcunina, etapa Galeras y la avalancha del sector occidental. En estos estratos, directamente asociados con ellos, se encuentran los materiales antrópicos.

Durante los años tempranos de las investigaciones arqueológicas en la sierra nariñense, la arqueología de entonces asumía que la actividad volcánica del pasado habría sido lo suficientemente fuerte e intensa como para impedir la presencia de asentamientos humanos en la región. Por ejemplo, tanto Plazas como Uribe sugerían que en la sierra los asentamientos humanos solo aparecían después del siglo VII d.C porque “Antes de esa fecha, la intensa actividad volcánica no permitió ningún asentamiento humano permanente” (Plazas, 1977-78). Hoy, cinco décadas más tarde, las investigaciones vulcanológicas y arqueológicas enseñan que aquella idea no es necesariamente cierta y que el posible impacto que pudieron tener los diferentes volcanes que conforman el paisaje geológico del departamento de Nariño en las poblaciones prehispánicas, se debe entender según la localización de cada volcán y las áreas ocupadas, o los asentamientos humanos que cada uno de esos volcanes afectó directamente. El Galeras ha tenido un largo período de actividad y nuestro trabajo demuestra que en la cuenca media del río Guáitara ya había presencia humana desde el segundo milenio antes de Cristo. Para la misma época en que obtuvimos nuestras fechas tempranas, **Banks et al.** también suministran fechas de actividad volcánica del Galeras: 4110±150 AP (ca. 2160 a.C.) (**Banks et al.**, 1997). Las sociedades que vivieron específicamente en esta área convivieron con esta actividad por lo menos desde el año 2100 antes de Cristo y, aunque fueron afectadas por ella en mayor o menor grado, ello no impidió que siguieran viviendo allí durante más de cuatro milenios hasta el presente. Según **Calvache et al.** (1997) “las erupciones del Galeras en los últimos 5.000 años han sido pequeñas en escala”. Por lo tanto, no han impedido la vida humana, aunque algunas seguramente fueron lo suficientemente fuertes para modificar localmente el paisaje y hacer que los habitantes trasladaran sus asentamientos hacia áreas cercanas no afectadas. Este pudo ser el caso con los deslizamientos de lodo y rocas que encontramos en Bomboná 3 y Bomboná 5, cuya estratigrafía confirma dicha actividad en los depósitos coluviales excavados, pero también demuestra que la vida continuó, como se observa por la presencia de cerámica y de artefactos líticos en los estratos superpuestos a dichos depósitos.

Patiño y Monsalve hacen una inferencia parecida en el caso del volcán Puracé, donde excavaron evidencias arqueológicas de asentamientos humanos que indican una continuidad de ocupaciones desde 10.000 años hasta 1500 años AP. Sugieren, además, que “los pobladores fueron testigos de la actividad volcánica del Puracé y otros volcanes vecinos” y que seguramente ello “pudo provocar, en algunos casos, el abandono temporal de los sitios de asentamiento, o también la reubicación en sitios cercanos...” (**Patiño & Monsalve**, 2015). Es demasiado temprano para afirmar que este haya sido el caso en el Guáitara. Aunque la actividad volcánica no haya sido de gran escala ni haya tenido carácter catastrófico, como lo afirma **Calvache** (1990), hay eventos volcánicos de pequeña escala que pueden dejar áreas extensas inutilizables para la agricultura y para la vida humana y animal durante varios años. Como bien lo anota **Posada-Restrepo** (2020), incluso pequeñas caídas de tefra pueden tener efectos serios. Otro ejemplo más lo suministra el trabajo de **López** (2019) con respecto al impacto que tuvo el sistema cerro Bravo-cerro Machín en el Tolima. El autor señala que el efecto de los lahares y los flujos piroclásticos y la caída de cenizas se puede observar en el paisaje, de donde se sigue que los pobladores de esa región “...se vieron impactados directa o indirectamente, lo que generó destrucción de sus viviendas y plantaciones, cambios en los ecosistemas, migraciones, etc.”, (**López**, 2019). Este tipo de escenarios solamente se podrán inferir en el área de influencia del Galeras

mediante estudios de paleoecología extensos integrados con estudios vulcanológicos. Lo que interesa en este momento es que podemos demostrar arqueológicamente la interacción de poblaciones humanas prehispánicas con la actividad del volcán en el segundo milenio antes de Cristo y en los siglos X y XI después de Cristo en la cuenca media del río Guáitara.

Nuestras fechas tempranas son importantes porque por primera vez tenemos información arqueológica sobre la sierra nariñense que puede ser comparada con fechas aún más tempranas en la sierra ecuatoriana obtenidas de excavaciones en los alrededores de Quito y un poco más al norte. Por ejemplo, la presencia de sitios paleoindios en El Inga, a pocos kilómetros al sureste de Quito (Bell, 1965, 2000; Nami & Stanford, 2016); el hallazgo de muchas puntas de proyectil y artefactos líticos en la sierra norte en las provincias de Pichincha, Imbabura y Carchi de posible origen temprano, aunque carecen de fechas absolutas (Ontaneda, 1998; Stothert & Sánchez, 2011); el trabajo de Carlucci (1963) en la década de 1960 sobre hallazgos de artefactos líticos "...al norte de Quito hasta Colombia..."; el importante número de investigaciones que dan cuenta de extensos sitios del periodo Formativo en cercanías de Quito, como por ejemplo Cotocollao (Villalba, 1988), y todos los trabajos mucho más recientes en la sierra norte de Ecuador, por ejemplo, la evidencia del Formativo Tardío de Los Soles, Provincia de Imbabura, donde se ha detectado el posible aprovechamiento antrópico de cenizas volcánicas entre los años 811 a.C. y 544 a.C. (Dyrhdal *et al.*, 2017), así como la posible presencia de una ocupación del periodo Paleoindio y la ocupación del Formativo Medio en Tagashima, Provincia de Pichincha (Ugalde *et al.*, 2020) y las excavaciones arqueológicas de Constantine en tres sitios de selva localizados en el borde del piedemonte oriental y occidental de la sierra norte: Guaguacanoayacu, Montequinto y Gran Cacao, con fechas que oscilan entre los 8000 y los 6000 años a.C. (Constantine, 2013), todos muy cercanos a las sierras y cañones nariñenses y con condiciones geomorfológicas, volcánicas y ambientales muy parecidas a las nuestras, hacen pensar que sitios de antigüedad parecida deben existir también en Nariño. La cantidad de evidencias sobre sitios tempranos de cazadores-recolectores y del periodo Formativo que hay en Ecuador nos hacen pensar que las fechas que presentamos hoy para Nariño son apenas el inicio de lo que puede llegar a ser la historia de un poblamiento mucho más temprano en el departamento. Del lado colombiano se presenta una situación parecida con sitios arqueológicos tempranos excavados en el departamento del Cauca, fechados alrededor de 9000 AP–10.000 AP, por ejemplo La Elvira, San Isidro y Las Guacas (Gnecco, 2000; Patiño *et al.*, 2015), y El Pomo, El Recreo y El Prodigio en el departamento del Tolima, fechados entre los 5600 AP–10.200 AP (Salgado *et al.*, 2019).

Conclusiones

Con base en lo anotado, pensamos que las fechas obtenidas en Bomboná permiten sugerir la existencia de una larga secuencia de habitación humana en la cuenca media del río Guáitara. El inicio de esta ocupación, según los datos que tenemos actualmente, ocurrió alrededor del año 2000 antes de Cristo y se caracteriza por la ausencia de cerámica y la presencia de artefactos líticos hechos mediante percusión y presión. Queremos enfatizar que no estamos proponiendo que en este sitio esté representada una etapa precerámica, pues, por el momento, nuestra información es muy preliminar. Simplemente hablamos de un nivel de ocupación humana sin cerámica, a la espera de comprender mejor la situación con otras excavaciones enfocadas metodológicamente a responder esta pregunta. Después de este tiempo, tenemos un vacío cronológico de dos mil años en la sierra del departamento de Nariño hasta el siglo III d.C, cuando contamos con evidencias de ocupación humana en el norte, en los municipios de La Cruz y La Unión, pero éstas ya son sociedades post-formativas que elaboran orfebrería muy compleja y cerámica con decoración negativa Capulí. Sin embargo, la cronología temprana que hay para la sierra ecuatoriana es un buen indicador de que en Nariño tenemos un vacío cronológico debido a la falta de investigaciones que deben adelantarse. El periodo Formativo en Cotocollao (Quito) se ubica entre los milenios primero y segundo a.C., y dada su cercanía geográfica con la sierra nariñense, llama la atención que para la misma época en Bomboná tengamos un sitio acerámico.

Las fechas establecidas por termoluminiscencia correspondientes a Bomboná 5, corte 1, coinciden con la actividad del Galeras entre los siglos X y XI d.C, y su contexto arqueológico y geológico sugiere que la población que estaba allí asentada se vio afectada por un evento posiblemente colateral, como lo fue el deslizamiento caótico del suelo. La contemporaneidad de estas fechas con la fecha existente del siglo XII d.C para esta misma área sugiere que la evidencia arqueológica de los asentamientos excavados por nosotros correspondería a la misma población que utilizó el cementerio prehispánico de Los Eucaliptos, ubicado a escasos 2 km de distancia. En este mismo territorio, a unos 5 o 6 km al sur subiendo el curso del río Guáitara, **Cárdenas-Arroyo & Bernal-Vélez (2019)** obtuvieron una fecha de 1380 ± 60 AP (cal 569-775 d.C) de una tusa de maíz carbonizada asociada indirectamente con cerámica de estilo Capulí en la vereda Argüello Alto. Considerando fechas un poco más tempranas, de inicios del siglo I d.C, en Malchinguí, al norte de Quito, **Doyon (1995)** piensa que la “influencia estilística Capulí” aparece por primera vez; asumiendo la posibilidad de que, en efecto, fuese allá donde empezó este estilo cerámico, se podría pensar que la cerámica tuvo un movimiento de sur a norte, semejante al que se ha comprobado para la orfebrería.

Por último, documentamos la actividad volcánica del Galeras proponiendo que no fue impedimento para la habitación humana en los últimos cuatro mil años, lo que documentamos en nuestras excavaciones.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestro colega y amigo Álvaro Bermúdez Páez por acompañarnos en campo y por su colaboración en el laboratorio. A Catherine Pardo Báez por su análisis mineralógico de las rocas halladas en BOM-3 C1. A la Fundación de Investigaciones Arqueológicas Nacionales del Banco de La República-Fian por la financiación de este proyecto. Al Instituto Colombiano de Antropología e Historia-Icanh por financiar la participación de Víctor González y por el préstamo del laboratorio en Bogotá. En Nariño a Felipe y Javier Díaz del Castillo y Germán Escandón por permitirnos trabajar en sus terrenos y acogernos en su casa. A Germán Zambrano por su ayuda con las muestras de suelos.

Contribución de los autores

FCA: aportes a la idea y diseño del proyecto, dirección de su ejecución, participación en terreno y laboratorio, redacción del artículo y revisión de su contenido. VGF: aportes a la idea y diseño del proyecto, participación en terreno y laboratorio, y revisión del contenido del artículo. ABV: aportes a la idea y diseño del proyecto, participación en terreno y laboratorio, revisión del contenido del artículo y diseño de las gráficas. DAG: participación en terreno, análisis de suelos, redacción del artículo, diseño de las gráficas y revisión de su contenido. NAG: participación en el análisis petrográfico y mineralógico, redacción del artículo y revisión de su contenido.

Conflicto de intereses

Los autores no presentan conflicto de intereses.

Referencias

- Banks, N.G., Calvache, M. L., Williams, S. N.** (1997). ^{14}C ages and activity for the past 50 ka at volcán Galeras, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77(1-4), 39-55.
- Bell, R. E.** (2000). *Archaeological Investigation at the Site of El Inga, Ecuador*. Norman: Oklahoma Museum of Natural History, R. E. Bell Monographs in Anthropology No.1.
- Bell, R. E.** (1965). *Investigaciones arqueológicas en el sitio de El Inga, Ecuador*. Quito: Editorial Casa de la Cultura Ecuatoriana.
- Bernal-Vélez, A.** (2011). *Cronología cerámica y caracterización de asentamientos prehispánicos en el centro andino del departamento de Nariño*. Bogotá: Instituto Colombiano de Antropología e Historia, Informes Arqueológicos No. 5.

- Bouchard, J. F.** (1996). Los datos de cronología cultural para el litoral del Pacífico nor-ecuatorial: Período Formativo Tardío y Período de Desarrollo Regional – sur de Colombia-norte del Ecuador. *Andes. Boletín de la Misión Arqueológica Andina*, 1, 137-152.
- Bouchard, J. F.** (1979). Hilos de oro martillado hallados en la costa pacífica del sur de Colombia. *Boletín Museo del Oro*, 2, 21-24.
- Calvache, M.L., Cortés, G.P., Williams, S.N.** (1997). Stratigraphy and chronology of Galeras Volcanic Complex, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77(1-4), 5-19.
- Calvache, M.L.** (1990). *Geology and volcanology of the recent evolution of Galeras Volcano Colombia*. [Tesis de maestría], Louisiana State University, Baton Rouge, USA.
- Cárdenas-Arroyo, F.** (2020). *Arqueología del valle de Atriz (Nariño, Colombia)*. Pinerolo (IT): Alzani Editore.
- Cárdenas-Arroyo, F. & Bernal-Vélez, A.** (2019). Excavaciones arqueológicas en el Valle de Atriz y el cañón del río Guáitara. En: *Investigaciones arqueológicas en Nariño, Colombia* (A. Bernal-Vélez y F. Cárdenas-Arroyo, Eds). Instituto Colombiano de Antropología e Historia.
- Cárdenas-Arroyo, F., González-Fernández, V., Bernal-Vélez, A.** (2024). *Arqueología en la cuenca media del río Guáitara (Nariño). Áreas de asentamiento, distribución espacial y cronología*. Fundación de Investigaciones Arqueológicas Nacionales (Manuscrito inédito).
- Carluci, M. A.** (1963). Puntas de proyectil. Tipos, técnica y áreas de distribución en el Ecuador Andino. *Humanitas. Boletín Ecuatoriano de Antropología*, IV(1), 5-56.
- Constantine, A.** (2013). The early settlement of Continental Ecuador: New evidence from preceramic sites in the tropical rainforest. *Quaternary International*, 317, 112-117.
- Cubillos, J. C.** (1955). *Tumaco. Notas Arqueológicas*. Ministerio de Educación–Departamento de Extensión Cultural.
- Díaz del Castillo, E.** (2017). *El Galeras, Pasto y Bomboná*. Pasto: Edinar.
- Doyon, L.** (1995). La secuencia cultural Carchi-Nariño vista desde Quito. En: *Perspectivas regionales en la arqueología del suroccidente de Colombia y norte del Ecuador* (C. Gnecco, Ed). Editorial Universidad de Cauca.
- Dyrdahl, E.** (2022). Obsidian acquisition networks in Northern Ecuador from 1600 to 750 cal BCE. *Journal of Archaeological Science Reports* 44, (103530), 1-11.
- Dyrdahl, E., Montalvo, C.E., Valverde-Arco, V.** (2017). Una historia complicada: ceniza volcánica y su uso en el Período Formativo Tardío en la Sierra Norte del Ecuador a través del caso del sitio ‘Los Soles’ (sector Las Orquídeas). En: *Volcanes, cenizas y ocupaciones antiguas en perspectiva geoarqueológica en América Latina* (M. F. Ugalde, Ed). Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Estrada, E.** (1956). *Valdivia: un sitio arqueológico formativo en la costa de la provincia de Guayas, Ecuador*. Museo Víctor Emilio Estrada #1.
- Fernández, E.** (1994). *Distribución espacial y temporal en el área quillacinga*. [Tesis de grado inédita], Universidad de Los Andes.
- Francisco, A. E.** (1969). *An Archaeological Sequence from Carchi, Ecuador*. [Tesis de doctorado inédita], Universidad de California.
- Gnecco, C.** (2000). *Ocupación temprana de los bosques tropicales de montaña. Popayán*: Editorial Universidad del Cauca.
- Gómez, A. M.** (1991). *Muellamués: una vieja morada en el altiplano nariñense*. [Tesis de grado inédita], Universidad Nacional de Colombia.
- Gómez, J., Montes, N.E., Nivia, Á., Diederix, H.**, compiladores. (2015). *Mapa Geológico de Colombia*. Escala 1:1 000 000. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano (2 hojas).
- Groot-de Mahecha, A. M.** (2019). Pupiales. En: *Áreas arqueológicas protegidas de Colombia*. Instituto Colombiano de Antropología e Historia-ANH.
- Hall, M. & Calle, J.** (1982). Geochronological control for the main tectonic–magmatic events of Ecuador. *Earth Sci. Review*, 18, 215–239.
- Kroonenberg, S.** (1983). A Grenvillian granulite belt in the Colombian Andes and its relations to the Guiana Shield. *Geologie en Mijnbouw*, 61, 325-333.
- Litherland, M., Aspden, J. A., Jemielita, R. A.** (1994). *The metamorphic belts of Ecuador*. British Geological Survey, Overseas Memoir 11.
- López, C. E.** (2019). Arqueología del Bajo y Medio río Magdalena: apuntes sobre procesos de poblamiento prehispánico de las Tierra Bajas tropicales interandinas de Colombia. *Revista del Museo de La Plata*, 4, 2, 275-304.

- Maya-Cabrera, M. C.** (2024). *Proyecto: Visita ICANH, rescate hallazgo fortuito en el Centro de Investigaciones Agrosavia, sitio arqueológico CIAO21, corregimiento de Obonuco-Nariño*. Instituto Colombiano de Antropología e Historia.
- Maya, M. & González, H.** (1995). Unidades litodémicas de la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico de Ingeominas*, 35, 43-57.
- Mendoza-Acosta, R. & Henri-Marín, K.** (2023). Cronología y contextos funerarios prehispánicos en El Porvenir, municipio de Iles, departamento de Nariño, Colombia. *Jangwa Pana*, 22(1), 1-21.
- Millard, A.R.** (2014). Conventions for reporting radiocarbon determinations. *Radiocarbon*, 56(2), 555-559.
- Monsalve-Bustamante, M.L.** (2020). The volcanic front in Colombia: Segmentation and recent and historical activity. En: Gómez, J. y A. O. Pinilla-Pachon (eds.) *The Geology of Colombia*, Volume 4 Quaternary. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 38.
- Morales-Gómez, J.** (1985). La guaquería en Colombia: el caso de Pupiales. *Universitas Humanística*, 8, (8-9), 77-83.
- Nami, H. G. & Stanford, D. J.** (2016). Dating the Peopling of Northwestern South America: An AMS Date from El Inga Site, Northwestern Ecuador. *PaleoAmerica*, 2(1), 60-63.
- Nelson H. W.** (1959). *Contribution to the Geology of the Central and Western Cordillera of Colombia in the sector between Ibagué and Cali*. Leidse geologische mededelingen, Deel 22.
- Ontaneda-Luciano, S.** (1998). Arqueología de la Sierra Norte del Ecuador. Secuencia cronológica y perspectivas regionales. En: *Intercambio y comercio entre costa, Andes y selva. Arqueología y etnohistoria de Suramérica* (F. Cárdenas-Arroyo y T.L. Bray, Eds). Departamento de Antropología, Universidad de Los Andes.
- Patiño-Castaño, D.** (2003). *Tumaco prehispánico: asentamiento, subsistencia e intercambio, costa pacífica de Colombia*. Popayán: Universidad del Cauca, Serie Estudios Sociales.
- Patiño-Castaño, D.** (1995). El altiplano nariñense, el valle de Sibundoy y la ceja de montaña andina en el Putumayo: investigaciones de arqueología de rescate. *Cespedesia*, 20(66), 115-180.
- Patiño-Castaño, D.** (1993). Arqueología del Bajo Patía, fases y correlaciones en la costa pacífica de Colombia y Ecuador. *Latin American Antiquity*, 4(2), 180-199.
- Patiño-Castaño, D.** (1991). Fases arqueológicas en el Bajo Patía, Nariño, Costa Pacífica. Colombia. En: *San Agustín 200 años 1790-1990*. Fundación de Investigaciones Arqueológicas Nacionales.
- Patiño-Castaño, D. & Monsalve-Bustamante, M.L.** (2015). *Arqueología y vulcanismo en la región del Puracé, Cauca*. Universidad del Cauca y Servicio Geológico Colombiano.
- Plazas, C.** (1977-78). Orfebrería prehispánica del altiplano nariñense, Colombia. *Revista Colombiana de Antropología*, 21, 197-244.
- Posada-Restrepo, W. A.** (2020). *Arqueología en territorios de incandescencia*. Bogotá: Instituto Colombiano de Antropología e Historia (Colección Antes del Presente-AP).
- Reichel-Dolmatoff, G.** (1986). *Arqueología de Colombia. Un texto introductorio*. Fundación Segunda Expedición Botánica.
- Reichel-Dolmatoff, G.** (1962) Investigaciones arqueológicas en la costa pacífica de Colombia. II. Una secuencia cultural del bajo río San Juan. *Revista Colombiana de Antropología*, 11, 1-72.
- Reichel-Dolmatoff, G.** (1961). Investigaciones arqueológicas en la costa pacífica de Colombia. I—El sitio de Cupica. *Revista Colombiana de Antropología*, 10, 237-340.
- Salgado-López, H. & Varón-Barbosa, M.** (2019). Early Prehispanic settlement in the Magdalena Valley in Tolima, Colombia. Balance and perspectives. *Quaternary International*, 505, 55-58.
- Stoherth, K. E. & Sánchez, A.** (2011). Culturas del Pleistoceno Final y el Holoceno Temprano en el Ecuador. *Boletín de Arqueología PUCP*, 15, 81-119.
- Toussaint, J. F.** (1996). *Evolución geológica de Colombia, Cretácico*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ugalde, M. F., Dyrddhal, E., Montalvo, C., Constantine, A.** (2020). *Excavación arqueológica en el sitio Tagashima*. Instituto Metropolitano de Patrimonio [Informe Final inédito].
- Valdéz, F.** (1987). *Proyecto arqueológico La Tolita*. Quito: Museos del Banco Central del Ecuador.
- Villalba, M.** (1988). *Cotocollao. Una aldea formativa del Valle de Quito*. Miscelánea Antropológica Ecuatoriana, Serie Monográfica No.2. Museo del Banco Central del Ecuador.

Original article

Effect of granularity on the superconducting parameters of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconducting material

Efecto de la granularidad en los parámetros superconductores del material superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

✉ Ibrahim Torres-Mahmud^{1,*}, ✉ Nicolás Piragua-Ortiz¹, ✉ Eliana M. Vargas-Pineda¹,
✉ David A. Landínez Téllez^{1,2}, ✉ Jairo Roa-Rojas^{1,2}

¹ Grupo de Física de Nuevos Materiales, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

² Grupo de Estudios de Materiales GEMA, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

Abstract

We conducted an analysis of the coherent transition behavior of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconducting material by varying its granular properties. Considering the sintering temperature-grain size relation, we created six samples of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ through solid state synthesis and subjected them to the following sintering temperatures: 860°C, 870°C, 880°C, two samples at 890°C, and one at 900°C. Once the synthesis process was completed, we characterized the samples by analyzing their crystallographic structure, morphology, and magnetic response. The Rietveld refinement of diffraction patterns confirmed the structural single phase and its crystal structure; the scanning electron microscopy images extracted an increasing relation between grain size and sintering temperature, and the magnetic analysis determined a constant critical pairing temperature of $T_c = 93(1)$ K, a constant lower critical field of $H_{c1} = 0.5(2)$ kOe, and an increasing critical density current and ‘saturation’ temperature, T_{sat} . This behavior probably responds to T_c and H_{c1} being related to the pairing transition and T_{sat} to the coherence transition.

Keywords: Superconductivity; Granularity; Critical parameters; Coherence transition; Perovskite; Grain size.

Resumen

Se analizó el comportamiento de transición coherente del material superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ variando sus propiedades granulares. Considerando la relación entre la temperatura de sinterización y el tamaño de grano, se fabricaron seis muestras de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ mediante síntesis en estado sólido. Cada muestra se sometió a las siguientes temperaturas de sinterización: 860 °C, 870 °C, 880 °C, dos muestras a 890 °C y una a 900 °C. Una vez finalizado el proceso de síntesis, se caracterizaron las muestras mediante el análisis de la estructura cristalográfica y morfológica y la respuesta magnética. Utilizando el refinamiento de Rietveld de los patrones de difracción se confirmó la fase única estructural, así como su estructura cristalina; las imágenes de microscopía electrónica de barrido evidenciaron una relación creciente entre el tamaño de grano y la temperatura de sinterización, y el análisis magnético se utilizó para determinar una temperatura crítica de apareamiento constante de $T_c = 93(1)$ K, un campo crítico inferior constante de $H_{c1} = 0,5(2)$ kOe, y una corriente de densidad crítica y una temperatura de “saturación”, T_{sat} , crecientes. Se cree que este comportamiento responde a la relación de T_c y H_{c1} con la transición de emparejamiento y la de la T_{sat} con la transición de coherencia.

Palabras clave: Superconductividad; Granularidad; Parámetros críticos; Transición de coherencia; Perovskita; Tamaño de grano.

Citation: Torres-Mahmud I, *et al.* Effect of granularity on the superconducting parameters of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconducting material. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(189):742-751, octubre-diciembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2650>

Editor: Rafael González Hernández

***Corresponding author:**
Ibrahim Torres-Mahmud;
itorresm@unal.edu.co

Received: May 22, 2024

Accepted: September 12, 2024

Published on line: November 8, 2024



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

Introduction

High T_c superconductors have been a topic of thorough research since their discovery (**Bednorz & Müller, 1986**), these cuprate type-perovskite ceramics reached a critical temperature above liquid nitrogen not long after their discovery, being YBCO ceramics their first representative (**Wu *et al.*, 1987**).

YBCO ceramics made via solid state synthesis are composed by a multi-grain structure which divides the resistive superconducting phase in two different transitions: an intragranular pairing transition at T_c , where each grain reaches a superconducting state individually and an intergranular coherent transition at T_{cs} , where all the sample becomes superconductive (**Rosenblatt *et al.*, 1990**). Near the coherent transition, phase fluctuations of the superconducting order parameter lead to electron tunneling through the insulating media between grains, that is, on the insulating-superconducting interface. These electron-tunneling phenomena have been called Josephson-like effects, which are thought to be grain size or porosity-dependent. Due to this dependence, to observe these fluctuations, grain size and/or porosity will have to be controlled; it has been observed that varying the sintering temperature causes a change in the sample's porosity (**Prayoonphokkharat *et al.*, 2013**). Since Josephson effects occur near the coherent transition, or in other words, near a critical temperature, critical behavior is expected. In the process of this characterization, critical parameters of our YBCO samples are calculated and then corroborated with the reported values found on the literature.

YBCO samples are also type II superconductors, which exhibit a mixed state where magnetic field lines partially enter the sample in the form of vortices called Abrikosov vortices (**Ostermann *et al.*, 1998**). It has already been mentioned the critical pairing temperature T_c and the critical coherence temperature T_{cs} , there is also a lower critical field H_{c1} which determines the moment these Abrikosov vortices start to flow inside the sample and an upper critical field H_{c2} which turns the sample to the normal non-superconducting phase; related to these fields there is also a critical current density J_c that breaks superconductivity. Another critical parameter is the penetration depth λ which is a measure of the mean distance the magnetic field lines enter the sample at its borders and the coherence length ξ that relates to the mean distance two electrons need to be to form a cooper pair (those responsible for superconductivity and super-currents).

Analyzing magnetic isotherms (magnetization versus applied field curves) in the superconducting state, lead to hysteresis loops which are studied by the Bean's model (**Cyrot *et al.*, 1992**). From this model, a relation between the change in magnetization ΔM and the critical current density J_c has the form of equation (1).

$$J_c = 2 \frac{\Delta M}{d} \quad (1)$$

where d is the mean grain size of the sample being analyzed and ΔM is the change in magnetization observed in the magnetization M versus applied field H plot.

Recent papers have studied this coherent transition via doping and coating of the YBCO samples with different materials, and different synthesis methods, to achieve novel behaviors that may guide us to understand the electronic mechanisms around this transition. One example analyzes the magnetic properties of two different deposition methods (IBAD and RABiTS) and demonstrates the appearance of magnetic granularity, where the films trap super-particles and creates an opposing magnetic field that shifts the maximum in hysteresis isotherms loops (**Palau *et al.*, 2003**); another one uses multilayers of YBCO/PLCMO (Manganite) and finds a contrary effect of normal superconductors, where under the critical temperature T_c its properties are really resistive, while an increase in an applied magnetic field recovers the coherent state and the sample begins superconducting (**Mallett *et al.*, 2016**).

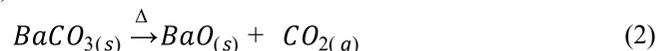
The $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ is a superconductor type-perovskite ceramic compound which has been observed to crystallize in the Pmmm (#47 Orthorhombic) space group and has the following lattice parameters at 297 K: $a = 3.82030(8) \text{ \AA}$, $b = 3.88548(10) \text{ \AA}$, $c = 11.68349(23)$

Å and $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$; its crystal structure is made up of a three floor perovskite with three Cu-O planes, two Ba-O planes and a single Y in the middle of the second floor (**Williams *et al.*, 1988**).

The precursor oxides used to form our $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ were as follows: Y_2O_3 , $BaCO_3$ and CuO; purity details, synthesis process and other characteristics of the oxides used are found in the synthesis section.

Yttrium(III) Oxide (Y_2O_3) has been observed to crystallize in the Ia3 (#206 Cubic) space group with the following lattice parameters at 294 K: $a = b = c = 10.6056(3)$ Å and $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ (**Bladinozzi *et al.*, 1998**). It has a melting point of around 2410 °C, its crystal structure is similar to a cubic bixbyite (Mn_2O_3) (**Yong-Nian *et al.*, 1997**).

Barium Carbonate ($BaCO_3$) crystallizes in the Pmcn (#62 Orthorhombic) space group with lattice parameters: $a = 5.3126(5)$ Å, $b = 8.8958(5)$ Å, $c = 6.4284(5)$ Å and $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$; its crystal structure is similar to the aragonite ($CaCO_3$) (**De Villiers, 1971**). At around 1000-1450 °C $BaCO_3$ undergoes a decomposition into barium oxide (BaO) and carbon dioxide gas (CO_2), which does not take part in the sintering process and leaves the reaction, letting BaO as the main precursor oxide in the diffusion of the grains (synthesis section); BaO has a melting point of around 1923 °C and the decomposition reaction is observed in equation (2) (**Patnaik, 2002**).



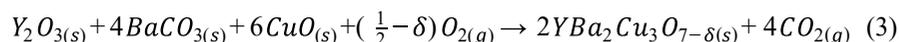
Copper(II) Oxide (CuO) crystallizes in the C2/c (#15 Monoclinic) space group with lattice parameters at 11 K: $a = 4.6833(2)$ Å, $b = 3.4208(1)$ Å, $c = 5.1294(2)$ Å, $\beta = 99.567(1)^\circ$ and $\alpha = \gamma = 90^\circ$ (**Brese *et al.*, 1990**). It has a melting point of 1326 °C and its crystal structure is in an approximately square planar configuration (**Forsyth *et al.*, 1991**).

Experimental procedures

Annealing and sintering processes were made using a Thermo Scientific Lindberg/Blue tubular furnace. Phase identification was made through XRD measurements using a Panalytical Xpert Pro PW1710 diffractometer, with Cu K α $\lambda = 1.5406$ Å radiation, ranging from $0^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$; Rietveld refinement, using *GSAS* software, of these data was compared with *CIF* files taken from *COD* data base from previous phase identification, resulting images were done using *VESTA* software. Morphological analysis was made through SEM-EDX measurements using a Tescan VEGA 3 microscope; using *ImageJ* software, grain size and porosity measurements were done, EDX data was used to corroborate composition. VSM analysis was made using Quantum Design's VersaLab magnetometer; superconductive parameters were measured here.

Synthesis

The $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ samples were made via high-temperature solid-state synthesis. As mentioned before, the precursor oxides were Y_2O_3 , $BaCO_3$ and CuO with 99.99 %, 99.8 % and 99.995 % of purity, respectively. A total mass of 2 g was set, and based on this mass, stoichiometry calculations were made following the reaction in equation (3).



The stoichiometry calculations, taking purity into account, can be found in **table 1**.

Table 1. Stoichiometry calculations for oxides with their respective purity.

Oxide	Purity (%)	Mass (g)
Y_2O_3	99.99	0.3026(2)
$BaCO_3$	99.8	1.0599(2)
CuO	99.995	0.6396(2)

Before using the powder oxides, a sample drying was made for 18 hours at 120 °C. Then, after carefully weighing the amounts of oxides in **table 1** on a balance, a grinding process on an agate mortar was done on the calculated bulk samples, this process took about a total of three hours. This, now single powder, was then turned into pellets of 0.9(1) cm in diameter and were pressed at 5.0×10^8 Pa. This process was made two times, and four cylindrical pellets were made each time, two pellets were taken from the first four (the other two were lost in the sintering process) and the whole four samples from the second, adding to six samples total.

After the six pellets were made, they were subjected to an annealing process for 48 hours at $T = 850$ °C for the first two and at $T = 880$ °C for the other four. Following this annealing process, a 30-minute final grinding was done, together with another pelleting by which the same six samples were made. Finally, a sintering process was done to the six samples at $T = 890, 900$ °C for the first two and $T = 860, 870, 880, 890$ °C for the remaining four. In this sintering ramp there is a second thermal treatment that starts at $T = 450$ °C, this corresponds to an oxygenation process necessary in these oxygen deficient YBCO samples, since it ensures some gets trapped inside the sample increasing its oxygen content.

After the annealing process of the six samples was done (before differentiating them by its sintering temperature), XRD analysis was used to characterize them and to confirm the single $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ phase. Then, after the sintering process of each of the six pellets had ended, SEM and VSM analysis was applied to them.

Crystal structure

Since there were only two different sets of samples after the annealing process (one for each annealing temperature), two diffractograms were analyzed. It was observed from both raw diffractograms that the amorphous, low-angle phase, is significantly lower than the principal peaks. Considering this is only after the annealing process, the following sintering will be enough to confirm a reaction has taken place. Phase identification with peak comparison showed a single $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ phase from both, so a Rietveld refinement using these phases could be done.

Figure 1 exemplifies these Rietveld refinements. Lattice and Rietveld parameters are found in **table 2**.

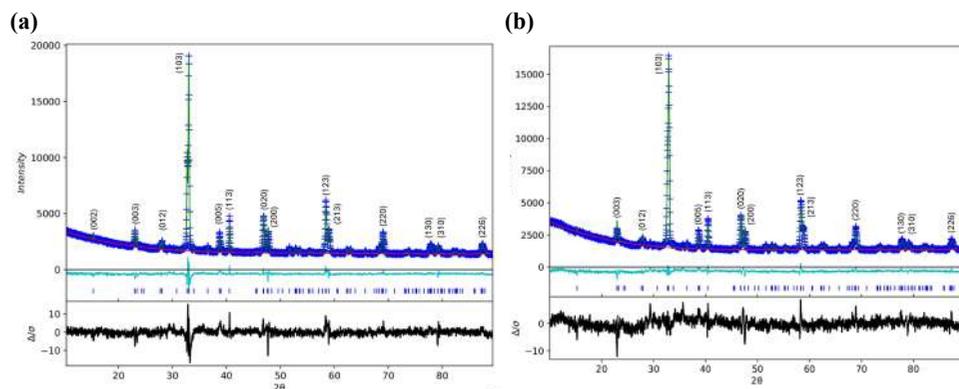


Figure 1. Rietveld refinement from both samples at different annealing temperatures. **(a)** $T = 850$ °C for the first two samples and **(b)** $T = 880$ °C for the other four.

Table 2. Lattice and Rietveld parameters for both refinements.

Sample	a(Å)	b(Å)	c(Å)	R_{wp} (%)	χ^2
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ I	3.8225(2)	3.8841(2)	11.6774(6)	4.27	3.52
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ II	3.8272(2)	3.8847(3)	11.670(1)	4.17	3.21

It was found then that these $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ samples crystallized in the Pmmm (#47 Orthorhombic) space group as expected (Williams *et al.*, 1988).

In both cases, a R_{wp} below 5% was observed and a χ^2 below 5, which represents a good fitting of the data. **Figure 2** shows the crystal structure of both samples from the XRD analysis.

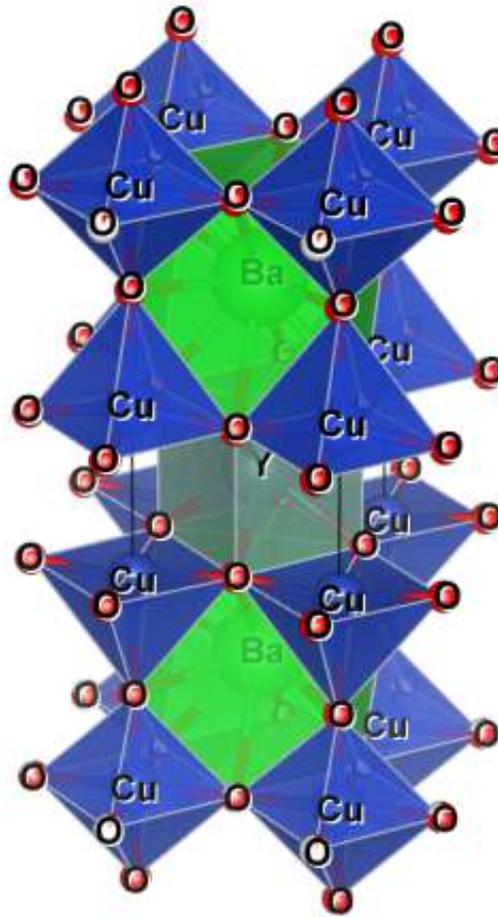


Figure 2. Crystal structure of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ samples after Rietveld refinement.

Morphological characterization

Following the sintering process, where the six samples were already differentiated by its sintering temperature, SEM pictures were taken to verify the mean grain size to sintering temperature relation. **Figure 3** shows each picture and its corresponding sintering temperature.

The method used to calculate each grain size was through a measure of their area and determining a mean diameter using $d = 2\sqrt{A/\pi}$.

Figure 4 represents the mean grain size to sintering temperature relation after calculating the grain size from **figure 3**.

As can be observed, this is an increasing relation as expected from diffusion and merging between grains. This increasing behavior leads to the final step: calculating the critical superconducting parameters from magnetic measurements and calculate them as a function of the grain size. It is important to keep in mind that there are only five data points since one of the two samples at $T = 890^\circ\text{C}$ (**figure 3d**) had a green phase during the sintering process and will not be part of the results.

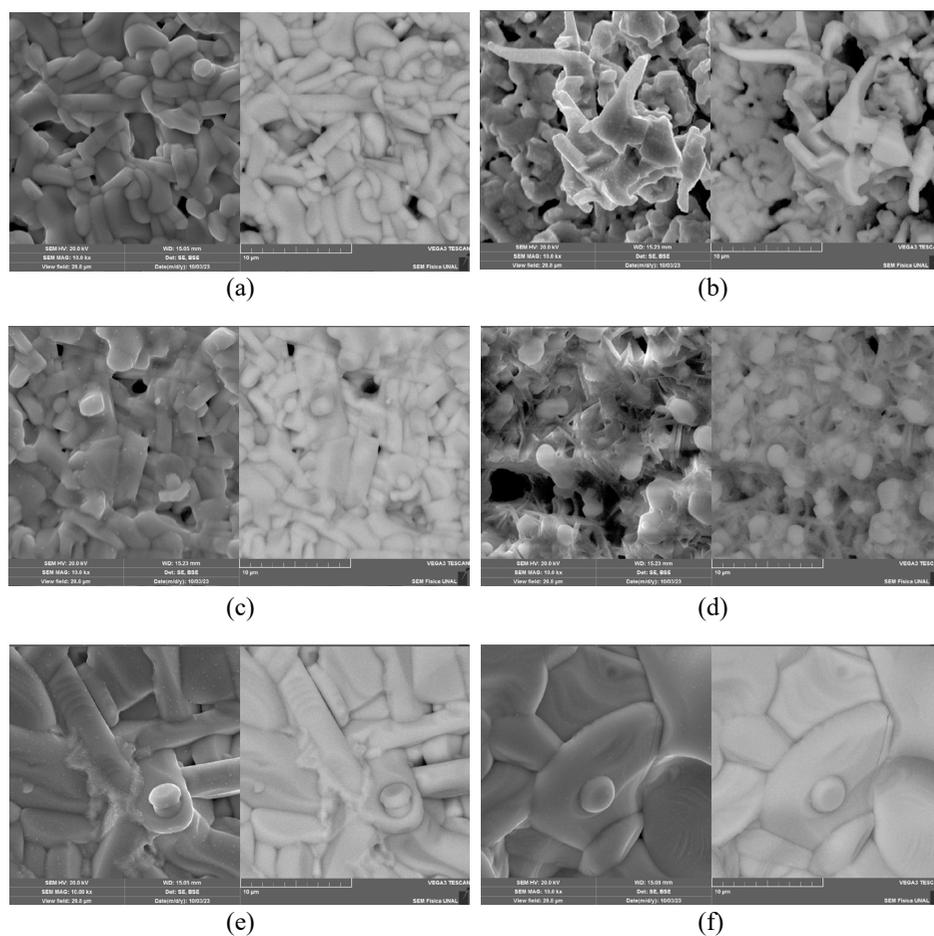


Figure 3. The previous plots show the SEM pictures at the following sintering temperatures: (a) 860 °C, (b) 870 °C, (c) 880 °C, (d) 890* °C, (e) 890 °C and (f) 900 °C.

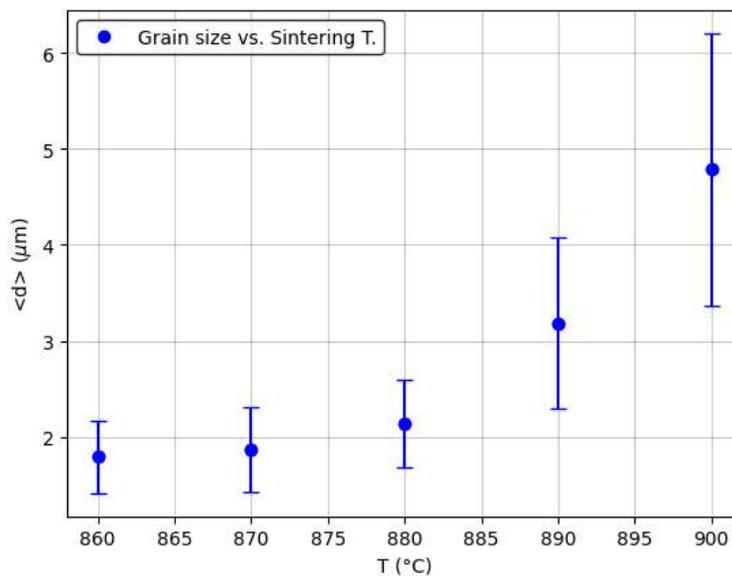


Figure 4. Grain size versus sintering temperature plot.

Magnetic response

Magnetic measurements on VSM were taken to calculate the superconducting parameters. Three curves were extracted from these measurements for each sample: a $T = 300$ K and $T = 50$ K magnetization M versus applied field H isotherms and a constant $H = 10$ Oe magnetization M versus temperature T curve.

In **figure 5** the M versus H relation at $T = 50$ K is plotted.

A hysteresis loop corresponding to Bean's model is observed, at this temperature the sample has already had a superconducting transition. Here, the lower critical field H_{c1} and the change in magnetization ΔM can be extracted, ΔM is used to calculate the critical current density J_c from Bean's model (equation 1).

To calculate the lower critical field H_{c1} , it was used a convention which takes a linear regression after the magnetization minimum, that is, on the mixed superconducting region, the H_{c1} will be where this regression intersects its minimum. A value of $H_{c1} = 0.82(4)$ kOe was obtained. ΔM was calculated taking a lower and upper linear regression on the region furthest from the exponential behavior and computing the difference between them at $H = 28$ kOe, resulting in $\Delta M = 0.12(5)$ emu/g.

In **figure 6** the magnetization M versus temperature T at $H = 10$ Oe is plotted.

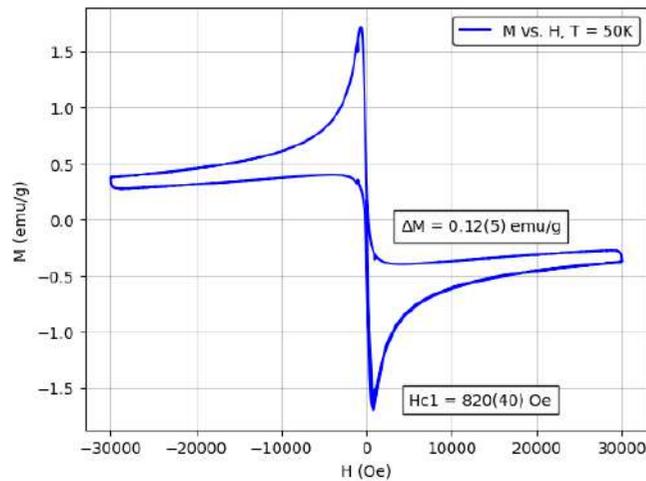


Figure 5. Magnetization M versus applied field H ($T = 50$ K) from the $T = 890$ °C sample.

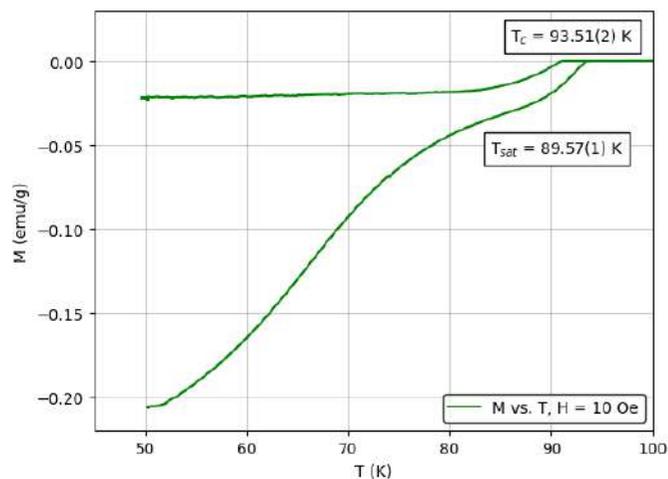


Figure 6. Magnetization M versus temperature T ($H = 10$ Oe) from the $T = 870$ °C sample.

The upper side of the graph represents the FC curve and the lower the ZFC. Here, important temperature parameters can be extracted, these parameters are the critical pairing temperature T_c and what has been called a saturation temperature T_{sat} .

To calculate T_c the usual convention was used, taking a linear regression of the paramagnetic part of the graph and a linear regression when the sample starts to expel the external field, that is, when negative magnetization appears, T_c will be the intersection point between them. A value of $T_c = 93.51(2)$ K was obtained.

T_{sat} was calculated from the expelling regression in the previous step, and a linear regression when this curve has had a change in slope, the intersection point will be the T_{sat} . This inflection point has been attributed to the coherent region, a granular transition where Josephson vortices prevent a further decrease in magnetization and saturates the curve. Once this saturation ends, the Meissner region has been achieved and a decrease in magnetization is again observed.

It is important to know that this temperature was not labeled as a coherent transition because this saturation interval is not well defined for all the samples, so it cannot be compared to coherence of grains, but they could be related. Nonetheless, electric measurements which will be done to the samples, will show this coherence transition effectively and will be compared to these magnetic results to show if they are the same or if they have a functional relation. A $T_{\text{sat}} = 89.57(1)$ K was obtained from this plot.

A relation between H_{c1} and grain size d is not observed (interpreted as a constant behavior), so an arithmetic average was used to obtain a lower critical field of $H_{c1} = 0.5(2)$ kOe; this constant relation refers to the fact that Abrikosov vortices will enter the sample at H_{c1} , even if there is no grain interface. This is because these vortices only have to do with superconducting grains in the sample and not with grain interfaces.

Figure 7a shows the critical current density J_c (calculated from equation 1) as a function of the grain size. It represents an increasing relation, so a regression of the form ax^b was

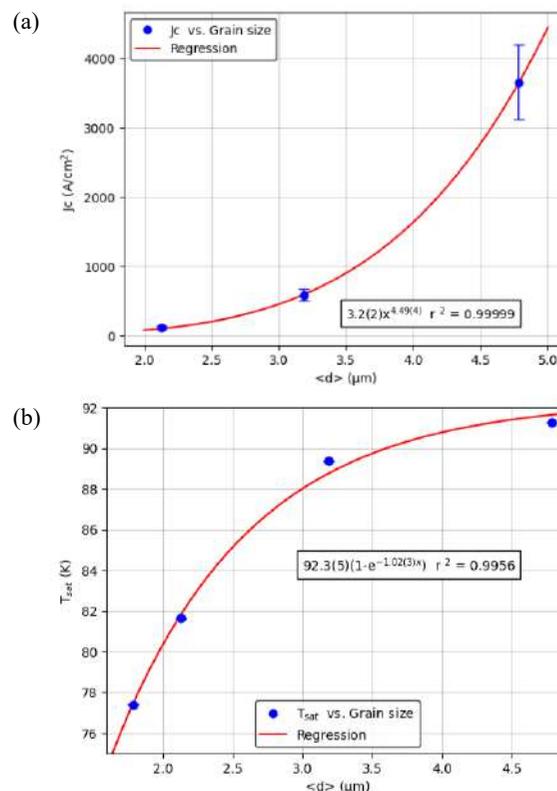


Figure 7. (a) Critical current density J_c versus d (b) Saturation temperature T_{sat} versus d .

done with parameters $a = 3.2(2) \text{ A/cm}^2 \mu\text{m}^b$ and $b = 4.49(4)$ as well as a $r^2 = 0.99999$ correlation; this increasing relation may be because, as mean grain size increases, super-currents can flow in a larger space without reaching a non-superconducting grain interface.

Once again, a relation is not observed in the T_c -d plot so it is interpreted as a constant behavior, and its average was $T_c = 93(1) \text{ K}$; in accordance with its first study (**Wu *et al.*, 1987**); this can only be since the pairing transition happens in each grain independently (**Rosenblatt *et al.*, 1990**).

Figure 7b shows the saturation temperature T_{sat} as a function of the grain size. An increasing relation can be recognized and a regression of the form $a(1 - e^{bx})$ was done with parameters $a = 92.3(5) \text{ K}$ and $b = -1.02(3)$ and a $r^2 = 0.9956$ correlation. It was also expected an increasing relation from this temperature; this is because it is thought to be related to the coherence transition, this means, as grain size increases, less grain interfaces are observed, and it is not required to reach as much low temperature to start a coherence communication between grains. So, when there are no more grain interfaces, T_{sat} could converge to the critical pairing temperature T_c .

Conclusions

XRD confirmed the phase, and lattice parameters were extracted from Rietveld refinement, SEM analysis showed an increasing dependence on sintering temperature, VSM analysis determined a constant $T_c = 93(1) \text{ K}$ and $H_{c1} = 0.5(2) \text{ kOe}$ as well as an increasing behavior of J_c and T_{sat} . This phenomenon is explained since T_c and H_{c1} have to do with the pairing transition, while T_{sat} could be related to the coherence transition; this hypothesis will only be confirmed by characterizing the coherence transition from electrical measurements.

Acknowledgements

This work was partially supported by DIEB of the National University of Colombia (Hermes Code 57456).

Author contributions

ITM synthesized the samples, performed the structural, morphological, and magnetic characterizations, and wrote the paper. NPO synthesized the samples and performed structural and morphological characterizations. EMVP synthesized the samples and directed the structural, morphological, and magnetic analyses. DALT coordinated, directed, and interpreted structural and morphological analyses. JRR proposed and directed the project, coordinated the work team, interpreted and correlated the experimental and theoretical results.

Conflicts of interest

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

References

- Bednorz J. G., Muller K. A.** (1986). Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, 64, 189-193.
- Bladinozzi G., Bézar J. F., G. Calvarin.** (1998). Rietveld Refinement of Two-Phased Zr-Doped Y2O3. *Materials Science Forum*, 278-281, 680-685.
- Brese N. E., O'Keefe M., Ramakrishna B.L.** (1990). Low-Temperature Structures of CuO and AgO and Their Relationships to Those of MgO and PdO. *Journal of Solid State Chemistry*, 89, 184-190.
- Cyrot M., Pavuna D.** (1992). Introduction to Superconductivity and High- T_c Materials.
- J. B. Forsyth and Hull S.** (1991). The effect of hydrostatic pressure on the ambient temperature structure of CuO. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 3, 5257-5261.
- De Villiers J. P. R.** (1971). Crystal Structures of Aragonite, Strontianite, and Witherite. *The American Mineralogist*. 56.

- Mallett B. P. P., Khmaladze J., Marsik P., Perret E., Cerreta A., Orlita M., Biškup N., Varela M., and Bernhard C.** (2016). Granular superconductivity and magnetic-field-driven recovery of macroscopic coherence in a cuprate/manganite multilayer. *Physical Review B*, 94(18), 180503.
- Ostermann F., Ferreira L. M., Cavalcanti C. J. H.** (1998). Supercondutividade Uma proposta de inserção no ensino médio.
- Palau A., Puig T., Obradors X., Usoskin A., Freyhardt H. C., Fernández L., and Holzapfel B.** (2003). Inductive Analysis of Magnetic Granularity Effects in YBCO IBAD and RABiTS Coated Conductors. *Physica C: Superconductivity*, Volumes 408-410, 2004, pp. 866-868.
- Patnaik P.** (2002). Handbook of Inorganic Chemical. 1st ed. McGraw-Hill Professional.
- Pineda-Peña, G., Vargas-Pineda, E., Rivera-Contreras, L., Téllez, D.A., Roa-Rojas, J.** (2021). Superconducting Critical Parameter Calculation from the Analysis of the Paraconductivity in $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 35, 1-8. DOI: 10.1007/s10948-021-06019-1.
- Prayoonphokkharat P., Jiansirisomboon S., Watcharapasorn A.** (2013). Fabrication and Properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Ceramics at Different Sintering Temperatures. *Electronic Materials Letters* 9,4.
- Rosenblatt, J., Raboutou, A., Peyral, P., Lebeau C.** (1990). Intragranular and intergranular transitions in Y-Ba-Cu-O ceramics. *Revue de Physique Appliquée*, 25(1), 73-78. DOI: 10.1051/rphysap:0199000250107300
- Williams, A., Kwei, G. H., Von Dreele, R. B., Raistrick, I. D., Bish, D. L.** (1988). Joint x-ray and neutron refinement of the structure of superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$: Precision structure, anisotropic thermal parameters, strain, and cation disorder. *Physical Review B* 37,13.
- Wu M. K., Ashburn, J. R., Torng, C. J., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., Huang, Z. J., Wang, Y. Q., Chu, C. W.** (1987). Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure. *Physical Review Letters*, 58, 908.
- Yong-Nian X., Zhong-quan G., Ching W. Y.** (1997). Electronic, structural, and optical properties of crystalline yttria. *Physical Review B*, 56, 23.

Artículo original

Desarrollo y evaluación de celdas fotovoltaicas orgánicas nanoestructuradas

Development and evaluation of nanostructured organic photovoltaic cells

✉ Jonathan Romero-Atencio^{1,*}, ✉ Andrea Carolina Ramos-Hernández¹,
✉ Mario Alberto Romero-Colange¹, ✉ Jean Christian Guy-Bernede²,
✉ Linda Cattin Guenadez², ✉ Guy Louarn², ✉ Gean Carlos Arteaga-Arroyo³

¹ Grupo de Investigación de Química Supramolecular Aplicada, Universidad del Atlántico, Puerto Colombia, Colombia

² Departamento de Física, Facultad Ciencias Exactas, Universidad de Nantes, Nantes, Francia

³ Grupo de Investigaciones Biomédicas y Biología Molecular, Universidad del Sinú, Montería, Colombia

Resumen

En este trabajo se explora la optimización y caracterización de celdas fotovoltaicas orgánicas que utilizan colectores de electrones nanoestructurados. Como material colector se utilizaron nanovarillas de óxido de zinc (ZnO), un material que ha sido ampliamente estudiado en este campo. Las nanovarillas de ZnO se sintetizaron mediante una técnica de deposición electroquímica en sustratos de vidrio recubierto de óxido de indio y estaño (ITO). Para el proceso de síntesis de las nanovarillas de ZnO se ajustó la temperatura de síntesis electroquímica a 70 °C durante una hora y el potencial de reducción fue de -1,0 V. Las películas obtenidas se caracterizaron utilizando difracción de rayos X (DRX), microscopio electrónico de barrido (SEM) y espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS). Se emplearon películas de ZnO/ITO como cátodo en las celdas fotovoltaicas fabricadas. Se construyeron siete dispositivos en los cuales se evaluó la influencia del ZnO, del polímero conjugado P3HT y del derivado del fullereno PCBM como materiales activos, así como de las configuraciones de estructura clásica e inversa de la celda. Se registraron las curvas características J-V para los dispositivos construidos y se encontró que aquellos que no tenían las nanovarillas de ZnO presentaron un mejor comportamiento. Los mejores resultados se dieron con la configuración clásica PHJ-OPVs Vidrio/ITO/MoO₃ (5 nm) /P3HT:PCBM/LiF (1 nm) /Al (100 nm), para la cual los valores obtenidos fueron $J_{sc} = 4,9 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 0,4 \text{ V}$ y $FF = 34,9$ bajo iluminación, en tanto que la eficiencia de conversión de energía (η) fue del 0,7 %.

Palabras clave: Celdas fotovoltaicas orgánicas; Nanovarillas de ZnO; Depósito electroquímico; P3HT; Configuración clásica; Eficiencia de conversión de energía.

Abstract

Here we explore the optimization and characterization of organic photovoltaic cells using nanostructured electron collectors. We used ZnO nanorods, a widely studied material in this field, as the collector material, and we synthesized them through an electrochemical deposition technique on ITO glass substrates. We adjusted the electrochemical synthesis temperature to 70°C for one (1) hour using a reduction potential of -1.0 V for the ZnO nanorod synthesis process. We characterized the resulting films by XRD, SEM, and XPS and used the ZnO/ITO films as the cathode in the fabricated photovoltaic cells. We constructed seven devices and evaluated the influence of ZnO, the conjugated polymer P3HT, and the fullerene derivative PCBM as active materials, as well as the classic and inverted cell structure configurations. We recorded J-V characteristic curves for the constructed devices and we found that those without ZnO nanorods had a better performance. The best results were obtained with the classic PHJ-OPV Glass/ITO/MoO₃ (5 nm) /P3HT:PCBM/LiF (1 nm) /Al (100 nm) configuration where $J_{sc} = 4.9 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 0.4 \text{ V}$, and $FF = 34.9$ under illumination; the power conversion efficiency (η) was 0.7 %.

Citación: Romero-Atencio J, *et al.* Desarrollo y evaluación de celdas fotovoltaicas orgánicas nanoestructuradas. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(189):752-767, octubre-diciembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2665>

Editor: Diógenes Campos

***Correspondencia:**

Jonathan Romero Atencio;
jonathanromero@mail.uniatlantico.edu.co

Recibido: 4 de junio de 2024

Aceptado: 9 de octubre de 2024

Publicado en línea: 8 de noviembre de 2024



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

Keywords: Organic photovoltaic cells; ZnO nanorods; Electrochemical deposition; P3HT; Classic configuration; Power conversion efficiency.

Introducción

Hace más de cinco décadas comenzó la investigación en torno a las celdas fotovoltaicas orgánicas (OPVCs). En los últimos 20 años, han suscitado un creciente interés científico gracias a su capacidad para generar energía a bajo costo, y su rendimiento sigue mejorando. Se han reportado en otras investigaciones, como la eficiencia de conversión de energía (PCE), en laboratorio para las OPVCs que superan el 19.05% (**Chong *et al.*, 2022**). Este tipo de celdas presentan varias ventajas, como ser respetuosas con el medio ambiente, ligeras, flexibles y fáciles de implementar. Sin embargo, sus principales limitaciones para su comercialización han sido su corta vida útil, su estabilidad y una eficiencia de conversión de energía relativamente baja en comparación con las celdas solares inorgánicas. A pesar de estas limitaciones, son ampliamente utilizadas en dispositivos electrónicos portátiles y en algunos sistemas fotovoltaicos integrados en edificios. Además, se emplean en diseños de celdas solares multiunión de alta eficiencia en sistemas fotovoltaicos espaciales. Las celdas solares de triple unión, que constituyen un tipo especial de OPVCs son capaces de combinar tres tipos diferentes de materiales semiconductores para capturar una gama más amplia del espectro solar. En la actualidad, la fabricación de las OPVCs puede ser por heterounión a granel (BHJ) o heterounión planar (PHJ). El BHJ implica la incorporación de dos tipos distintos de materiales semiconductores. Uno permite el desplazamiento de los huecos (donante de electrones), el otro de los electrones (aceptor de electrones), mientras que en la interfaz (la heterounión) produce la separación de las cargas de los excitones. El PHJ es una estructura en la que se superponen capas de moléculas donantes de electrones (ED) yceptoras de electrones (EA). Estas capas se encuentran entre dos electrodos, siendo uno de ellos transparente para facilitar la absorción de la luz. Para optimizar el rendimiento de estas celdas, es posible incorporar capas tampón delgadas entre los electrodos y el material orgánico. Por lo general, en estas celdas se utiliza como aceptor de electrones (EA) el fullereno (C60) o un derivado del fullereno, como el Poli (3,4-etilendioxitiofeno) (PCBM). Los fullerenos poseen una excelente capacidad para capturar electrones y exhiben una alta movilidad de electrones. A pesar de estas propiedades ventajosas, los fullerenos presentan ciertas limitaciones. En primer lugar, no absorben significativamente en la región visible del espectro solar. Además, su modificación química no es sencilla, lo que resulta en una baja flexibilidad estructural y dificulta la adaptación de las propiedades electrónicas y ópticas para complementar la absorción de luz en relación con los donantes de electrones. En este trabajo, se abordó estas limitaciones mediante el siguiente enfoque: se analizó la influencia del tamaño de los cristalitos y las propiedades morfológicas en el mecanismo de síntesis electroquímica de una capa amortiguadora de ZnO. Se ajustaron las propiedades de esta capa para utilizarlas como capas colectoras de electrones en la celda fotovoltaica. Además, se fabricaron celdas fotovoltaicas orgánicas en la configuración con una heterounión BHJ convencional, utilizando el polímero P3HT el cual tiene la capacidad de absorber luz y generar electrones y un derivado del fullereno PCBM, los cuales se emplearon como capa activa y aceptor de electrones, respectivamente.

Materiales y métodos

Reactivos y materiales

Para la síntesis de las nanovarillas de ZnO y la fabricación de las celdas se emplearon los siguientes reactivos sin purificación previa: Acetato de Zinc dihidratado (Sigma-Aldrich, $\geq 98\%$), acetato de sodio trihidratado (Merck, $\geq 99\%$), ácido acético glacial (Merck, 100%), P3HT (Sigma-Aldrich, regioregularidad $\geq 98.5\%$), PCBM (Sigma-Aldrich, regioregularidad $\geq 99.5\%$), Cloruro de boro subftalocianina (SubPc, CODEX, $\geq 99\%$), fluoruro de litio (LiF, Merck, $\geq 99.9\%$), Ioduro de cobre (CODEX, $\geq 98\%$), Fullerenos (C60 CODEX, $\geq 99.5\%$), Tris(8-hidroxiquinolinato) de aluminio (Alq3 CODEX, $\geq 98\%$), Trióxido de Molibdeno (CODEX, $\geq 85\%$), agua milli-Q, acetona (Merck, $\geq 99.8\%$), Isopropanol (Merck, $\geq 99.5\%$). Como sustrato se emplearon láminas de vidrio recubiertas por ITO (2.5x2.5 cm).

Fabricación de celdas fotovoltaicas

Para este estudio se construyó una celda de referencia con una configuración basada en la reportada por (Emad et al. 2020). En esta celda, el sustrato de vidrio/ITO funciona como ánodo, la capa activa está compuesta del par C60/SubPc, y una capa de MoO₃ como transportador de huecos, figura 1a. Se construyeron otras 2 celdas con configuración inversa en las cuales se estudió el efecto de la inserción de las nanovarillas de ZnO en la estructura de la celda y la composición de la capa activa, figura 1b y 1c. En estos sistemas, el sustrato vidrio/ITO funciona como cátodo, y las nanovarillas ZnO se emplearon como colectores de carga, y la mezcla P3HT:PCBM como capa activa. Por último, basado en los resultados obtenidos de las pruebas con nanovarillas de ZnO, se construyó una celda con configuración clásica sin nanovarillas de ZnO, figura 1d. A continuación, se describen los procedimientos empleados para la construcción de las celdas.

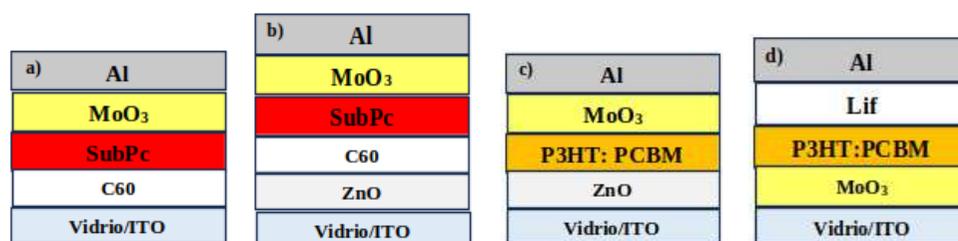


Figura 1. Esquema de celdas construidas (a) celda de referencia y (b-c) estructura inversa, (d) estructura clásica

Síntesis de nanovarillas de ZnO sobre vidrio ITO

Antes de realizar el proceso de síntesis de las nanovarillas de ZnO, se realizó un proceso de preparación de la superficie del sustrato de vidrio ITO. Este proceso consistió en lavados sucesivos del vidrio con agua milli-Q, seguido por acetona e iso-propanol. En cada etapa de lavado, se aplicaron 15 minutos de sonicación para asegurar la eliminación completa de cualquier impureza presente en la superficie. Paralelamente, se preparó la solución electrolítica consistente en acetato de sodio 0.1 M, y acetato de Zinc 0.01 M. El pH de esta solución fue ajustado a 6.5 agregando gotas de ácido acético, y fue sometida a burbujeo con oxígeno de alta pureza durante 30 minutos, a una temperatura de 70 °C la cual se mantuvo en este valor durante el proceso de síntesis. La perturbación potenciostática se realizó en una celda electroquímica típica de tres electrodos: el vidrio ITO se empleó como electrodo

de trabajo sobre el cual tuvo lugar el crecimiento de las nanovarillas de ZnO, una lámina de zinc como contraelectrodo y un electrodo de calomel saturado como electrodo de referencia. El potencial de reducción se mantuvo en -1.0 V durante el proceso de síntesis, para el cual se estableció un tiempo de reacción de 1 hora.

Síntesis de P3HT:PCBM

El composite P3HT:PCBM, que es la capa activa de la estructura clásica e inversa, se obtuvo siguiendo el siguiente procedimiento de síntesis: en 5 mL de diclorobenceno se disolvieron 0.1 g de P3HT, posteriormente fue agregado el PC61BM asegurando una relación másica P3HT:PC61BM igual a 1:1. La mezcla resultante se mantuvo en agitación vigorosa en ausencia de luz durante 20 horas, y después fue guardada en frasco ámbar hasta su uso.

Descripción de la fabricación de las capas de la celda y caracterización

La técnica utilizada para la fabricación de la celda fue la deposición por sublimación o evaporación de películas delgadas. Primero, dado que el sustrato de vidrio estaba completamente recubierto de ITO, fue necesario grabar $\frac{1}{4}$ de la superficie para evitar cualquier efecto de cortocircuito al construir la celda. Para realizar este grabado, se utiliza una pequeña cantidad de polvo de aluminio y una gota de ácido clorhídrico. A continuación, el sustrato se lava durante 10 segundos con un jabón neutro, se enjuaga con agua desionizada y se seca con una propipeta para eliminar el agua y dejar la superficie completamente limpia. Posteriormente, los sustratos se calientan durante 10 minutos a 100 °C y se introducen en una cámara de vacío equipada con una microbalanza de cuarzo. Para alcanzar un vacío de 10^{-4} Pa, las capas de la celda se subliman, dejando la muestra lista para ser colocada en el porta muestras del equipo figura 2. Es importante mencionar que las capas de ZnO y P3HT descritas anteriormente fueron depositadas mediante otras técnicas. Para el procedimiento se utilizaron tres muestras.



(a) Equipo de sublimación y evaporación



(b) Porta muestra del equipo

Figura 2. Esquema del equipo de sublimación y evaporación de alto vacío.

Resultados y Discusión

En la figura 3, se presentan los difractogramas obtenidos para las nanovarillas de ZnO sintetizadas. La muestra ZnO-A corresponde aquella a la cual se sometió a calentamiento a 150°C durante 30 min, mientras que la muestra ZnO-B es la muestra a la cual no se realizó este tratamiento. Los patrones de difracción obtenidos fueron comparados con las cartas cristalográficas reportadas para las fases cristalinas del ZnO. Adicionalmente, estos difractogramas fueron comparados con la carta cristalográfica del SiO₂ para detectar la posible contaminación de las muestras generada en el proceso de recolección desde los vidrios/ITO.

En ambas muestras analizadas se identifican picos de alta intensidad en las posiciones 2θ cercanas a 31°, 34°, 36°, 47° y 56°, estos picos corresponden a los planos de Miller de (010), (002), (011), (012) y (110), respectivamente. Al hacer la comparación con las cartas cristalográficas de referencia se determinó que estos picos corresponden a la fase cristalina wurtzita ICSD 67454 (ICSD release 1989). Esta fase cristalina se caracteriza por una geometría hexagonal con grupo espacial 186 (P63mc). En estos difractogramas el pico más intenso (002) se genera por la orientación preferencial de la estructura cristalina a lo largo de su eje *c*, este comportamiento es típico en la obtención de nanovarillas de ZnO, y se explica por el crecimiento perpendicular de las nanoestructuras sobre el sustrato en el cual son sintetizadas. (Romero, Henriquez, & Dalchiele, 2016). Los picos ubicados en las posiciones 2θ cercanas a 30° y 37° corresponden a los generados por el SiO₂ proveniente del vidrio/ITO.

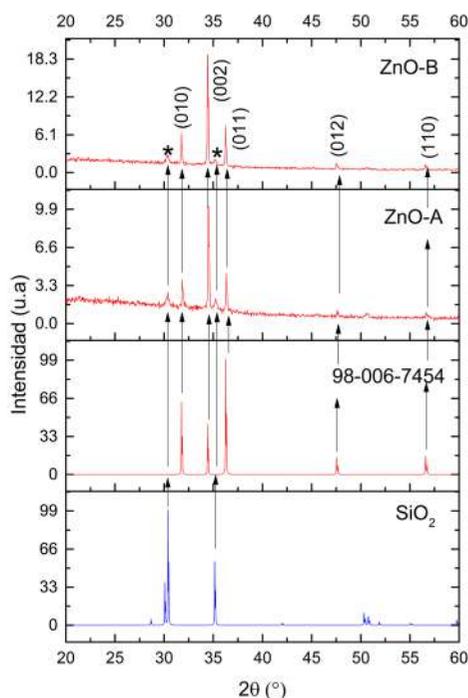


Figura 3. Patrones de difracción de rayos X de muestras de nanovarillas de ZnO que fueron sintetizadas electroquímicamente en nanotubos de ZnO en sustratos de vidrio recubiertos con una capa de ITO

En la figura 4 se muestran las imágenes SEM de las nanoestructuras de ZnO obtenidas. A primera vista, no se observan diferencias morfológicas entre las películas ZnO-A y ZnO-B,

este resultado se complementa con los obtenidos por DRX, y se corrobora que el calentamiento aplicado a 150°C a la muestra ZnO-A no causa modificaciones estructurales. Por otro lado, se evidencia la formación de estructuras hexagonales características de la fase cristalina wurtzita en las nanovarillas de ZnO.

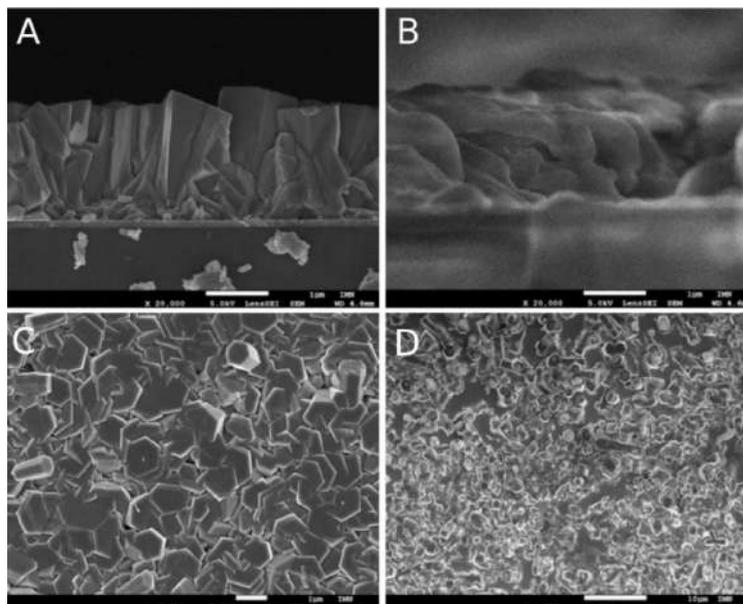
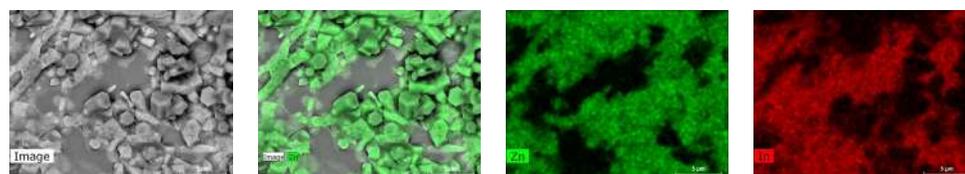


Figura 4. Imágenes de Microscopia electrónica para el material ZnO-A (A y C) y ZnO-B (B y D).

En las imágenes presentadas en la **figura 5** se muestra el análisis elemental realizado por EDS acoplado al SEM. Las **figuras 5b** y **5c** corresponden al mapa elemental generado para el Zn proveniente del ZnO; en estas se observan zonas oscuras que indican ausencia de este elemento, y al superponer estas imágenes con la **figura 5d** se encontró que estas zonas son ocupadas por el In, el cual es uno de los elementos encontrados en el ITO. Este hallazgo indica que la distribución de las nanovarillas de ZnO en el vidrio ITO no fue uniforme, generando zonas de aglomeración y ausencia de este material.



(a) Micrografía SEM de Zn. **(b)** Distribución de Zn en mapeo EDS **(c)** Mapa EDS mostrando Zn en la muestra **(d)** Mapa EDS mostrando In en la muestra

Figura 5. Micrografías SEM y mapeos EDS que muestran la distribución de Zn e In en la muestra de nanovarillas de ZnO.

ZnO: XPS

Los espectros de las nanovarillas de ZnO de las muestras depositadas en ITO como sustratos están representados en las Figuras 6-9, que se obtuvieron de muestras tratadas a 150 °C durante 30 minutos y muestras no tratadas calentadas. El análisis de los espectros anteriores proporciona información sobre la composición química y los enlaces formados en

las películas de ZnO y, por lo tanto, da una idea de que el calentamiento cambia un poco las características. Los espectros de alta resolución adquiridos para el O1s se muestran en las Figuras 7 y 8 para las muestras no calentadas y calentadas a 150 °C, respectivamente. La forma de la curva y los picos gaussianos resultantes de estos espectros se han desconvolucionado utilizando un software de procesamiento. Los subpicos representan los diferentes estados de enlace del oxígeno en la muestra. Las energías de enlace, los FWHM y los porcentajes atómicos de los diferentes componentes se muestran en la Tabla 1.

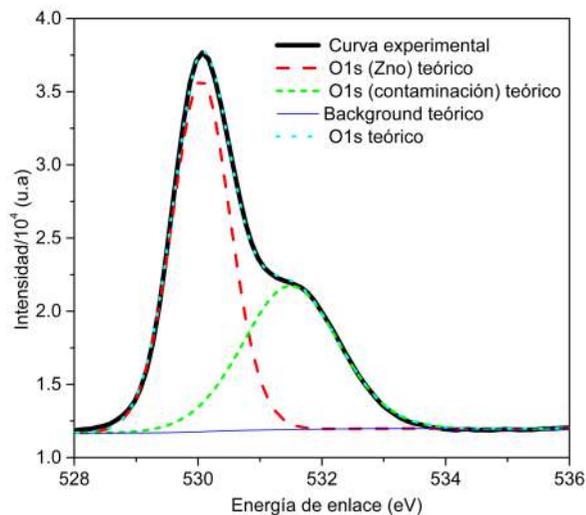


Figura 6. Espectro XPS para ZnO con tratamiento térmico a una temperatura de 150 °C durante 30 minutos O1s.

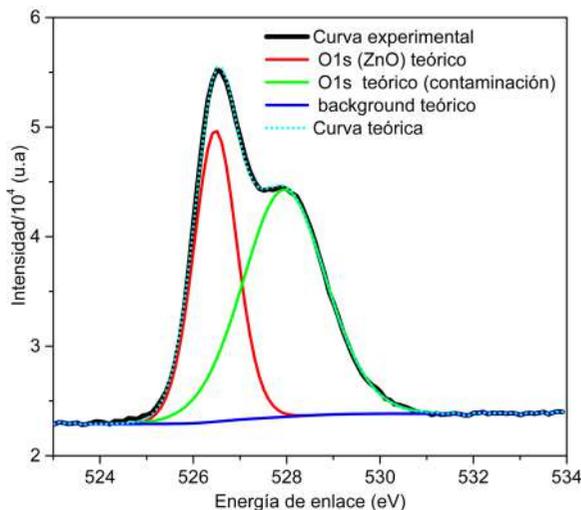


Figura 7. Espectro XPS para ZnO sin tratamiento O1s.

En la figura 6 el pico de la curva experimental corresponde a la emisión de 530.01 eV reflejando un oxígeno predominantemente asociado con la matriz de ZnO, el segundo pico emergió en el análisis con una emisión de 531.59 eV a pesar de su menor intensidad en

comparación con el primer pico, su presencia es significativa, la interpretación de este pico indica la existencia de grupos carbonilo (C=O), sugiriendo una contaminación orgánica en la superficie de la muestra cómo se encuentra en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados obtenidos del depósito de ZnO, orbital O1s.

Nombre	Posición	Intensidad Inicial	Área Inicial	Área	% at conc
O s1	530.01	24438	34927.8	14617	69.81 ZnO
O s1	531.59	9129.43	15096.7	63439.6	30.19 C=O contaminación

Por lo tanto, si se hace una comparación entre la figura 6 y 7, se puede observar que después del calentamiento térmico, la contribución de la contaminación superficial disminuye del 60% al 40%, mientras que la contribución del ZnO sin tratamiento aumenta del 40% al 60%. Esto indica que el calentamiento térmico mejora la pureza de la capa de ZnO al eliminar los contaminantes superficiales. Los defectos estructurales en las nanoestructuras de ZnO pueden actuar como centros de recombinación para los portadores fotogenerados, lo que afecta el rendimiento de los dispositivos optoelectrónicos (Upama *et al.*, 2018). La presencia de otros picos en el O1s sugiere una regular cristalinidad de las nanoestructuras de ZnO, lo que también se confirma por los patrones de difracción de rayos X reportados en este estudio.

En la figura 8 y 9 muestran los espectros de Znp corresponde a un doblete $2p_{1/2}$ y $2p_{3/2}$. La teoría indica que es una visión común que el área del $3/2$ sea el doble del $1/2$, El pico de $2p_{1/2}$ aparece a 1044.4 eV y el de $2p_{3/2}$ a 1021.3 eV. Los electrones en cualquier orbital p pueden tener dos orientaciones de espín distintas, usualmente descritas como spin-up ó spin-down. Estas orientaciones de espín son consecuencia de las propiedades cuántica de los electrones y dan lugar a desdoblamientos en las líneas espectrales cuando se observan bajo ciertas técnicas analíticas, como la XPS.

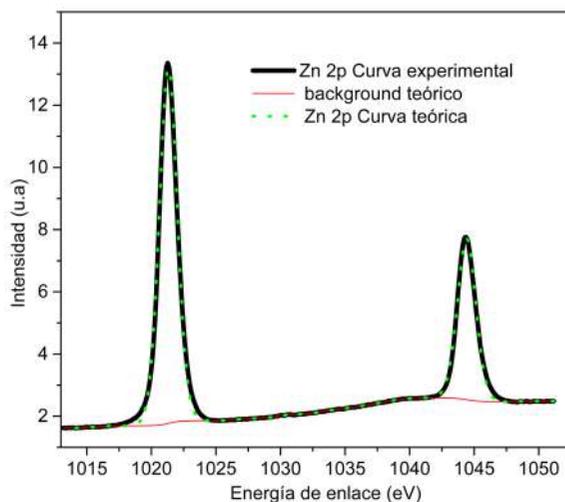


Figura 8. Espectro XPS para ZnO con tratamiento térmico Zn.

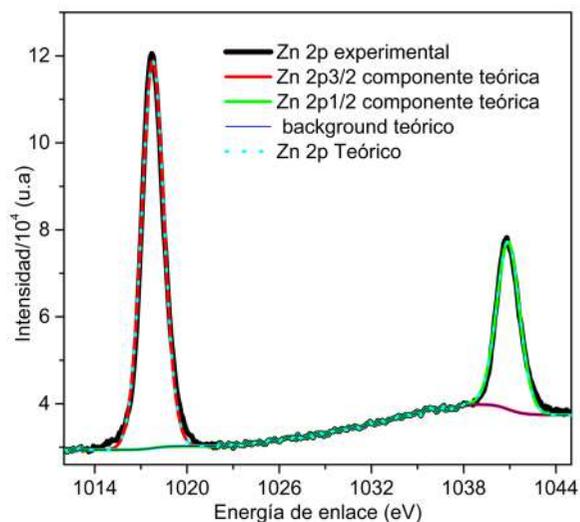


Figura 9. Espectro XPS para ZnO sin tratamiento Zn.

Las características típicas de corriente-voltaje (J-V) observadas para este tipo de dispositivos se presentan a continuación en la Figura 10: Características J-V de la configuración clásica de OPV_s con heterounión de fases (PHJ) Vidrio/ITO/C60/SubPc/MoO₃/Al.

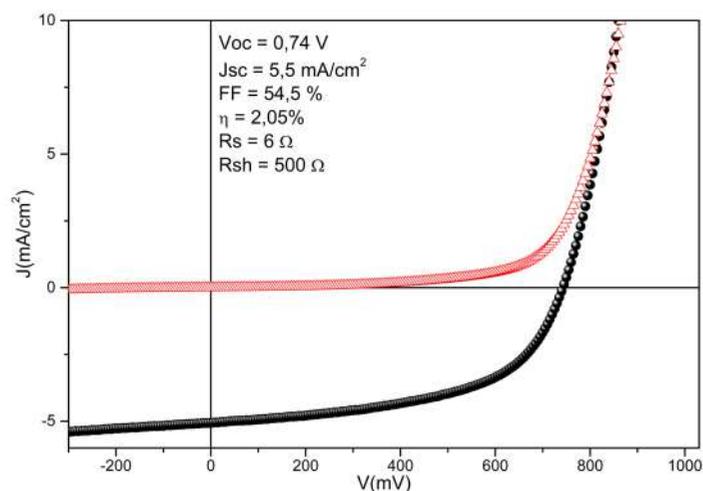


Figura 10. Características de J-V de la configuración inversa PHJ-OPV_s Vidrio/ITO/C60/SubPc/MoO₃/Al.

La figura 10 muestra el comportamiento de una celda fotovoltaica orgánica de heterounión plana bajo dos condiciones de operación distintas, analizando dos curvas que representan diferentes escenarios de operación. La curva negra con esferas ilustra el rendimiento de la celda cuando está expuesta a la luz, comenzando en el origen y aumentando de manera exponencial con el voltaje, lo que es típico en dispositivos fotovoltaicos, ya que refleja la generación de corriente en respuesta a la iluminación (Fengler & Dittrich, 2015; Upama *et al.*, 2018). Por otro lado, la curva roja con triángulos muestra la respuesta de la celda en oscuridad, permaneciendo casi plana cerca del eje Y. La curva negra proporciona información sobre el rendimiento bajo iluminación, mientras que la curva roja permite evaluar

la calidad de la unión donador/aceptor. Bajo iluminación, se registró un voltaje de circuito abierto (V_{oc}) de 0.74 V y una corriente de cortocircuito (J_{sc}) de 5.55 mA/cm², indicando un potencial de conversión de energía del 2.05 %, que es un valor representativo aunque con margen de mejora (Cattin *et al.*, 2010). Las resistencias serie (R_s) y en derivación (R_{sh}), con valores de 6 Ω y 500 Ω respectivamente, son indicadores clave de las pérdidas internas y la eficiencia del transporte de carga, siendo fundamentales para la optimización del rendimiento de la celda (Aatif & Tiwari, 2020). V_{oc} y J_{sc} reflejan la eficiencia potencial bajo condiciones ideales, mientras que el factor de llenado (FF) y la eficiencia (η) evalúan la calidad y capacidad de conversión del dispositivo. La ausencia de una curva en el cuarto cuadrante indica que no se consideró la operación bajo carga en este análisis. Este gráfico J-V proporciona un mapa detallado del comportamiento eléctrico de la celda fotovoltaica bajo iluminación, permitiendo identificar parámetros críticos como el factor de llenado, la eficiencia y las resistencias internas, esenciales para evaluar y mejorar el rendimiento del dispositivo (Aatif & Tiwari, 2020).

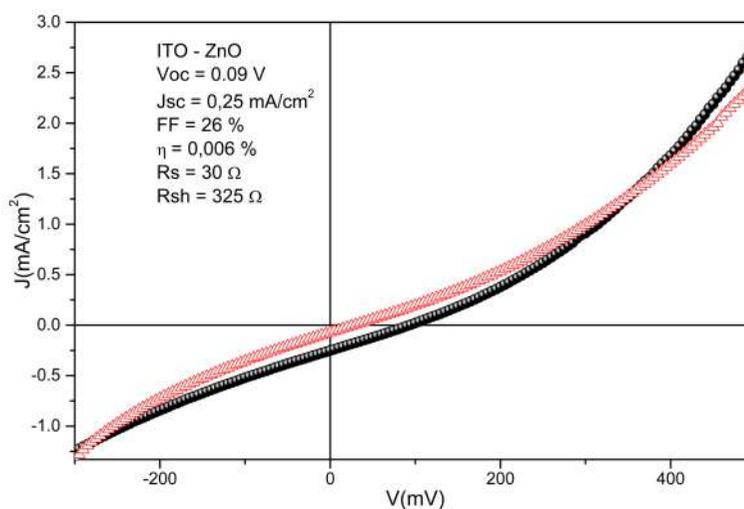


Figura 11. Características J-V Vidrio/ITO/ZnO/C60/SubPc/MoO₃/Al de la configuración inversa de OPV_s con heterounión de fases (PHJ).

En esta estructura, se introduce una capa de ZnO como capa de transporte de electrones, que facilita la extracción eficiente de electrones hacia el electrodo, optimizando el rendimiento global de la celda, en línea con los parámetros críticos discutidos previamente (Cattin *et al.*, 2010). La celda solar analizada tiene un V_{oc} de 0.09 V, un valor bajo que se atribuye al grosor excesivo de la capa de ZnO (cerca de 2 μ m), lo que afecta negativamente la eficiencia del dispositivo. La corriente desviada debido a este grosor afecta el rendimiento, por lo que se optó por un espesor de 40 nm para el SubPc, optimizando así los parámetros de rendimiento. Entre las configuraciones probadas, la estructura inversa ITO/C60/SubPc/MoO₃/Al mostró los mejores resultados, alineándose con los objetivos de eficiencia y absorción de luz (Aatif & Tiwari, 2020; Cattin *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2016; Fengler & Dittrich, 2015; Upama *et al.*, 2018). El factor de llenado (FF) de 26 % sugiere que la curva J-V podría no ser ideal, con R_s de 30 Ω y R_{sh} de 325 Ω , lo que indica que el R_s podría estar limitando el flujo de corriente, y el R_{sh} , aunque no extremadamente bajo, podría mejorarse para minimizar pérdidas de corriente no deseadas. El análisis de estos parámetros indica que, aunque la celda puede generar un voltaje considerable, existen áreas clave que podrían mejorarse para aumentar la eficiencia general (Del Pozo *et al.*, 2003; Zhao, Wang, & Zhan, 2018).

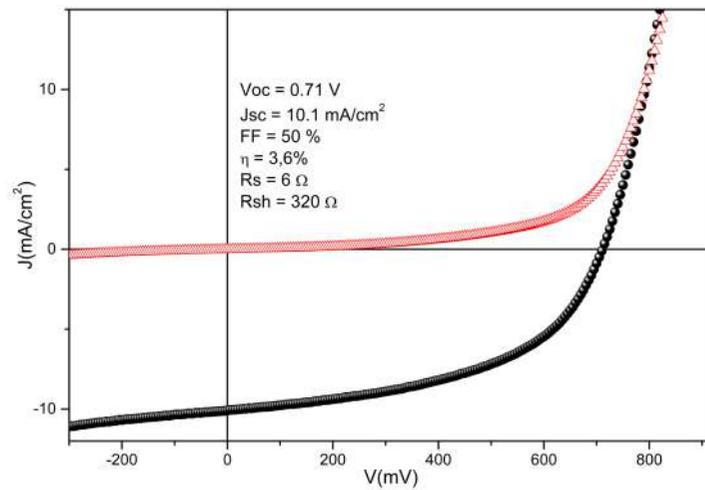


Figura 12. Características J-V de la configuración inversa de OPV_s con heterounión de fases (PHJ) Vidrio/ITO/C60/SubPc/MoO₃/Al.

La modificación en el espesor de SubPc resultó en un mejor rendimiento, como se muestra en la Figura 12. La curva J-V presenta un aumento inicial gradual que luego se vuelve exponencial, lo que es característico de la generación de energía bajo iluminación. El Voc fue de 0.71 V, el Jsc de 10.1 mA/cm² y la eficiencia (η) fue del 3.6 %, un valor aceptable. Los valores de Rs y Rsh de 6 Ω y 320 Ω respectivamente, sugieren una reducción en las pérdidas internas en comparación con celdas anteriores, mejorando la calidad del dispositivo (Yin & Dadmun, 2011). En general, aunque hay ciertos factores que limitan el desarrollo óptimo de los parámetros en estas celdas, la eficiencia obtenida, que varía desde un bajo 0.006 % hasta un 3.6 %, muestra que existen áreas de mejora significativa.

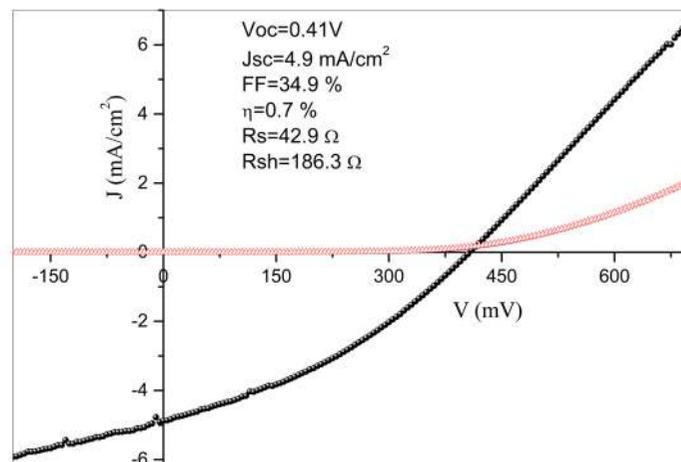


Figura 13. Características de J-V de la configuración clásica Vidrio/ITO/MoO₃ (5nm)/P3HT:PCBM/LiF (1 nm)/Al (100 nm).

La Figura 13 presenta la curva característica corriente-voltage (J-V) de una celda fotovoltaica orgánica (OPV), destacando aspectos relevantes para su análisis. El valor del voltaje de circuito abierto (Voc) es adecuado, con valores típicos alrededor de 0.5 V, y la densidad de corriente de cortocircuito (Jsc) es de 4.9 mA/cm², lo que es aceptable para este

tipo de celda. La eficiencia alcanzada es del 0.7 %, un valor que, aunque bajo, es prometedo considerando las condiciones del experimento (El-Menyawy *et al.*, 2019). Los valores de R_s y R_{sh} , de 42.9Ω y 186.2Ω respectivamente, sugieren una alta resistencia interna que afecta el flujo de corriente, impactando negativamente la eficiencia del dispositivo (Javed *et al.*, 2021; Luo *et al.*, 2016; Yin & Dadmun, 2011).

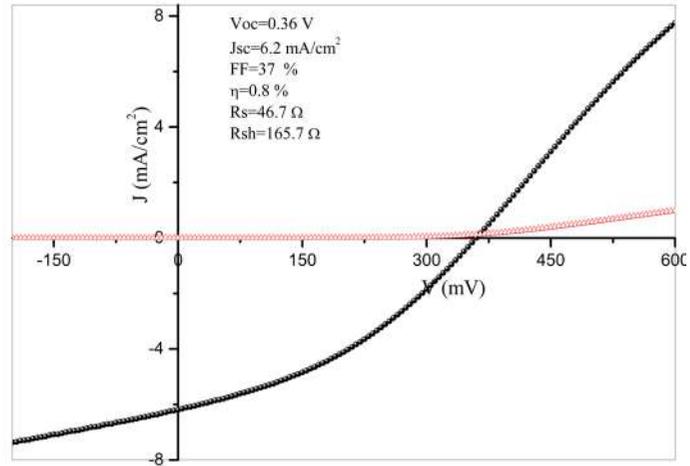


Figura 14. Caracterización eléctrica Vidrio/ITO/MoO₃ (5nm)/P3HT:PCBM/LiF (1nm)/Al (100 nm).

La Figura 14 muestra la característica corriente-voltaje (J-V) bajo condiciones de oscuridad y luz. La curva en oscuridad, cerca del eje X, indica que la corriente es prácticamente nula en ausencia de luz, lo que es consistente con el comportamiento esperado (Bartesaghi *et al.*, 2015). Los valores de R_s y R_{sh} son críticos para el análisis de las pérdidas internas. Un R_s elevado sugiere oposición considerable al flujo de corriente, mientras que un R_{sh} relativamente bajo indica posibles fugas de corriente, ambos factores afectan la eficiencia general de la celda (Bartesaghi *et al.*, 2015; Cui *et al.*, 2019; El-Menyawy, 2015; Khan *et al.*, 2022).

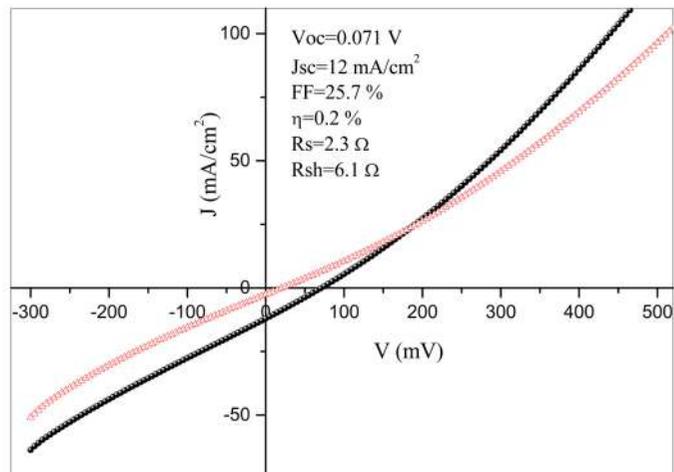


Figura 15. Características de J-V de la configuración clásica Vidrio/ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃ (7 nm)/Al (100 nm).

El gráfico 15 muestra un V_{oc} , J_{sc} , FF y η atípicos para este tipo de celdas fotovoltaicas orgánicas, con R_s de 2.3Ω y R_{sh} de 6.1Ω , lo que sugiere una resistencia interna moderada que afecta el flujo de corriente y las pérdidas de potencia (Cui *et al.*, 2019). Estos valores no son representativos de un buen comportamiento para celdas solares orgánicas, indicando áreas de mejora significativa.

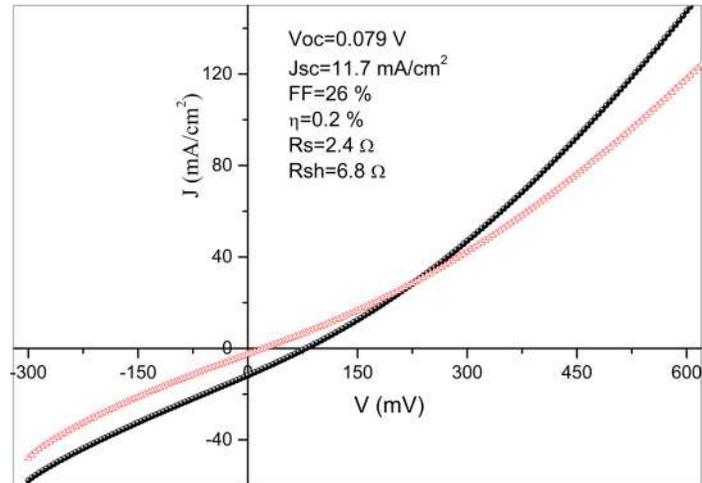


Figura 16. Características de J-V de la configuración inversa Vidrio/ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃ (7 nm)/Al (100 nm).

Finalmente, la figura 16 destaca la importancia del J_{sc} de 11.7 mA/cm^2 como un indicador clave de la eficiencia de conversión de la celda. Aunque el FF de 26 % no es ideal, proporciona información sobre la calidad de la celda y su capacidad para operar cerca de las condiciones óptimas de V_{oc} y J_{sc} . Con una eficiencia de 0.2 %, aunque baja, se resalta la necesidad de optimizar R_s y R_{sh} para mejorar el rendimiento general (Cui *et al.*, 2019; Khan *et al.*, 2022). Estos parámetros ofrecen una comprensión integral del comportamiento y la eficiencia de la celda, proporcionando una base para futuras optimizaciones en el diseño y los materiales de la celda (Javed *et al.*, 2021).

En la tabla 2 se muestra una comparación de los resultados obtenidos en las celdas fotovoltaicas orgánicas (OPVs) con estructura clásica e invertida con los resultados reportados en la literatura:

Tabla 2. Comparación de Resultados de Celdas Fotovoltaicas Orgánicas

Parámetro	Estructura clásica	Estructura invertida	Resultados en la literatura
V_{oc}	0.4 V	0.09 V	0.5 V
J_{sc}	4.9 mA/cm ²	11.7 mA/cm ²	10-12 mA/cm ²
FF	34.9 %	26 %	30-60 %
Eficiencia (η)	0.7 %	0.82 %	3.6 %
R_s	42.9 Ω	30 Ω	2.4-6 Ω
R_{sh}	186.2 Ω	325 Ω	320 Ω

Conclusiones

Este estudio ha subrayado la importancia de la optimización y caracterización de celdas fotovoltaicas orgánicas con colectores de electrones nanoestructurados. Se ha demostrado que un depósito controlado de nanotubos de ZnO es fundamental para maximizar el rendimiento de las celdas, y que la interacción en la interfaz entre los materiales y el ánodo de ITO juega un papel crucial en su desempeño. Las imágenes SEM y los patrones XRD confirmaron la presencia de una fase hexagonal wurtzita en el ZnO, destacando un alto contenido de oxígeno, lo que sugiere la necesidad de abordar posibles contaminaciones identificadas mediante DRX. Estos hallazgos enfatizan la relevancia de técnicas como la espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS) para la identificación precisa de estados químicos en las superficies, y abren nuevas oportunidades para mejorar la calidad y pureza de las capas tampón de ZnO.

El análisis de las curvas corriente-voltaje (J-V) ha proporcionado una visión clara sobre el funcionamiento y la eficiencia de las celdas solares estudiadas. En particular, se ha identificado que la optimización de la interfaz entre el ITO y los materiales orgánicos es clave para reducir las pérdidas por recombinación de carga y mejorar la eficiencia de recolección de portadores, resultando en un incremento significativo de la eficiencia de conversión de energía. Este aspecto es fundamental para el diseño de celdas solares más eficientes.

Además, se ha investigado cómo la interacción entre la interfaz y los materiales afecta la forma de la curva J-V, especialmente en configuraciones convencionales con ánodo de ITO. El uso de un aceptor de electrones como PCBM y el polímero P3HT como material activo, comparado con el C60 en celdas de referencia, ha demostrado que tanto la pureza de los materiales como la optimización de la interfaz son determinantes para lograr altos factores de llenado y, por ende, una mayor eficiencia energética. Estos resultados resaltan la importancia de continuar investigando en la mejora de las interfaces y la pureza de los materiales para desarrollar celdas solares orgánicas más eficientes y duraderas.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento al Departamento de Investigación de la Universidad del Atlántico por respaldar este trabajo a través del proyecto de investigación de Convocatoria de Movilidad Académica con Europa No. 836- 2019, con código de registro No. 67001, al profesor Emad El-Menyawy del Laboratorio de Electrónica del Estado Sólido, Departamento de Física del Estado Sólido, División de investigación Física, Centro Nacional de Investigación en Giza, Egipto, por sus valiosas discusiones previas sobre este tema, y al programa de cooperación científica y tecnológica Colombia- Francia ECOS Nord-Ministerio de Ciencia por el apoyo financiero brindado a través del contrato No. C20P01 y el Contrato 895-2019. Por último, y no menos importante, agradezco al profesor Davian Martínez Buitrago de la Universidad de los Llanos, y a mi amigo colega Alvaro Andres Barraza Romero por el apoyo incondicional que siempre me ha brindado, al candidato a doctor Freider Duran por su direccionamiento, Cada contribución ha sido fundamental para el desarrollo y éxito de este trabajo. Agradecemos sinceramente su dedicación y colaboración.

Contribución de los autores

J R, A R, M R, G A, J C-B, G L, L C, diseñaron el estudio, redactaron el manuscrito, recolectaron e interpretaron los datos.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

References

- Aatif, M., Tiwari, J.** (2020) Futuristic electron transport layer based on multifunctional interactions of zno/tcne for stable inverted organic solar cells. *RSC advances*, *10*(69), 42305–42317.
- Bartasaghi, D., Pérez, I. D. C., Kniepert, J., Roland, S., Turbiez, M., Neher, D., Koster, L. J. A.** (2015) Competition between recombination and extraction of free charges determines the fill factor of organic solar cells. *Nature communications*, *6*(1), 7083.
- Cattin, L., Morsli, M., Dahou, F., Abe, S. Y., Khelil, A., Bernède, J.** (2010) Investigation of low resistance transparent moo3/ag/moo3 multilayer and application as anode in organic solar cells. *Thin Solid Films*, *518*(16), 4560–4563.
- Chen, S., Pan, X., Xu, C., Huang, J., Ye, Z.** (2016) X-ray photoelectron spectroscopy study of energy-band alignments of zno on buffer layer lu2o3. *Physics Letters A*, *380*(7-8), 970–972.
- Chen, X., Zhao, M., Zhang, Z.-g., Li, Y., Li, X., Wang, H.** (2018) High-efficiency all polymer solar cell with a low voltage loss of 0.56 v. *ACS Applied Energy Materials*, *1*(5), 2350–2357.
- Chong, K., Xu, X., Meng, H., Xue, J., Yu, L., Ma, W., Peng, Q.** (2022) Realizing 19.05% efficiency polymer solar cells by progressively improving charge extraction and suppressing charge recombination. *Advanced Materials*, *34*(13), 2109516.
- Cui, Y., Yao, H., Zhang, J., Zhang, T., Wang, Y., Hong, L., Xian, K., Xu, B., Zhang, S., Peng, J., *Et al.*** (2019) Over 16% efficiency organic photovoltaic cells enabled by a chlorinated acceptor with increased open-circuit voltages. *Nature communications*, *10*(1), 2515.
- Del Pozo, G., Romero, B., Arredondo, B., Gutiérrez-Llorente, A.** (2003) Células solares orgánicas basadas en p3ht/pcbm. *Adv. Funct. Mater*, *13*, 85–88.
- El-Menyawy, E.** (2015) Electrical and photovoltaic properties of gaussian distributed inhomogeneous barrier based on tris (8-hydroxyquinoline) indium/p-si interface. *Materials Science in Semiconductor Processing*, *32*, 145–151.
- El-Menyawy, E., Cattin, L., Bernède, J., Louarn, G., Arzel, L.** (2019) Facile enhancement of bulk heterojunction solar cells performance by utilizing pbse nanorods decorated with graphene. *Journal of colloid and interface science*, *553*, 117–125.
- Fengler, S., Dittrich, T.** (2015) Electronic transitions and band offsets in c {sub 60}: Subpc and c {sub 60}: Mgpc on moo {sub 3} studied by modulated surface photovoltage spectroscopy. *Journal of Applied Physics*, *118*(3).
- Javed, A. H., Shahzad, N., Khan, M. A., Ayub, M., Iqbal, N., Hassan, M., Hussain, N., Rameel, M. I., Shahzad, M. I.** (2021) Effect of zno nanostructures on the performance of dye sensitized solar cells. *Solar Energy*, *230*, 492–500.
- Khan, M. U., Imran, M., Rehman, M. F. u., Assiri, M. A., Mashhadi, S. M. A., Akram, M. S., Lu, C.** (2022) Evaluating zn-porphyrin-based near-ir-sensitive non-fullerene acceptors for efficient panchromatic organic solar cells. *ChemistryOpen*, *11*(8), e202200047.
- Luo, G., Ren, X., Zhang, S., Wu, H., Choy, W. C., He, Z., Cao, Y.** (2016) Recent advances in organic photovoltaics: Device structure and optical engineering optimization on the nanoscale. *Small*, *12*(12), 1547–1571.

- Romero, M., Henriquez, R., Dalchiele, E.** (2016) Electrochemical deposition of zno nanorod arrays onto a zno seed layer: Nucleation and growth mechanism. *International Journal of Electrochemical Science*, 11(10), 8588–8598.
- Upama, M. B., Elumalai, N. K., Mahmud, M. A., Xu, C., Wang, D., Wright, M., Uddin, A.** (2018) Enhanced electron transport enables over 12% efficiency by interface engineering of non-fullerene organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 187, 273–282.
- Yin, W., Dadmun, M.** (2011) A new model for the morphology of p3ht/pcbm organic photovoltaics from small-angle neutron scattering: Rivers and streams. *ACS nano*, 5(6), 4756–4768.
- Zhao, F., Wang, C., Zhan, X.** (2018) Morphology control in organic solar cells. *Advanced Energy Materials*, 8(28), 1703147.

Original article

Quantum operator for non-paraxial single photon interference

Operador cuántico para la interferencia no-paraxial con fotones individuales

Román Castañeda*, Camilo Hurtado

Physics Department, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

Abstract

Interference in optics has been described as a result of the superposition of light waves in ordinary space. However, this phenomenological description does not seem to fit non-paraxial single-photon interference in ordinary space due to the corpuscular nature of photons and the fact that only one photon moves in the setup at each time. A quantum interference operator, deduced from the exact (non-paraxial) mathematical model, indicates that the spatial morphology of interference is independent of the presence of photons in the setup and remains unchanged in their absence. This suggests a new interpretation of interference in terms of the photon confinement in geometric states of ordinary space. Here, we discuss the physical and phenomenological implications of this new interpretation.

Keywords: States of space; Geometric potential; Confinement; Spatially structured wells; Vacuum; Interference operator.

Resumen

En óptica la interferencia se ha descrito como resultado de la superposición de ondas de luz en el espacio ordinario. Sin embargo, esta descripción fenomenológica no parece ajustarse a la interferencia no-paraxial con fotones individuales en el espacio ordinario debido a la naturaleza corpuscular de los fotones y a que solo un fotón se mueve en la configuración en cada momento. El operador cuántico de interferencia, deducido del modelo matemático exacto (no-paraxial), indica que la morfología espacial de la interferencia es independiente de la presencia de fotones en la configuración y permanece inalterada en su ausencia. Esto sugiere una nueva interpretación de la interferencia en términos del confinamiento de los fotones en estados geométricos del espacio ordinario. Se discuten aquí las implicaciones físicas y fenomenológicas de esta nueva interpretación de la interferencia.

Palabras clave: Estados del espacio; Potencial geométrico; Confinamiento; Pozos espacialmente estructurados; Vacío; Operador de interferencia.

Introduction

Single photon interference has been of fundamental importance in quantum optics and photonics (De Martini *et al.*, 1994; Shih, 2021) playing a crucial role in the analysis of the quantum properties of light (Hessmo *et al.*, 2003; Jones & Wiseman, 2011), basic quantum phenomena (Rueckne & Peidle, 2013; Tang & Hu, 2022), and technology development (Mérolla *et al.*, 1999; Witkoskie & Cao, 2008). Due to this wide range of uses and applications, single-photon interference is also considered paradigmatic in education (Rueckne & Titcomb, 1996; Marshman & Singh, 2017).

The standard quantum formalism predicts experimental outcomes of paraxial single-photon interference. However, it is unsuitable for non-paraxial interference approximation of, and its phenomenological description does not seem to fit the photon corpuscular nature in ordinary space and the fact that only one photon moves in the setup in each experimental realization. This theoretical term denotes the experimental segment that begins with the

Citation: Castañeda R, Hurtado C. Quantum operator for non-paraxial single photon interference. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(189):768-783, octubre-diciembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2863>

Editor: Diógenes Campos Romero

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

Received: July 15, 2024

Accepted: October 28, 2024

Published on line: November 8, 2024



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

emission of a single photon at the source and ends with its annihilation by the detector so that only this photon propagates in the interferometer without explicit connections with preceding and posterior photons. Consequently, single-photon interference experiments can be theoretically characterized as a binary sequence of only one-particle systems separated by zero-particle systems.

Here, we propose an alternative description developed in the framework of a recently reported non-paraxial quantum formalism of interference with light and single-matter particles (Castañeda *et al.*, 2023). This new formalism is compatible with the photon corpuscular nature and considers ordinary space as a system with geometric states that confine single photons in spatially distributed zones. In section 2, we deduce a quantum interference operator which includes density operators of the geometric states of space as shown in section 3. In section 4, we discuss the characterization of preparation and measurement (P&M) configured interferometers in terms of geometric states of space, and in section 5, we describe the phenomenology of individual experimental realizations in single-photon interference. Conclusions are summarized in section 6. Details of the mathematical model can be found in the supplementary information.

Quantum interference operator

We show (see Supplementary Information for details) how the non-paraxial Hamiltonian for the electromagnetic field of single photons takes the form

$$H(\mathbf{r}_A) = \hbar\omega \left(\hat{n} + \frac{1}{2} \right) \int_M \int_M d^2\xi_A d^2\xi_D \kappa(\xi_+, \xi_-) \Theta(\xi_+, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \Theta^*(\xi_-, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k), \quad (1)$$

with $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (h is the Planck constant), ω the photon frequency, and \hat{n} the number operator. It is assumed that single photons propagate between two consecutive planes, M and D, at a distance $|\mathbf{z}|$ (Figure 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2863/4467>). Reduced coordinates $\xi_{\pm} = \xi_A \pm \xi_D/2$ and $\mathbf{r}_{\pm} = \mathbf{r}_A \pm \mathbf{r}_D/2$ denote pairs of points at M and D, respectively, with the coordinate suffixed A specifying the midpoint between the pair and the coordinate suffixed D denoting their separation vector. For null separation vectors, the reduced coordinates denote single points. Furthermore,

$$\kappa(\xi_+, \xi_-) = \kappa^*(\xi_-, \xi_+) = w(\xi_+, \xi_-) \tau(\xi_+, \xi_-) \cos(\beta(\xi_+)) \cos(\beta(\xi_-)) \cos(\theta(\xi_+) - \theta(\xi_-)), \quad (2)$$

with $w(\xi_+, \xi_-) = w^*(\xi_-, \xi_+) = \psi(\xi_+) \psi^*(\xi_-)$ and $\psi(\xi)$ representing the complex amplitude of probability for single photons at M, $\tau(\xi_+, \xi_-) = \tau^*(\xi_-, \xi_+) = t(\xi_+) t^*(\xi_-)$ and $t(\xi) = |t(\xi)| \exp(i\phi(\xi))$ the complex transmission function at M, and $\mathbf{e}(\xi_+) \cdot \mathbf{e}(\xi_-) = \cos(\beta(\xi_+)) \cos(\beta(\xi_-)) \cos(\theta(\xi_+) - \theta(\xi_-))$ and $\mathbf{e}(\xi_{\pm})$ the unit photon polarization vector at M. The angles $\beta(\xi_{\pm})$ and $\theta(\xi_{\pm})$ are shown in figure 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2863/4467>. Finally (Castañeda *et al.*, 2020),

$$\Theta(\xi_+, \mathbf{r}_+, \mathbf{z}, k) \Theta^*(\xi_-, \mathbf{r}_-, \mathbf{z}, k) = \left(\frac{k}{4\pi} \right)^2 \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_+ - \xi_+|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_+ - \xi_+|^2} \right) \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_- - \xi_-|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_- - \xi_-|^2} \right) \exp(ik|\mathbf{z} + \mathbf{r}_+ - \xi_+| - ik|\mathbf{z} + \mathbf{r}_- - \xi_-|), \quad (3)$$

with $k = \omega/c$ and c representing the light speed in the vacuum. Equation (3) defines a non-local, non-paraxial basis where $\Theta(\xi, \mathbf{r}, \mathbf{z}, k) = -i \frac{k}{4\pi} \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r} - \xi|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r} - \xi|^2} \right) \exp(ik|\mathbf{z} + \mathbf{r} - \xi|)$ are functions of the Hilbert space corresponding to the coordinate representation of kets $|\Theta(\xi)\rangle$, which are labeled for each point at M. Therefore, $\Theta(\xi_+, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \Theta^*(\xi_-, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)$ is the coordinate representation of the operator $|\Theta(\xi_+)\rangle\langle\Theta(\xi_-)|$, labeled for specific pairs of points at M, i.e., $\langle\mathbf{r}_A|\Theta(\xi_+)\rangle\langle\Theta(\xi_-)|\mathbf{r}_A\rangle = \Theta(\xi_+, \mathbf{r}_A) \Theta^*(\xi_-, \mathbf{r}_A)$. It is apparent that $|\Theta(\xi_+)\rangle\langle\Theta(\xi_-)| = (|\Theta(\xi_-)\rangle\langle\Theta(\xi_+)|)^\dagger$, i.e., $|\Theta\rangle\langle\Theta|$ is a self-adjoint operator.

From the above, the operator

$$\hat{H} = \hat{H}^\dagger = \hbar\omega \left(\hat{n} + \frac{1}{2} \right) \int_M \int_M d^2\xi_A d^2\xi_D \kappa(\xi_+, \xi_-) |\Theta(\xi_+)\rangle\langle\Theta(\xi_-)|, \quad (4)$$

with energy units and † denoting adjointness, is deduced straightforwardly. It should be noted that $[\hat{n}, |\Theta\rangle\langle\Theta|] = 0$ so that the geometric features of interference described by $|\Theta\rangle\langle\Theta|$ are independent of the number of single photons moving in the MD volume. For n individual experimental realizations of single photon interference, this operator determines the non-locality at D

$$\langle n, \mathbf{r}_+ | \hat{H} | n, \mathbf{r}_- \rangle = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2} \right) \int_M \int_M d^2\xi_A d^2\xi_D \kappa(\xi_+, \xi_-) \langle \mathbf{r}_+ | \Theta(\xi_+) \rangle \langle \Theta(\xi_-) | \mathbf{r}_- \rangle, \quad (5)$$

and the energy of the recorded photons at each detector pixel

$$\langle n, \mathbf{r}_A | \hat{H} | n, \mathbf{r}_A \rangle = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2} \right) \int_M \int_M d^2\xi_A d^2\xi_D \kappa(\xi_+, \xi_-) \langle \mathbf{r}_A | \Theta(\xi_+) \rangle \langle \Theta(\xi_-) | \mathbf{r}_A \rangle. \quad (6)$$

Equations (5) and (6) provide an exhaustive description of any individual experimental realization in the preparation-and-measurement configured interferometers, as discussed in the next section. It should be emphasized that Eqs. (5) and (6) do not describe a many-particle system, no matter that n grows arbitrarily. Actually, they describe the formation of single-photon interference patterns as the accumulative outcome of n individual experimental realizations without connections between them, i.e., each realization is strictly an independent only-one-particle system.

Therefore, \hat{H} in Eq. (4) is the fundamental mathematical concept for the complete quantum description of single-photon interference experiments. We call it the quantum interference operator.

States of space

The binary segments of a single-photon interference experiment are characterized by the sequence $\langle 1 | \hat{n} | 1 \rangle = 1, \langle 0 | \hat{n} | 0 \rangle = 0$. In the absence of photons, Eq. (4) gives

$$\hat{H}_0 = \langle 0 | \hat{H} | 0 \rangle = \frac{1}{2} \hbar\omega \int_M \int_M d^2\xi_A d^2\xi_D \kappa(\xi_+, \xi_-) |\Theta(\xi_+)\rangle\langle\Theta(\xi_-)|, \quad (7)$$

which is quite different from the standard paraxial approximation result (**Walls & Milburn**, 1995). The significant novelty evidenced by Eq. (7) is that the non-paraxial geometric features of interference remain in the vacuum, i.e., in the absence of photons in the setup. More precisely, they seem to be independent of the presence of photons, thus remaining unchanged along the binary sequence of the experiment. Hence, ordinary space seems to be a system with geometric states of the vacuum energy $\hbar\omega/2$, described by the density operator $|\Theta\rangle\langle\Theta|$ (**Castañeda et al.**, 2023). The contrast between this conception of ordinary space and the Newtonian description in the standard interference formalisms opens the way for the community to discuss the role of ordinary space in interference.

Besides, coefficient $\kappa(\xi_+, \xi_-)$ in Eq. (7) behaves as a filter placed at M that selects and weights the geometric states of space in the vacuum, thus characterizing each specific interferometer. Such a filter (defined in Eq. (2)) is realized by the interference device, usually a mask, with the effective non-local transmission $\tau_{eff}(\xi_+, \xi_-) = \tau(\xi_+, \xi_-) \cos(\beta(\xi_+)) \cos(\beta(\xi_-)) \cos(\theta(\xi_+) - \theta(\xi_-))$ under the prepared non-locality $w(\xi_+, \xi_-)$. This role of the setup in the absence of photons invites us to revisit the phenomenological fundamentals of quantum mechanics (**Bohr**, 1935) considering that the interpretation above does not result from heuristic assumptions but from the direct phenomenological analysis of the mathematical model.

To determine the geometric states of space in the quantum interference operator in the vacuum, it is useful to introduce the dimensionless function $1 \equiv \delta(\xi_D) + (1 - \delta(\xi_D))$ in the integrand of Eq. (7), with $\delta(\xi_D)$ as the Dirac delta function, resulting in:

$$\hat{H}_0 = \frac{1}{2} \hbar\omega \int_M d^2\xi_A \hat{W}(\xi_A) = \frac{1}{2} \hbar\omega \int_M d^2\xi_A \left(\hat{R}(\xi_A) + \frac{1}{2} \hat{G}(\xi_A) \right), \quad (8)$$

where $\hat{W}(\xi_A) = \hat{W}^\dagger(\xi_A) = \hat{R}(\xi_A) + \frac{1}{2} \hat{G}(\xi_A)$ is the density operator of excited states of space (**Castañeda et al.**, 2023),

$$\begin{aligned} \hat{R}(\xi_A) &= \hat{R}^\dagger(\xi_A) = \kappa(\xi_A, \xi_A) |\Theta(\xi_A)\rangle \langle \Theta(\xi_A)| \\ &= |\psi(\xi_A)|^2 |t(\xi_A)|^2 \cos^2(\beta(\xi_A)) |\Theta(\xi_A)\rangle \langle \Theta(\xi_A)| \end{aligned} \quad (9)$$

provided by the term $\delta(\xi_D)$, is the density operator of ground states of space labeled at the points ξ_A of M, and

$$\hat{G}(\xi_A) = \hat{G}^\dagger(\xi_A) = \int_{\xi_D \neq 0} d^2 \xi_D \kappa(\xi_+, \xi_-) |\Theta(\xi_+)\rangle \langle \Theta(\xi_-)|, \quad (10)$$

given by the term $1 - \delta(\xi_D)$, is the density operator of non-local geometric excitation modes called the geometric potential operator (Castañeda *et al.*, 2023). The density operators \hat{R} and \hat{G} are independent from each other.

In Eq. (9), $0 \leq |t(\xi_A)|^2 \leq 1$ denotes the transmittance of M without polarizers (Born & Wolf, 1993) while $|t(\xi_A)|^2 \cos^2(\beta(\xi_A))$ represents the effective transmittance with polarizers. Therefore, the coefficient $|\psi(\xi_A)|^2 |t(\xi_A)|^2 \cos^2(\beta(\xi_A))$ determines the quantum probability of finding a single photon emerging from ξ_A (see Supplementary Information for details). In turn, each non-local mode $|\Theta(\xi_+)\rangle \langle \Theta(\xi_-)|$ of $\hat{G}(\xi_A)$ in Eq. (10) provides the same geometrical excitation at the same time to the ground states of space labeled at the pair of M points $\xi_\pm = \xi_A \pm \xi_D/2$. The excitation is activated by the non-locality $\kappa(\xi_+, \xi_-)$ that links these points. Thus, each individual ground state of space should be geometrically excited by $\frac{1}{2} \hat{G}(\xi_A)$. So, \hat{G} involves the spectrum of spatial modulations that excite the ground states of space \hat{R} and produce the excited geometric states \hat{W} . Such spectrum is filtered (selected and weighted) by the non-locality at M for any single photon interferometer and it is not activated if $\kappa(\xi_+, \xi_-) = 0$ for any $\xi_D \neq 0$. In this case, none of the ground states of space are excited so that the geometric states of space reduce to the ground states, i.e., $\hat{W}(\xi_A) = \hat{R}(\xi_A)$.

Preparation and measurement scheme

Space states for non-locality preparation

Figure 1 depicts the conceptual configuration of single-photon interference setups, in other words, the P&M scheme. Equation (8) gives the interference operator in the vacuum for the MD stage and, after expressing it as reduced coordinates of the SM stage, it also gives the interference operator in the vacuum for this stage. However, the geometric potential is not activated in the SM stage because the individual experimental realizations of single-photon interference experiments are independent of each other. Therefore, only ground states of space are established in the SM stage, so that,

$$\begin{aligned} \hat{H}_0 &= \frac{\hbar\omega}{2} \int_S d^2 r'_A \hat{W}(\mathbf{r}'_A) = \frac{\hbar\omega}{2} \int_S d^2 r'_A \hat{R}(\mathbf{r}'_A) \\ &= \frac{\hbar\omega}{2} \int_S d^2 r'_A |\psi(\mathbf{r}'_A)|^2 |t(\mathbf{r}'_A)|^2 \cos^2(\beta(\mathbf{r}'_A)) |\Theta(\mathbf{r}'_A)\rangle \langle \Theta(\mathbf{r}'_A)| \end{aligned} \quad (11)$$

The projection of the interference operator in Eq. (11) on pairs of points at M gives the prepared non-locality at M $w(\xi_+, \xi_-) = \langle \xi_+ | \hat{H}_0 | \xi_- \rangle = \frac{\hbar\omega}{2} \int_S d^2 r'_A \langle \xi_+ | \hat{R}(\mathbf{r}'_A) | \xi_- \rangle$, with

$$\begin{aligned} \langle \xi_+ | \hat{R}(\mathbf{r}'_A) | \xi_- \rangle &= \left(\frac{k}{4\pi} \right)^2 |\psi(\mathbf{r}'_A)|^2 |t(\mathbf{r}'_A)|^2 \cos^2(\beta(\mathbf{r}'_A)) \left(\frac{z' + |\mathbf{z}' + \xi_+ - \mathbf{r}'_A|}{|\mathbf{z}' + \xi_+ - \mathbf{r}'_A|^2} \right) \\ &\quad \times \left(\frac{z' + |\mathbf{z}' + \xi_- - \mathbf{r}'_A|}{|\mathbf{z}' + \xi_- - \mathbf{r}'_A|^2} \right) \exp(ik|\mathbf{z}' + \xi_+ - \mathbf{r}'_A| - ik|\mathbf{z}' + \xi_- - \mathbf{r}'_A|) \end{aligned} \quad (12)$$

Remarkably, non-locality at S is not required to prepare non-locality at M. Moreover, only one ground state of space can prepare the non-locality $w(\xi_+, \xi_-) = \langle \xi_+ | \hat{H}_0 | \xi_- \rangle = \frac{\hbar\omega}{2} \langle \xi_+ | \hat{R}(\mathbf{r}'_A) | \xi_- \rangle$ at M, as illustrated in figure 2. This exact numerical simulation points out

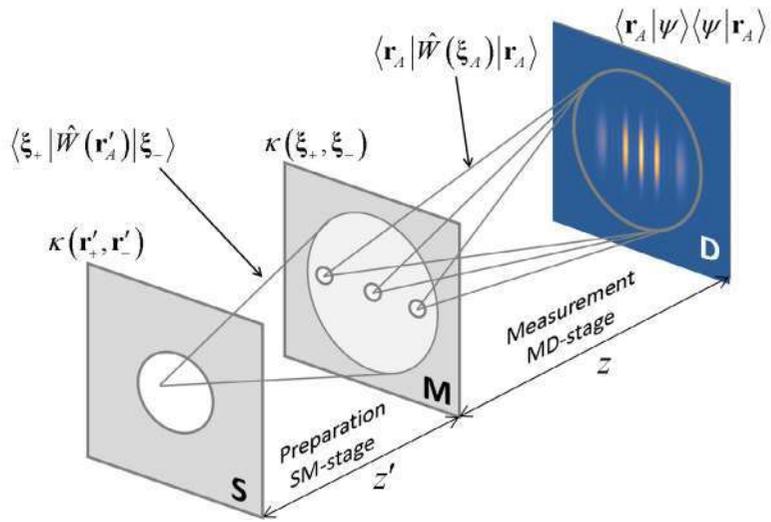


Figure 1. Conceptual sketch of the single-photon interference setup in the preparation-and-measurement (P&M) scheme. The expressions are explained in the text.

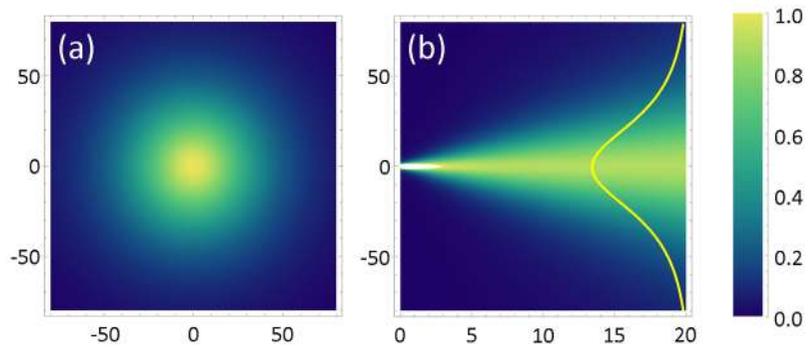


Figure 2. Non-locality Lorentzian cone for a single ground state of space prepared in the SM-stage in figure 1. (a) Cross-section at $z'=50\lambda$ ($\lambda = 0.4 \mu\text{m}$) and (b) axial section for $0 \leq z' \leq 50\lambda$. The Well vertex is at $r'_A = 0$ on S. Non-locality support centered at $\xi_A = 0$ on M is described by (a) and the vertical profile in (b). The horizontal and vertical axes are the Cartesian components of ξ_D in (a), and z' and mutually parallel components of r'_A on the left side and ξ_D on the right side in (b). Axes units are μm and the scale is in dimensionless arbitrary units.

that Eq. (12) describes cones in ordinary space with vertices at specific r'_A points on S, the bases on the pairs of M points ξ_{\pm} of the region centered at a given ξ_A and Lorentzian cross-sections at any distance from S. The cone effective angular aperture is $\sim 80^\circ$.

The prepared non-locality $w(\xi_+, \xi_-) = \langle \xi_+ | \hat{H}_0 | \xi_- \rangle$ corresponds to the cross-section at M of the overlapped ground states in Eq. (11). The area of the cross-section centered at ξ_A , where the prepared non-locality takes on non-negligible values, determines its support (Castañeda *et al.*, 2023) and specifies the non-locality links between pairs of points ξ_{\pm} symmetrically distributed to ξ_A . Such links are negligible or nullified for pairs of points with separation vectors longer than the non-locality support diameter.

We emphasize that the ground states establish Lorentzian cones in ordinary space for the non-locality preparation and are compatible with the local nature of the photon emissions by the source. Indeed, the factor $|\psi(r'_A)|^2 |t(r'_A)|^2 \cos^2(\beta(r'_A))$ in Eq. (12) determines the quantum probability for a single photon to be emitted at cone vertex r'_A . However, the preparation of such quantum probability does not require the presence of photons in the setup.

The set of ground states of space with vertices at the emitting points of an extended photon source is non-separable. The complex-valued function in Eq. (12) is non-factorable and given its harmonic factor, Eq. (11) implies that each ground state is spatially modulated by the remaining ones. Consequently, non-locality spatially structured Lorentzian cones, as illustrated in **figure 3**, work for spacing the vertex array longer than λ in (a)-(c) and shorter than λ in (d)-(f). Given the non-separability of ground states for the non-locality preparation, the set associated with all the emitting points should be included in the integral of Eq. (11), no matter that the emission of the single photon in any individual experimental realization is a local event occurring at a specific source point.

Now, the $\hat{R}(\mathbf{r}'_A)$ projection on individual M points gives the real-valued, positive, definite, and separable functions

$$\langle \xi_A | \hat{R}(\mathbf{r}'_A) | \xi_A \rangle = \left(\frac{k}{4\pi} \right)^2 |\psi(\mathbf{r}'_A)|^2 |t(\mathbf{r}'_A)|^2 \cos^2(\beta(\mathbf{r}'_A)) \left(\frac{z' + |\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A|}{|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A|^2} \right)^2, \quad (13)$$

that determine a Lorentzian cone in the SM stage, with angular aperture of $\sim 70^\circ$ and vertex at the emission point \mathbf{r}'_A , so that $\langle \xi_A | \hat{R}(\mathbf{r}'_A) | \xi_A \rangle$ takes the form $|\psi(\mathbf{r}'_A)|^2 |t(\mathbf{r}'_A)|^2 \cos^2(\beta(\mathbf{r}'_A))$ as $z' \rightarrow 0$, as illustrated in **figure 4**. It is worth noting that the complex-valued function in Eq. (12) cannot determine an observable so the prepared non-locality at M in Eq. (11)

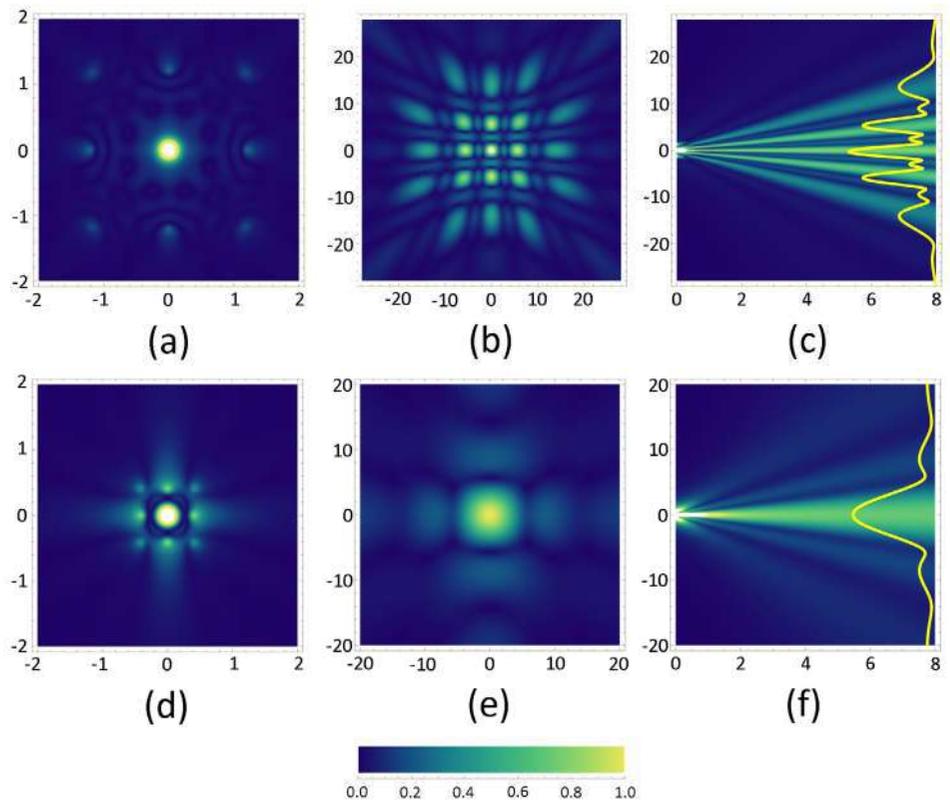


Figure 3. Spatially structured non-locality cones established by an array of 3x3 ground states of space in the SM stage of the setup in **figure 1**. Horizontal and vertical array spacing are 1.5λ in (a)-(c) and 0.5λ in (d)-(f) ($\lambda = 0.4\mu\text{m}$). Cross-sections at $z' = 0.1\lambda$ on the left column, $z' = 20\lambda$ on the central column, and axial sections for $0 \leq z' \leq 20\lambda$ on the right column. Cone vertices are at the 3x3 array of emitting points at S and their basis is centered at $\xi_A = 0$ on M. Prepared non-locality supports are described by graphs on the central column and vertical profiles on the right column. Horizontal and vertical axes of cross-sections are the components of the separation vectors ξ_D . Axial-section axes are z' (horizontal) and mutually parallel components of \mathbf{r}'_A on the left vertical edge and ξ_D on the right one. The axes units are μm and the scale is in dimensionless arbitrary units.

is not measurable by a square modulus detector. In contrast, Eq. (13) characterizes such observable by determining the quantum probability of finding the emitted single photon at any point ξ_A of M in each experimental realization, as

$$|\psi(\xi_A)|^2 = \langle \xi_A | \hat{H}_0 | \xi_A \rangle = \frac{\hbar\omega}{2} \langle \xi_A | \hat{R}(\mathbf{r}'_A) | \xi_A \rangle. \tag{14}$$

Nevertheless, the vertex position of this Lorentzian cone is restricted by the geometric uncertainty in the sense that it can be any point within an area of diameter $\lambda/10$ around each S point \mathbf{r}'_A (Castañeda *et al.*, 2020; 2023).

The numerical simulation of the exact (non-paraxial) Eq. (14) in **figure 4** has some important phenomenological implications: (i) it is compatible with a corpuscular characterization of the single photon; (ii) its Lorentzian profile distributes the quantum probability of emission in a conical volume maintaining the largest probability along the cone axis; therefore, the cross-section in **figure 4 (a)** describes the expectation of single photon measurements at M; (iii) once the SM stage is configured, all the $\langle \xi_A | \hat{R}(\mathbf{r}'_A) | \xi_A \rangle$ functions are established with the same geometry, given by $\left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 \left(\frac{z' + |\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A|}{|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A|^2}\right)^2$.

These features suggest that $\langle \xi_A | \hat{R}(\mathbf{r}'_A) | \xi_A \rangle$ determines a Lorentzian well for single photon propagation from each emitting S point to any M point. Such Lorentzian well confines the photon preferably around the axis. This description is supported by a rigorous exact (non-paraxial) deduction and the confinement pins down the unrestricted spatial behavior attributed to the photons by the paraxial approximated formalism, thus increasing the accuracy of the description.

Space states for interference measurement

The quantum interference operator in the vacuum (Eq. (8)) gives the quantum probability for single photon arrivals to the detector pixel at any \mathbf{r}_A point of D as follows:

$$\begin{aligned} |\psi(\mathbf{r}_A)|^2 &= \langle \mathbf{r}_A | \hat{H}_0 | \mathbf{r}_A \rangle = \frac{\hbar\omega}{2} \int_M d^2\xi_A \langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle \\ &= \frac{\hbar\omega}{2} \int_M d^2\xi_A \left(\langle \mathbf{r}_A | \hat{R}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle + \frac{1}{2} \langle \mathbf{r}_A | \hat{G}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle \right) \end{aligned} \tag{15}$$

where the ground states of space establish the Lorentzian wells

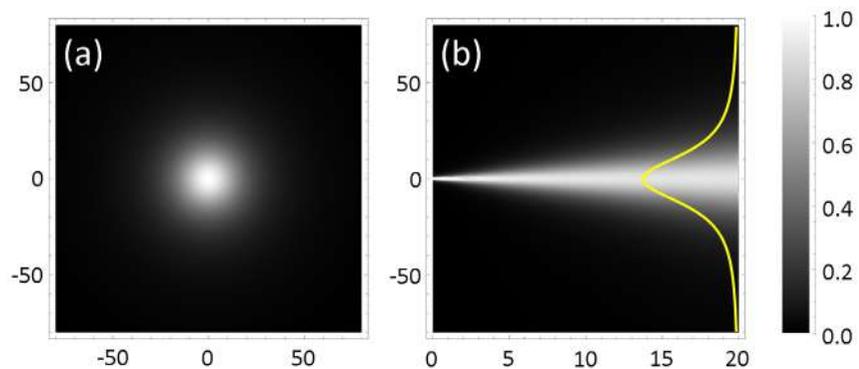


Figure 4. The Lorentzian well for a single ground state of space in the SM stage of **figure 1**. **(a)** Cross-section at $z' = 50\lambda$ ($\lambda = 0.4\mu\text{m}$) and **(b)** axial section for $0 \leq z' \leq 50\lambda$. The well vertex is at $\mathbf{r}'_A = 0$ on S. The vertical profile in **(b)** shows the Lorentzian profile of the cross-section. Horizontal and vertical axes are the Cartesian components of ξ_A in **(a)**, z' and the mutually parallel components of \mathbf{r}'_A on the left side, and ξ_A on the right side in **(b)**. Axes units are μm and the scale is in dimensionless arbitrary units.

$$\langle \mathbf{r}_A | \hat{R}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle = \left(\frac{k}{4\pi} \right)^2 |\psi(\xi_A)|^2 |t(\xi_A)|^2 \cos^2(\beta(\xi_A)) \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A|^2} \right)^2 \quad (16)$$

in the MD stage, as illustrated in **figure 5**, and the geometric potential provides the excitation

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{r}_A | \hat{G}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle &= \int_{\xi_D \neq 0}^M d^2 \xi_D \kappa(\xi_+, \xi_-) \langle \mathbf{r}_A | \Theta(\xi_+) \rangle \langle \Theta(\xi_-) | \mathbf{r}_A \rangle \\ &= 2 \int_{\xi_D \neq 0}^M d^2 \xi_D |\kappa(\xi_+, \xi_-)| \text{Re} \left[\langle \mathbf{r}_A | \Theta(\xi_+) \rangle \langle \Theta(\xi_-) | \mathbf{r}_A \rangle \exp(i\alpha(\xi_+, \xi_-)) \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

In Eq. (17), Re denotes the real part and the following features are considered: (i) $\kappa(\xi_+, \xi_-) = |\kappa(\xi_+, \xi_-)| \exp(i\alpha(\xi_+, \xi_-))$; (ii) the Hermitian symmetry of integrand in Eq. (10) for permutation $\pm \xi_D \rightarrow \mp \xi_D$, and (iii) the addition of the integrand terms for the two degrees of freedom in the orientation of the separation vector, i.e., $\pm \xi_D$. Therefore, the geometric potential $\langle \mathbf{r}_A | \hat{G}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle$ is real valued and takes on positive and negative values, as illustrated in **figure 6 (a)-(c)**.

Equation (15) reduces to $|\psi(\mathbf{r}_A)|^2 = \langle \mathbf{r}_A | \hat{H}_0 | \mathbf{r}_A \rangle = \frac{\hbar\omega}{2} \int d^2 \xi_A \langle \mathbf{r}_A | \hat{R}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle$ if $\kappa(\xi_+, \xi_-) = 0$ for $\xi_D \neq 0$, and Eq. (16) points out that the Lorentzian wells cannot spatially modulate each other by overlapping in $\langle \mathbf{r}_A | \hat{H}_0 | \mathbf{r}_A \rangle$, as illustrated in **figure 5**. Therefore, the geometric potential is necessary and sufficient to excite the ground states, thus producing the spatially structured Lorentzian wells $\langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle = \langle \mathbf{r}_A | \hat{R}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle + \frac{1}{2} \langle \mathbf{r}_A | \hat{G}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle$ required for interference, as those illustrated in **figure 6**, and implying $\kappa(\xi_+, \xi_-) \neq 0$ for $\xi_D \neq 0$.

We emphasize that both the vertex position of the geometric states of space and the excitation provided by the geometric potential are restricted by the geometric uncertainty (Castañeda *et al.*, 2020; 2023). The vertex position can be any point within an area of diameter $\lambda/10$ around each considered point ξ_A of M, and the geometric potential cannot excite the space states whose vertex separation is no longer than $\lambda/10$. Consequently, such an area is associated with a unique ground state of space with a vertex at any point within the area. It has been shown that this geometric uncertainty cannot be removed or reduced.

Due to the geometric uncertainty, the configuration of the mask placed at M, and the prepared non-locality on this plane, a discrete and finite set of geometric states of space is established in the MD stage of the setup. This set is filtered (selected and weighted) by the non-locality $\kappa(\xi_+, \xi_-)$. More precisely, its local component for $\xi_D = 0$, $\kappa(\xi_A, \xi_A) = |\psi(\xi_A)|^2 |t(\xi_A)|^2 \cos^2(\beta(\xi_A))$ determines the quantum probability

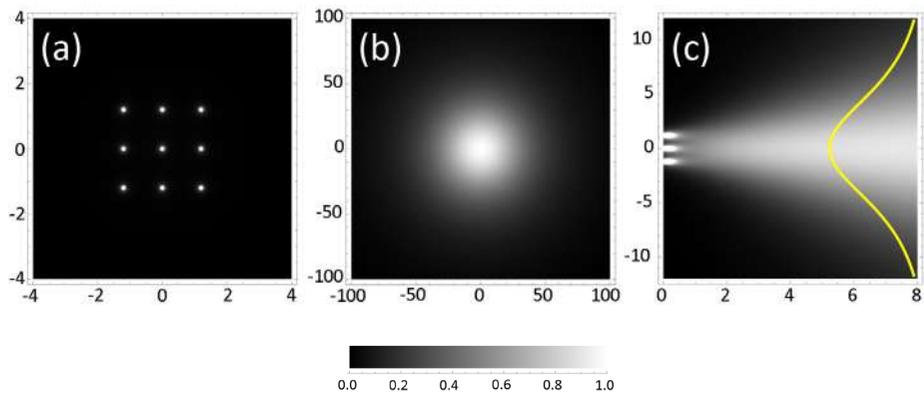


Figure 5. Lorentzian well provided by an array of 3x3 base states of space in the MD stage. **(a)** Array of vertex points at M with horizontal and vertical spacing of $a = 3\lambda$ ($\lambda = 0.4\mu\text{m}$). **(b)** Cross-section at $z = 100\lambda$. **(c)** Axial sections for $0 \leq z \leq 20\lambda$. Horizontal and vertical axes: **(a)**, **(b)** Cartesian components of \mathbf{r}_A , **(c)** z and mutually parallel Cartesian components of ξ_j at the left edge and \mathbf{r}_A at the right edge. Axes units are expressed in μm and the scale is in dimensionless arbitrary units.

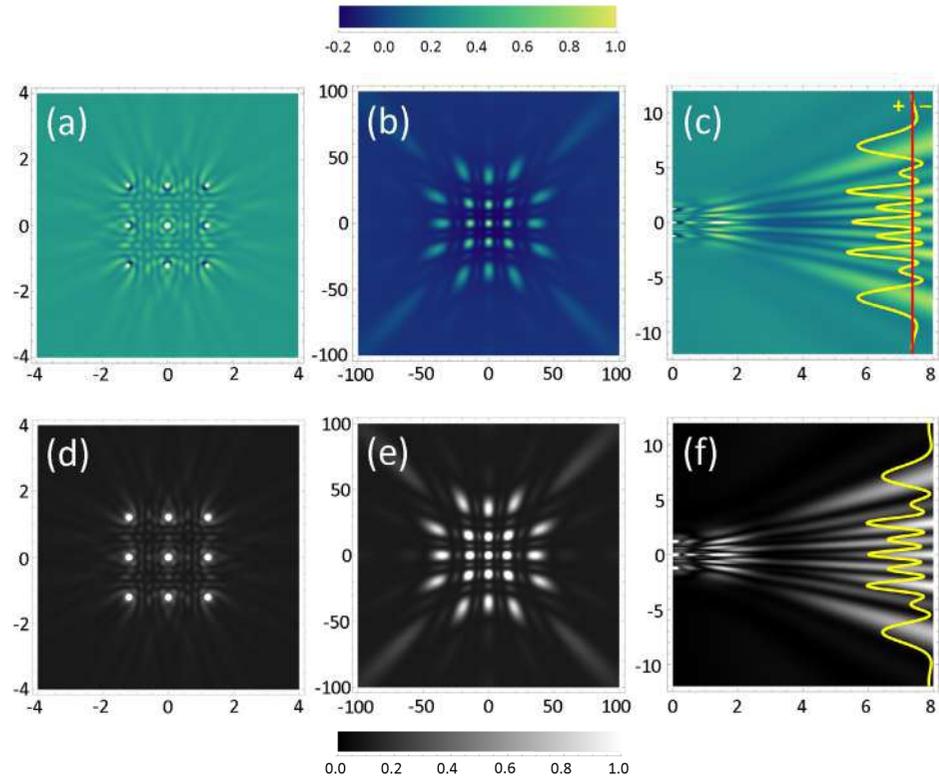


Figure 6. Cross-sections (left and central columns) and axial sections (right column) of the geometric potential on the top row and the spatially structured Lorentzian wells on the bottom row of the example in figure 5 under a maximum prepared non-locality at M

that filters the set of ground states while its non-local component for $\xi_D \neq 0$, $\kappa(\xi_+, \xi_-) = w(\xi_+, \xi_-) \tau(\xi_+, \xi_-) \cos(\beta(\xi_+)) \cos(\beta(\xi_-)) \cos(\theta(\xi_+) - \theta(\xi_-))$ filters the set of geometric potential modes that excite these ground states. Such excitations only configure specific distributions of zones of non-null quantum probability in the volume of the Lorentzian wells. Thus, spatially structured Lorentzian wells are established in the MD stage where the concentration of quantum probability characterizes the confinement zones. However, the spatially-structured Lorentzian well of each geometric state of space, $\langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle = \langle \mathbf{r}_A | \hat{R}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle + \frac{1}{2} \langle \mathbf{r}_A | \hat{G}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle$, takes on non-positive values at the points \mathbf{r}_A in which $\langle \mathbf{r}_A | \hat{R}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle \leq \frac{1}{2} \langle \mathbf{r}_A | \hat{G}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle$ and $\langle \mathbf{r}_A | \hat{G}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle < 0$ (Figure 7). Such points configure forbidden regions for confinement because confinement is characterized by the concentration of quantum probability configuring the observable to be measured by a square modulus detector (Castañeda, 2022). Nevertheless, condition $\int_M d^2 \xi_A \langle \mathbf{r}_A | \hat{R}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle \geq \left| \int_M d^2 \xi_A \langle \mathbf{r}_A | \hat{G}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle \right|$ for $\int_M d^2 \xi_A \langle \mathbf{r}_A | \hat{G}(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle < 0$ must be fulfilled to ensure the achievement of Eq. (15). This means that:

- (i) The set of geometric excited states of space is non-separable because the space state overlapping is required to fulfill Eq. (15).
- (ii) The forbidden zones, whose modes are non-factorable quantities, are excited by the geometric potential. Indeed, the geometric potential operator in Eq. (17) takes the non-factorable form

$$\hat{G}(\xi_A) = \int_M d^2 \xi_D |\kappa(\xi_+, \xi_-)| (|\Theta(\xi_+)\rangle \langle \Theta(\xi_-)| \exp(i\alpha(\xi_+, \xi_-)) + |\Theta(\xi_-)\rangle \langle \Theta(\xi_+)| \exp(i\alpha(\xi_-, \xi_+))). \quad (18)$$

Consequently, the density operator of geometric states of space $\hat{W}(\xi_A) = \hat{R}(\xi_A) + \frac{1}{2} \hat{G}(\xi_A)$

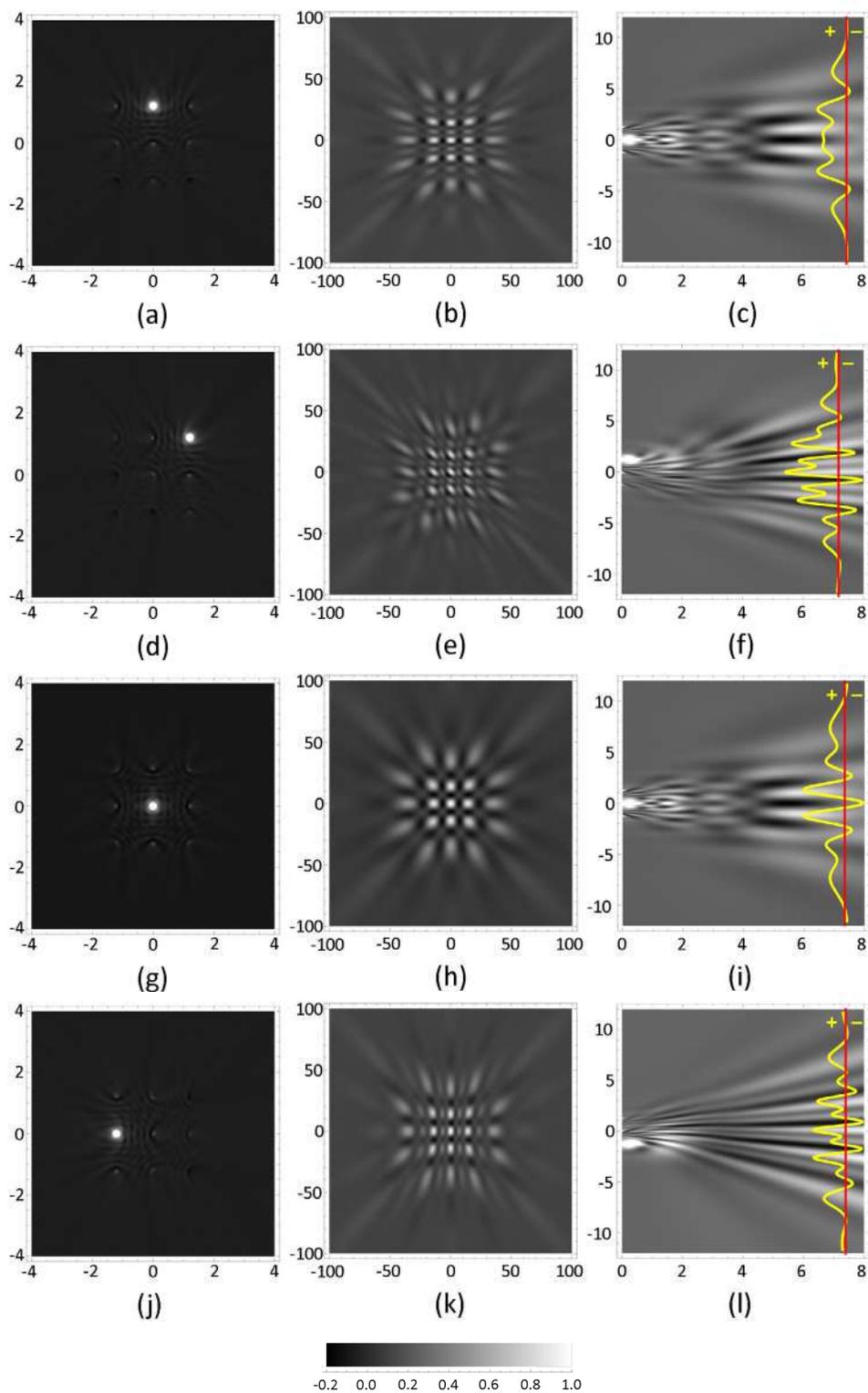


Figure 7. Cross-sections (left and central columns) and axial sections (right column) of some individual spatially structured Lorentzian wells of the example in **figure 6** (bottom row). White dots of the cross-section on the left column denote the vertex of the corresponding well.

becomes non-factorable for high non-locality values $|\kappa(\xi_+, \xi_-)|$.

(iii) Forbidden zones of each geometric state of space must coincide with confinement zones of the remaining space states in such a way that the forbidden regions are removed by the addition of the space states. As a consequence, the values of the confinement zones of each geometric state of space diminish because of the negative values of the coincident forbidden zones of the remaining space states. It can be formalized without loss of generality by considering the two geometric states of space in a Young interferometer, whose vertices are placed at the mask pinholes in $\xi_A = \pm \mathbf{a}/2$. Therefore, the inequality

$$\langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(\mathbf{a}/2) | \mathbf{r}_A \rangle + \langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(-\mathbf{a}/2) | \mathbf{r}_A \rangle > \langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(\pm \mathbf{a}/2) | \mathbf{r}_A \rangle \quad (19)$$

is fulfilled except over the forbidden zones of $\langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(\mp \mathbf{a}/2) | \mathbf{r}_A \rangle$.

These features suggest a new type of entanglement between the geometric states of space that we call spatial entanglement (Castañeda, 2022), (Castañeda *et al.*, 2023). Usually, the term entanglement denotes certain interactions at a distance between photons or matter particles (Hessmo *et al.*, 2003; Jones & Wiseman, 2011). In the proposed theory, this term denotes the fact that pairs of geometric states of space with vertex separation longer than the geometric uncertainty limit can modify each other's confinement zones in the absence of photons. In this sense, geometric states of space under high-valued prepared non-locality become spatially entangled at their forbidden zones.

The individual geometric states of space can be numerically modified by considering their spatial entanglement so that $\langle \mathbf{r}_A | \hat{W}'(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle \geq 0$ and $|\psi(\mathbf{r}_A)|^2 = \langle \mathbf{r}_A | \hat{H}_0 | \mathbf{r}_A \rangle = \frac{\hbar\omega}{2} \int d^2\xi_A \langle \mathbf{r}_A | \hat{W}'(\xi_A) | \mathbf{r}_A \rangle$. These modified space states should provide the quantum probabilities for single-photon detection in the individual experimental realizations. However, their measurement is challenging for experimentalists, mainly because of the stringent restrictions established by quantum eraser experiments (Scully & Zubairy, 1997), (Rueckne & Peidle, 2013).

Given that each geometric potential mode excites only a specific pair of space states, the modification of a set of geometric states of space should be performed by pairs. For the monomodal Young interference, the modification is performed as follows:

- $\langle \mathbf{r}_A | \hat{W}'(\pm \mathbf{a}/2) | \mathbf{r}_A \rangle = \langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(\pm \mathbf{a}/2) | \mathbf{r}_A \rangle$ for the confinement zones, where $\langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(\pm \mathbf{a}/2) | \mathbf{r}_A \rangle > 0$.
- $\langle \mathbf{r}_A | \hat{W}'(\pm \mathbf{a}/2) | \mathbf{r}_A \rangle = 0$ for the forbidden zones, where $\langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(\pm \mathbf{a}/2) | \mathbf{r}_A \rangle \leq 0$
- $\langle \mathbf{r}_A | \hat{W}'(\pm \mathbf{a}/2) | \mathbf{r}_A \rangle = \langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(\mathbf{a}/2) | \mathbf{r}_A \rangle + \langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(-\mathbf{a}/2) | \mathbf{r}_A \rangle$ for the spatial entanglement zones, where $\langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(\pm \mathbf{a}/2) | \mathbf{r}_A \rangle > 0$ and $\langle \mathbf{r}_A | \hat{W}(\mp \mathbf{a}/2) | \mathbf{r}_A \rangle \leq 0$.

Figure 8 illustrates the modified geometric states of space by considering their spatial entanglement, for an array of 2x2 points at M, as well as the pattern obtained after their overlapping.

However, by suitably weakening the prepared non-locality, the forbidden regions are removed and, therefore, the spatial entanglement between the excited states of space is removed too, although the excitation provided by the geometric potential modes is yet visible, as illustrated in **figure 9**. These results show that single-photon interference without spatial entanglement is also feasible.

Theoretical description of the individual experimental realization

The theoretical term “individual experimental realization” denotes the interval for $\langle 1 | \hat{n} | 1 \rangle = 1$ of the binary sequence $\langle 1 | \hat{n} | 1 \rangle = 1, \langle 0 | \hat{n} | 0 \rangle = 0$ of the basic experiment segment in single-photon interference.

It is well-established that single photons can be created by local emissions resulting from atomic transitions of matter that specify its frequency ω and can be annihilated by local detection at a pixel of a square modulus detector (Saleh & Teich, 2019). The

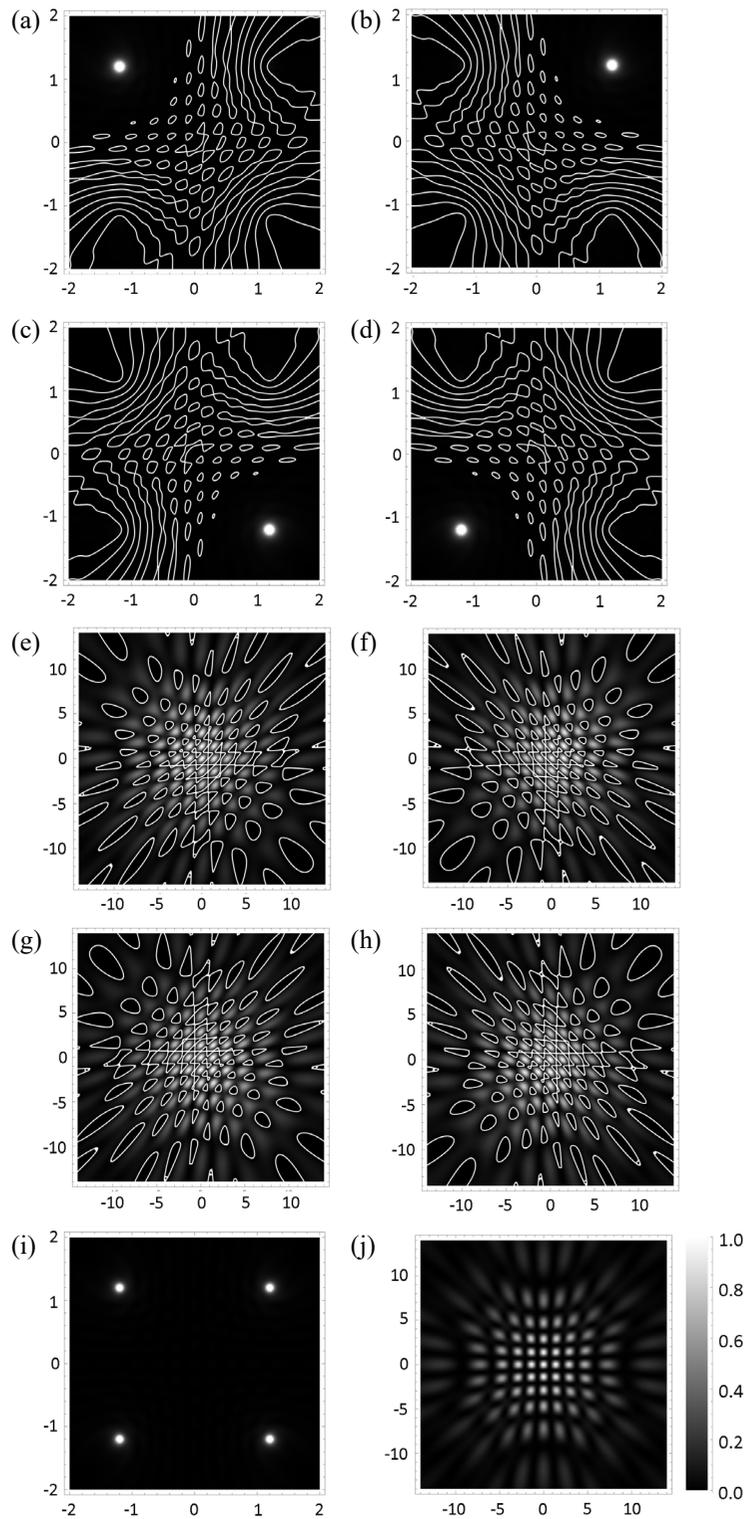


Figure 8. Cross-sections at $z = 0.1\lambda$ on the upper row and $z = 20\lambda$ on the second row ($\lambda = 0.4\mu\text{m}$) of the modified individual excited states of space by spatial entanglement in the MD stage and the complete excited state ((i), (j)) for single-photon interference with 2×2 array of points at M under high prepared non-locality. The points are placed on the vertices of a square with a side of 3λ in length. Closed contours in graphs (a)-(h) denote the forbidden zones set to null by spatial entanglement. Horizontal and vertical axes: Cartesian components of \mathbf{r}_j in μm . The scale is in dimensionless arbitrary units.

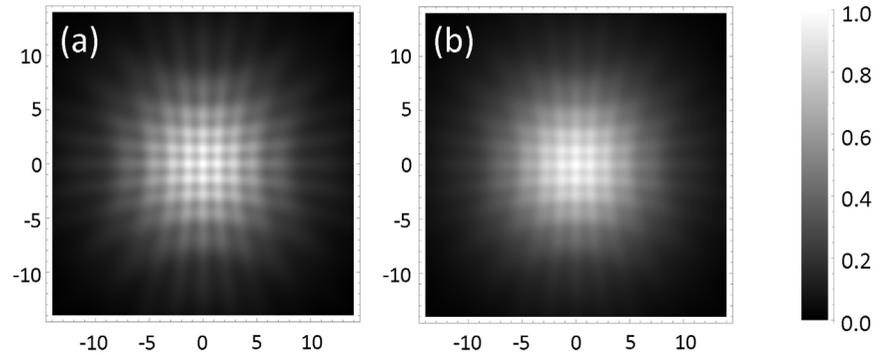


Figure 9. Cross-sections at $z = 20\lambda$ of the complete excited state for single-photon interference with the 2×2 array of points in **figure 8** under Gaussian-prepared non-locality at M with a standard deviation of **(a)** 2.7λ and **(b)** 2.4λ

photon's corpuscular nature is also well-established as a particle of quantum energy $E = \hbar\omega$ (Mandel & Wolf, 1995). In P&M-configured setups for single-photon interference (Figure 1), a photon source and a square modulus detector are placed at the S and D planes, respectively. The interference device, usually a mask, is placed at a third plane, M, between S and D. Local observables for photon emission at S and photon arrivals at M and D are determined by the quantum probabilities $|\psi(\mathbf{r}'_A)|^2$, $|t(\mathbf{r}'_A)|^2 \cos^2(\beta(\mathbf{r}'_A))$ in Eq. (11), $|\psi(\xi_A)|^2$ and $|\psi(\mathbf{r}_A)|^2$ given by Eqs. (14) and Eq. (15), respectively. Therefore, the single photon of any individual experimental realization should be considered as a particle moving in the interferometer. The localizability of such a particle in the setup is restricted by both the quantum and the geometric uncertainties. However, the determination of the specific photon path is irrelevant to both the phenomenological explanation of interference and the mathematical prediction of the experimental outcomes. In contrast, the following description should be the relevant characterization of an individual experimental realization in the framework of the proposed model:

(i) The single photon locally emitted by the source with a specific quantum probability enters the ground state of space with the vertex at the emission point and moves confined in the volume of the corresponding Lorentzian well until locally arriving at any point of the interference device in the well basis.

(ii) If the arriving point is opaque, then the photon is annihilated by absorption by the device. If the arriving point is transparent, the single photon crosses the device with a specific quantum probability and enters the geometric state of space with the vertex at the crossing point.

(iii) If the prepared non-locality at M links the crossed point with other transparent points of the device, then the space state is excited by the geometric potential establishing a spatially structured Lorentzian well in the volume delimited by the interference device and the detector. The single photon moves confined in any of the confinement zones of this well until being locally measured by the detector.

This description results from a direct phenomenological interpretation of the mathematical model for which further premises or hypotheses about the corpuscular nature of the photon and its behavior in the setup have been not advanced. Therefore, the local events of source emission, mask crossing, and detector recording, and the photon confinement in the spatially structured Lorentzian well of any geometric state of space in the setup characterize the proposed theory as a corpuscular framework. By including single-matter particle interference in ordinary space—which can be explained in the same way by this theory—the proposed corpuscular framework should motivate the community to revisit the phenomenology of the wave nature of interference.

The canonical equation for the quantum interference operator is expressed as

$$\hat{H} = \hbar\omega \left(\hat{n} + \frac{1}{2} \right) \int d^2 q_A \hat{W}(\mathbf{q}_A), \quad (20)$$

with $\mathbf{q}_A \equiv \mathbf{r}'_A$ for the SM stage, $\mathbf{q}_A \equiv \xi_A$ for the MD stage, and $[\hat{n}, \hat{W}] = 0$, which implies $[\hat{n}, \hat{R}] = [\hat{n}, \hat{G}] = 0$. Therefore, the canonical quantum interference operator for any individual experimental realization is

$$\langle 1 | \hat{H} | 1 \rangle = \hat{H}_1 = \frac{3}{2} \hbar\omega \int d^2 q_A \hat{W}(\mathbf{q}_A). \quad (21)$$

Equation (21) points to the fact that one photon of quantum energy $E = \hbar\omega$ propagates confined in the geometrical states of space of the vacuum energy $(1/2)\hbar\omega$ established in the setup and its arrival to a plane of reduced coordinates $(\mathbf{u}_A, \mathbf{u}_D)$ is canonically described by

$$\langle \mathbf{u}_A | \hat{H}_1 | \mathbf{u}_A \rangle = \frac{3}{2} \hbar\omega \int d^2 q_A \langle \mathbf{u}_A | \hat{W}(\mathbf{q}_A) | \mathbf{u}_A \rangle, \quad (22)$$

with $(\mathbf{u}_A, \mathbf{u}_D) \equiv (\xi_A, \xi_D)$ for the SM stage and $(\mathbf{u}_A, \mathbf{u}_D) \equiv (\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_D)$ for the MD stage. Therefore, the single photon emitted at $\mathbf{r}'_0 \equiv \mathbf{q}_0$ of S moves confined in the Lorentzian well with the vertex at this point and arrives to any point $\xi_0 \equiv \mathbf{u}_0$ of M in accordance to $\langle \mathbf{u}_0 | \hat{H}_1 | \mathbf{u}_0 \rangle = \frac{3}{2} \hbar\omega \langle \mathbf{u}_0 | \hat{W}(\mathbf{q}_0) | \mathbf{u}_0 \rangle$, with $\hat{W}(\mathbf{q}_0) = \hat{R}(\mathbf{q}_0)$. The arriving point is placed within the non-locality support given by $\langle \mathbf{u}_0 | \hat{H}_1 | \mathbf{u}_0 + \mathbf{u}_D \rangle = \frac{3}{2} \hbar\omega \int d^2 q_A \langle \mathbf{u}_0 | \hat{W}(\mathbf{q}_A) | \mathbf{u}_0 + \mathbf{u}_D \rangle$ with $\hat{W}(\mathbf{q}_A) = \hat{R}(\mathbf{q}_A)$. Now, let us consider that (i) the arriving point $\mathbf{q}_0 = \xi_0$ is transparent and (ii) there are transparent points, $\mathbf{q}_0 \pm \mathbf{q}_D$, so that the pairs $(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_0 \pm \mathbf{q}_D)$ belong to non-locality supports centered at $\mathbf{q}_A = \mathbf{q}_0 \pm \mathbf{q}_D/2$. Therefore, the single photon that arrives at $\xi_0 \equiv \mathbf{q}_0$ enters the individual geometric state of space $\hat{W}(\mathbf{q}_0) = \hat{R}(\mathbf{q}_0) + (1/2) \hat{G}(\mathbf{q}_0)$ excited by $\hat{G}(\mathbf{q}_0) = \int d^2 q_D \kappa(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_0 + \mathbf{q}_D) |\Theta(\mathbf{q}_0)\rangle \langle \Theta(\mathbf{q}_0 + \mathbf{q}_D)|$, i.e., the geometric potential composed by the subset of modes activated by the prepared non-locality for pairs of points $(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_0 \pm \mathbf{q}_D)$. The single photon cannot be confined in the forbidden $\hat{W}(\mathbf{q}_0)$ zones and the probability to be confined in a spatially entangled zone given by $\hat{W}'(\mathbf{q}_0)$ is lower than the corresponding value given by $\hat{W}(\mathbf{q}_0)$. Consequently, the single photon moves in the MD stage effectively confined in the modified geometric state of space $\hat{W}'(\mathbf{q}_0)$ so that its detection by any pixel of the detector at D is described by $\langle \mathbf{u}_A | \hat{H}'_1 | \mathbf{u}_A \rangle = \frac{3}{2} \hbar\omega \langle \mathbf{u}_A | \hat{W}'(\mathbf{q}_0) | \mathbf{u}_A \rangle \geq 0$ where $\langle \mathbf{u}_A | \hat{W}'(\mathbf{q}_0) | \mathbf{u}_A \rangle$ represents the quantum probability of finding the single photon at the point $\mathbf{u}_A \equiv \mathbf{r}_A$ of D. So, the modified quantum interference operator by spatial entanglement $\hat{H}'_1 = (3/2) \hbar\omega \hat{W}'(\mathbf{q}_0)$ describes the effective single photon confinement in the individual experimental realization represented by the modified geometric state of space $\hat{W}'(\mathbf{q}_0)$. Consequently, the canonical quantum interference operator can describe exhaustively any individual experimental realization of single-photon interference in ordinary space and points to the fact that they are not pure random events because of the deterministic Lorentzian wells in the SM stage and the spatially structured Lorentzian wells in the MD stage established by $\hat{W}'(\mathbf{q}_0)$. The statistical appearance of single-photon detections in the complete interference experiment is due to the statistics of source emissions and mask crossings, the quantum and geometric uncertainties that randomize the confinement in the established zones in each experimental realization, and the quantum sensitivity of the detector that determines its detection rate. However, this statistical appearance is compatible with the deterministic geometries of the space states established in the experimental setup.

Conclusions

The rigorously deduced quantum interference operator describes non-paraxial single-photon interference as resulting from the photon confinement in geometric states of space filtered (i.e., selected and weighted) by the setup. This exact second-order mathematical tool confers a physical meaning to geometry in interference, as relativity did for gravity. It implies an epistemological departure from the standard interference formalism based on the paraxially approximated first-order procedure of wave superposition that calls for its discussion by the community.

More precisely, in this framework, ordinary space is considered a system with geometric states provided by the vacuum, i.e., in the absence of photons and with the vacuum energy. Ground states of space can be geometrically excited (i.e., spatially modulated) by geometric potential modes. Such modes are activated by prepared non-locality functions also provided by the vacuum. This conception of ordinary space completely differs from the Newtonian passive scenario of the standard interference formalism. Indeed, the geometric states of space determine interference so that the patterns recorded as experimental outcomes are effectively space state maps performed by the single photons that move along their confinement zones.

The corpuscular framework of the proposed theory is remarkable. It also explains single matter particle non-paraxial interference, which opens the way to the community revisiting the wave nature attributed to interference. Additionally, the description does not resort to wave-particle duality and associated hypotheses to describe interference (particle delocalization, self-interference, and wave collapse, for instance). It only requires the notion of confinement as the phenomenological principle to explain interference in a generalized context (including classical light and matter particles) (Castañeda *et al.*, 2023). Furthermore, the quantum interference operator introduces new interference features not evidenced by the standard formalism, such as geometric uncertainty and spatial entanglement.

We should emphasize that the phenomenology of the interference operator refers to ordinary space, which is the environment where interference experimentally occurs instead of exclusively calculating the probability distributions of experimental outcomes in the Hilbert space, as established in quantum mechanics. From this point of view, our model could be considered as a realistic theory, also compatible with classical light interference, by considering a significantly large number of photons emitted at a time. Given their bosonic nature, photons can occupy the geometric states of space at a time, thus filling their confinement zones. For $n \gg 1/2$, the interference operator gives the well-known result $n\hbar\omega$ for light irradiance (Saleh & Teich, 2019). Besides, the angular factors of the effective transmission $\tau_{eff}(\xi_+, \xi_-)$ lead to the fulfillment of Malus' and Fresnel-Arago's classical laws of polarization (Born & Wolf, 1993).

Given these attributes, the phenomenology provided by the quantum interference operator seems to be more effective than the standard formalism for explaining interference in ordinary space. From this perspective, the proposed theory opens a pertinent discussion on the foundations of interference, the review of its philosophical implications, and the performing of new experiments to examine the validity of this alternative phenomenology.

Supplementary information

See the supplementary information in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2863/4467>

Author contributions

The authors contributed equally to the discussion of the subject and the paper preparation.

Conflicts of interest

The authors declare no conflicts of interest.

Data availability

No data were generated or analyzed in the presented research.

Funding statement

This work was carried out in the framework of the *Semillero 2241 - Ciencia de la Luz* research program at Universidad Nacional de Colombia.

References

- Born, M. & Wolf, E.** (1993). *Principles of Optics*, 6th ed. Pergamon Press.
- Bohr, N.** (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 48, 696-702.
- Castañeda, R., Moreno, J., Colorado, D., Laverde, J.** (2020). 3D non-paraxial kernel for two-point correlation modelling in optical and quantum interference at the micro and nanoscales. *Physica Scripta*, 95, 065502.
- Castañeda, R.** (2022). Confinement and spatial entanglement: phenomenology of a new interference principle. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 46 (181), 902-919.
- 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.
- De Martini, F., Denardo, G., Zeilinger, A.** (1994). *Proceedings of the Adriatico Workshop on Quantum Interferometry*. World Scientific.
- Hessmo, B., Usachev, P., Heydari, H., Bjork, G.** (2003). An experimental demonstration of single photon nonlocality. *arXiv: quant-ph / 0311144v1*.
- Jones, S. J. & Wiseman, H. M.** (2011). Nonlocality of a single photon: paths to an EPR-steering experiment. *arXiv: 1102.5369v3 [quant-ph]*.
- Mandel, L. & Wolf, E.** (1995). *Optical Coherence and Quantum Optics*. Cambridge University Press.
- Marshman, E. & Singh, C.** (2017). Investigating and improving student understanding of quantum mechanics in the context of single photon interference. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 010117.
- Mérola, J-M., Mazurenko, Y., Goedgebuer, J-P., Rhodes, W.T.** (1999). Single-Photon Interference in Sidebands of Phase-Modulated Light for Quantum Cryptography. *Physical Review Letters*, 82, 1656.
- Rueckne, W. & Titcomb, P.** (1996). A lecture demonstration of single photon interference. *American Journal of Physics*, 64(2), 184-188.
- Rueckne, W. & Peidle, J.** (2013). Young's double-slit experiment with single photons and quantum eraser. *American Journal of Physics*, 81(12), 951-958.
- Tang, J. & Hu, Z. B.** (2022). Analysis of single-photon self-interference in Young's double-slit experiments. *Results in Optics*, 9, 100281.
- Saleh, B.E.A. & Teich, M.C.** (2019). *Fundamentals of Photonics* 3rd ed. Wiley.

Artículo original

Determinación de los parámetros orbitales subyacentes en las efemérides solares de Abraham Zacuto

Determination of the underlying orbital parameters in Abraham Zacuto's solar ephemerides

J. Gregorio Portilla

Observatorio Astronómico Nacional, Facultad de Ciencias, Sede Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

Resumen

Con base en la teoría del movimiento solar de Hiparco-Ptolomeo, se propone un método geométrico para determinar los parámetros de la órbita a partir de tres valores de longitud eclíptica correspondientes a tres tiempos distintos. El método se aplicó específicamente para encontrar los parámetros subyacentes utilizados en la construcción de las tablas solares contenidas en el *Almanach Perpetuum* de Abraham Zacuto. Se utilizaron dos procedimientos para la selección de los valores de longitud: el primero espaciado por tres meses, y el segundo, espaciado por un número de días superior a seis, se aplicó a cada mes de los años 1473 a 1476. El primer procedimiento arrojó valores consistentes con un origen alfonsí de las tablas de Zacuto; el segundo, con amplias dispersiones, sugiere que en algunos meses específicos se utilizaron valores distintos de la excentricidad solar.

Palabras clave: Zacuto, Abraham; Teoría solar; Ptolomeo; Tablas alfonsíes; Excentricidad.

Abstract

Based on the solar motion theory of Hipparchus-Ptolemy, a geometric method is proposed to determine the parameters of the orbit from three values of ecliptic longitude corresponding to three different times. The method was specifically applied to find the underlying parameters used to construct the solar tables contained in Abraham Zacuto's *Almanach Perpetuum*. The longitude values were selected using two procedures: the first spaced by three months, and the second, spaced by an amount of days greater than six, was applied to each month from 1473 to 1476. The first procedure yielded values consistent with an Alfonsine origin of Zacuto's tables; the second exhibited wide dispersions but suggested that for some specific months, different values of solar eccentricity were used.

Keywords: Zacut, Abraham; Solar theory; Ptolemy; Alfonsine tables; Excentricity.

Introducción

La reciente conmemoración de los 500 años de la primera circunnavegación del mundo por parte de la expedición española al mando de Fernando de Magallanes (1480-1521), epopeya que culminara tiempo después Sebastián Elcano (1476-1526), puso una vez más de relieve el estado de los conocimientos astronómicos requeridos para los viajes transoceánicos de semejante envergadura (Sánchez, 2021; Vieira, 2005; Marcondes de Souza, 1957), los cuales comenzaban a tener el auspicio decidido de las potencias europeas expansionistas.

La confianza de los capitanes de estas exploraciones renacentistas se incrementó hasta el punto de bordear primero las costas occidentales africanas, luego doblar el cabo de Buena Esperanza y, a continuación, seguir de largo y alcanzar la India. No contentos con ello, se arriesgaron a ir hasta las islas de las Especias, e incluso más allá, inicialmente siguiendo la dirección este, aunque luego pusieron sus ojos hacia el poniente y terminaron

Citación: Portilla JG. Determinación de los parámetros orbitales subyacentes en las efemérides solares de Abraham Zacuto. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(189):784-796, octubre-diciembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.2656>

Editor: Román Castañeda

Correspondencia:

José Gregorio Portilla;
jgportillab@unal.edu.co

Recibido: 28 de mayo de 2024

Aceptado: 23 de septiembre de 2024

Publicado en línea: 14 de noviembre de 2024



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

encontrándose con América, un continente enorme desconocido para los europeos. Sin importar la dirección que se tomara, la ejecución de tales viajes implicaba navegar por muchos días sin tener a la vista tierra, lo que obligaba a los navegantes a contar con los medios astronómicos necesarios para inferir la ubicación del barco. Lo primero era encontrar la latitud, ya fuera midiendo la altura de la estrella polar con respecto al horizonte o mediante la observación de estrellas cercanas al polo sur celeste, como las de la constelación del Octante o de la Cruz del Sur, cuando los viajes se hicieron cada vez más meridionales y era imposible vislumbrar la estrella polar (**Dennefeld**, 2020; **Albuquerque**, 1983). Sin embargo, la experiencia demostró que las observaciones del Sol con astrolabio eran más rigurosas y confiables que las de las estrellas hechas con cuadrante (**Marcondes de Souza**, 1957), lo que obligó a los marinos a contar con tablas de declinación del Sol a lo largo del año.

Los registros más antiguos de la utilización de observaciones del Sol para hallar la latitud son los de las expediciones portuguesas en la costa occidental africana, los cuales datan de 1484 a 1488 y se hacían casi exclusivamente en tierra (**Proverbio**, 1994). La técnica debió refinarse significativamente en los siguientes años hasta lograr hacer las observaciones en mar abierto, en medio del viento y el movimiento incesante del barco, lo que evidentemente debió conseguirse con el desarrollo del astrolabio náutico (**Swanick**, 2005). Por supuesto, para contar con la ubicación más precisa posible, debía contarse también con los valores de declinación solar más exactos que hubiera.

Se cree que las primeras tablas con datos explícitos de la declinación del Sol en cada día del año se basan en el *Almanach Perpetuum* del gran astrónomo salmantino Abraham Zacuto (1452-1515). Si bien es cierto que no fue profesor de la Universidad de Salamanca debido a su condición de judío, sus obras ejercieron una gran influencia en el medio académico de España y Europa (**Sánchez**, 2023). El *Almanach Perpetuum*, originalmente redactado en hebreo en 1478 bajo el nombre de la *Gran Composición* (**Goldstein**, 1998; **Chabas & Goldstein**, 2000), fue luego traducido a distintos idiomas y finalmente salió impreso en 1496. Puede afirmarse que las tablas solares de Zacuto descansan, en últimas, en el modelo geométrico desarrollado por Hiparco de Nicea en el siglo II a. C., el cual fue complementado por Claudio Ptolomeo dos y medio siglos después. La esencia del modelo no sufrió modificaciones a lo largo de las centurias; los astrónomos de los siglos siguientes se contentaron con refinar los datos de los parámetros de la órbita solar y perfeccionar los valores de la duración del año trópico y la oblicuidad de la eclíptica (**Portilla**, 2023); la única modificación digna de mención durante la Edad Media fue el denominado movimiento de acceso y receso (también llamado trepidación), un movimiento oscilante ficticio que se le atribuía al punto vernal.

Los ensayos numéricos que comparan los resultados obtenidos al utilizar los parámetros de las tablas alfonsíes con los valores de longitud solar consignados en el *Almanach Perpetuum* sugieren que los primeros se emplearon en la elaboración de los segundos (**van der Werf**, 2017; **Chabas & Goldstein**, 2000). Pero es natural preguntarse si los datos de longitud contenidos en las tablas se derivaron siempre de los valores constantes en los parámetros alfonsíes o si tuvieron algún tipo de variación.

Varios autores han acudido a métodos estadísticos basados en mínimos cuadrados no lineales, con el fin de extraer mediante “ingeniería inversa” los parámetros implícitos en determinadas efemérides de cuerpos celestes establecidas en la Antigüedad o en la Edad Media (**Thomann**, 2022; **Van Dalen**, 1993). Aunque estos métodos logran cumplir su cometido, el accionar numérico que subyace en ellos no permite tener una visión que permita inferir propiedades de la órbita bajo ciertas condiciones particulares. Por ello, en este artículo se propone un simple mecanismo geométrico para determinar, con base en tres valores cualesquiera de la longitud solar, los tres parámetros básicos de la órbita a partir del modelo solar de Hiparco-Ptolomeo. Tal estrategia se aplicará a los valores de longitud eclíptica contenidos en el *Almanach Perpetuum* para así inferir sobre qué valores específicos de los parámetros de la órbita se construyeron dichas efemérides.

Se hace primero una exposición trigonométrica de la teoría solar de Hiparco-Ptolomeo; en seguida se describe el mecanismo propuesto para encontrar los parámetros orbitales; posteriormente se expone la estrategia para seleccionar los valores de longitud que sirven de punto de partida de los cálculos y luego se analizan los valores hallados y se consignan las conclusiones.

La teoría solar de Hiparco-Ptolomeo

El procedimiento geométrico básico para determinar la posición del Sol en un tiempo t apelando a la teoría solar de Hiparco-Ptolomeo (TSHP), tal y como se describe en *El Almagesto*, es de sobra conocido (Portilla, 2023; Pedersen, 2010; Toomer, 1998), por lo que no se incluye aquí. Alternativamente, se presenta a continuación una forma equivalente de dicha transformación con base en la trigonometría plana. Según la TSHP, el Sol, S , se mueve a lo largo de una circunferencia con velocidad uniforme y, así, el ángulo γ , centrado en C , es función lineal del tiempo (Figura 1). La Tierra, T , está ligeramente desplazada de C , de manera que el ángulo θ , que describe la posición del Sol visto desde la Tierra, no barre ángulos iguales en tiempos iguales. Tanto γ como θ se cuentan desde el apogeo (A) del Sol; el apogeo, a su vez, posee un ángulo λ_a con respecto al punto vernal (Υ).

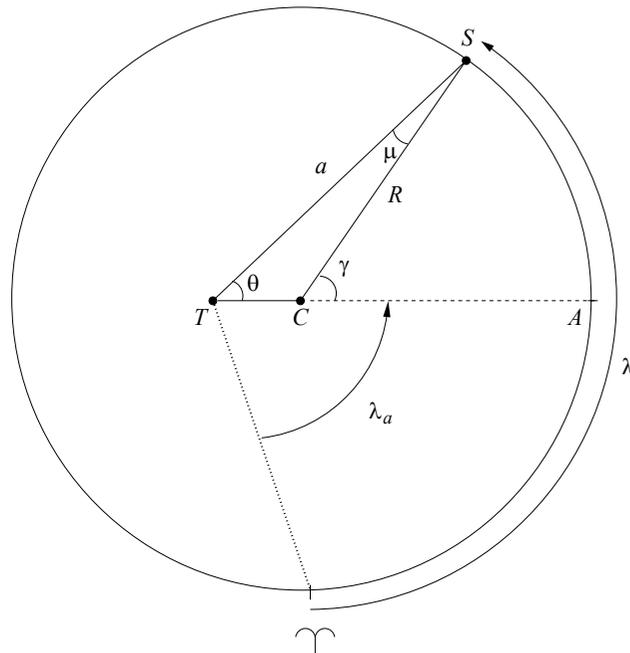


Figura 1. Descripción de la TSHP. El Sol, S , se mueve uniformemente a lo largo de una circunferencia con centro en C . La Tierra, T , se encuentra desplazada ligeramente del centro; A representa el apogeo del Sol y Υ es el punto vernal.

Se ve inmediatamente que:

$$\frac{\text{sen } \gamma}{a} = \frac{\text{sen } \theta}{R},$$

donde R es el valor del radio de la circunferencia (que se adopta igual a la unidad) y a es la distancia variable existente entre la Tierra y el Sol.

Es claro también que:

$$a = R \sqrt{1 + e^2 + 2e \cos \gamma}, \tag{1}$$

donde e es la excentricidad (la relación entre la distancia TC con respecto al radio R). De manera que enseguida se obtiene:

$$\text{sen } \theta = \frac{\text{sen } \gamma}{\sqrt{1+e^2+2e \cos \gamma}}, \quad (2)$$

en la que $R = 1$. El ángulo γ para cualquier tiempo t está dado, evidentemente, por la siguiente expresión:

$$\gamma = \gamma_0 + \frac{360^\circ}{T_t}(t-t_0), \quad (3)$$

donde γ_0 es el valor de ese ángulo en un instante del tiempo de referencia t_0 , denominado la fecha radix, que puede hallarse a partir de una observación solar realizada desde la Tierra (θ_0) en el instante t_0 ; T_t es la duración del año trópico. Habiendo hallado γ , la determinación de θ para cualquier tiempo t es inmediata de acuerdo con la ecuación (2).

La longitud aparente del Sol λ para el instante de tiempo t está dada entonces por:

$$\lambda = \lambda_a + \theta. \quad (4)$$

En caso de que se desee conocer la declinación δ del Sol, esta se puede obtener a partir de la conocida transformación entre las coordenadas eclípticas y las ecuatoriales absolutas, de manera que:

$$\text{sen } \delta = \text{sen } \varepsilon \text{ sen } \lambda,$$

donde ε es la oblicuidad de la eclíptica.

Los valores que obtuvo Ptolomeo a mediados del siglo II d.C. son los siguientes: $e = 0,0417$, $\lambda_a = 65,5^\circ$, $T_t = 365^d 5^h 55^m 11,9^s$ y $\varepsilon = 23^\circ 51' 20''$ (Toomer, 1998).

Determinación de los parámetros

Vista desde una óptica moderna, la intención de conocer los parámetros geométricos que subyacen en los valores de longitud debidamente presentados en una tabla responde a una determinación orbital, esto es, si se conocen los valores de la longitud eclíptica correspondientes a varios tiempos distintos, bien pueden determinarse los parámetros geométricos que, se supone, están detrás de los valores de longitud con los que fueron calculados.

Hasta donde se pudo constatar, ningún autor ha apelado a la estrategia simple de conocer a partir de tres valores cualesquiera de la longitud del Sol contenidos en una tabla específica los parámetros que definen la órbita excéntrica descrita atrás sin apelar a métodos estadísticos sólidos, lo que, por supuesto, puede arrojar luces acerca de la constancia de los valores de los parámetros orbitales sobre los cuales se construyeron las tablas solares de Zacuto.

Supongamos que se dispone de tres valores de la longitud del Sol ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) correspondientes a tres tiempos distintos t_1, t_2, t_3 , con $t_3 > t_2 > t_1$. Se ha de adoptar de antemano el valor de la duración del año trópico, T_t . El objetivo es conocer el valor de la excentricidad e (o TC), la longitud del apogeo λ_a y el ángulo γ_0 para una fecha de referencia t_0 , suponiendo que el Sol se mueve en una órbita de tipo excéntrico de acuerdo al modelo de Hiparco-Ptolomeo.

De la ecuación (3) se desprende que:

$$\gamma_2 - \gamma_1 = \frac{360^\circ}{T_t}(t_2 - t_1), \quad \gamma_3 - \gamma_2 = \frac{360^\circ}{T_t}(t_3 - t_2), \quad \gamma_3 - \gamma_1 = \frac{360^\circ}{T_t}(t_3 - t_1)$$

las cuales, por supuesto, son cantidades conocidas. Dado que los triángulos conformados por las posiciones del Sol (S1, S2, S3) y el centro C son isósceles, las cuerdas entre dos posiciones del Sol, que llamaremos d_{21} , d_{32} y d_{31} , se conocen inmediatamente, pues están dadas por:

$$\begin{aligned} d_{21} &= \sqrt{2[1 - \cos(\gamma_2 - \gamma_1)]}, \\ d_{32} &= \sqrt{2[1 - \cos(\gamma_3 - \gamma_2)]}, \\ d_{31} &= \sqrt{2[1 - \cos(\gamma_3 - \gamma_1)]}, \end{aligned}$$

en las cuales se tomó $R = 1$.

Puesto que la longitud aparente está dada por la ecuación (4), se infiere que:

$$\theta_2 - \theta_1 = \lambda_2 - \lambda_1, \quad \theta_3 - \theta_2 = \lambda_3 - \lambda_2, \quad \theta_3 - \theta_1 = \lambda_3 - \lambda_1,$$

de modo que al utilizar el teorema del coseno de la trigonometría plana se puede establecer el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) - d_{21}^2 &= 0, \\ a_2^2 + a_3^2 - 2a_2a_3 \cos(\theta_3 - \theta_2) - d_{32}^2 &= 0, \\ a_1^2 + a_3^2 - 2a_1a_3 \cos(\theta_3 - \theta_1) - d_{31}^2 &= 0. \end{aligned} \tag{5}$$

Este último conjunto conforma un sistema de ecuaciones en el que las incógnitas son a_1 , a_2 y a_3 . Su solución no es trivial. Para encontrarla se utilizaron inicialmente programas de cálculo simbólico, los cuales encuentran un conjunto de varias soluciones como salida, entre las que no es difícil seleccionar la correcta, pues es claro que se han de rechazar aquellas con valores negativos, imaginarios o incoherentes con la secuencia de valores de los tiempos (es decir, valores decrecientes de a_1 , a_2 y a_3 cuando los tiempos son posteriores al perigeo y crecientes cuando son posteriores al apogeo). Como era deseable una forma más ágil de realizar los cálculos, se optó al final por el uso de la función `fsolve` de Python, con valores de arranque próximos a la unidad. Esta opción fue afortunada, pues el código que se escribió arrojó siempre una única solución coherente con la secuencia de los tiempos utilizados.

Una vez determinados a_1 , a_2 y a_3 , el paso siguiente aplica para cada par de posiciones. En lo siguiente se describe la secuencia para el par S_1 - S_2 (**Figura 2**). El ángulo α_{21} está dado por:

$$\alpha_{21} = \frac{180^\circ - (\gamma_2 - \gamma_1)}{2},$$

y el ángulo β_{21} por:

$$\beta_{21} = \text{sen}^{-1} \left[\frac{a_1 \text{sen}(\theta_2 - \theta_1)}{d_{21}} \right]. \tag{6}$$

Hallados estos dos ángulos, el valor de la distancia TC, esto es, la excentricidad (e) se encuentra inmediatamente:

$$e = \sqrt{1 + a_2^2 - 2a_2 \cos(\beta_{21} - \alpha_{21})}. \tag{7}$$

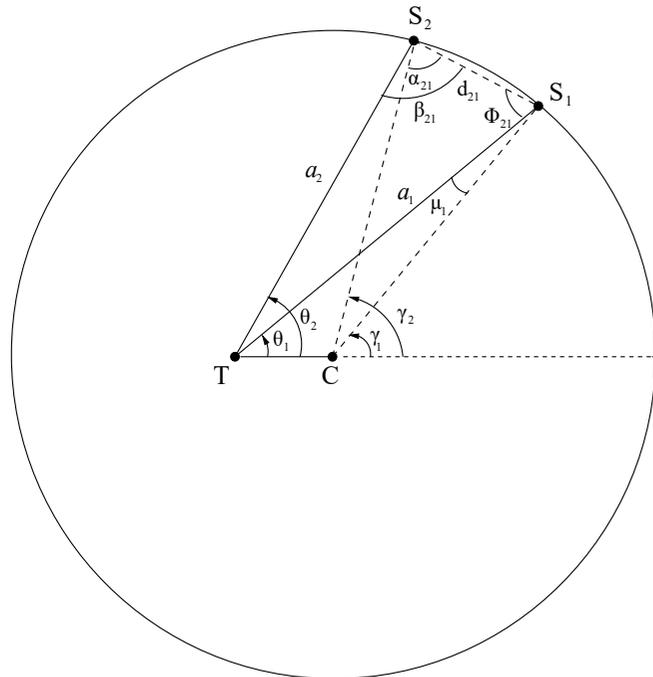


Figura 2. Dos posiciones del Sol (S_1 y S_2) en los tiempos t_1 y t_2 . No se muestra una tercera posición para efectos de claridad. La cuerda d_{21} es la distancia entre esas dos posiciones.

Una forma alternativa de hallar e es calcular el ángulo μ_1 . Primero se halla el ángulo Φ_{21} mediante:

$$\Phi_{21} = 180^\circ - \beta_{21} - (\theta_2 - \theta_1), \quad (8)$$

y, como es fácil ver, la relación entre Φ_{21} y el ángulo μ_1 es:

$$\mu_1 = \alpha_{21} - \Phi_{21},$$

de modo que e puede también expresarse como:

$$e = \sqrt{1 + a_1^2 - 2a_1 \cos \mu_1}. \quad (9)$$

La excentricidad debe arrojar idéntico valor si se utilizan como alternativa los datos correspondientes a los pares S_1 - S_3 o S_2 - S_3 . Hallada la excentricidad, la determinación de la longitud del apogeo es inmediata. De la ecuación (1) se infiere:

$$\gamma_i = \cos^{-1} \left(\frac{a_i^2 - 1 - e^2}{2e} \right),$$

en la que el valor del cuadrante correcto del ángulo puede determinarse haciendo un análisis de los valores relativos de a_i ($i = 1, 2, 3$). Con γ_i , el ángulo θ_i se encuentra directamente a través de (2):

$$\theta_i = \sin^{-1} \left(\frac{\text{sen } \gamma_i}{\sqrt{1 + e^2 + 2e \cos \gamma_i}} \right).$$

La longitud del apogeo queda establecida con ayuda de (4):

$$(\lambda_a)_i = \lambda_i - \theta_i.$$

Por último, se puede determinar el valor de γ en una época de referencia (t_0), que llamaremos γ_0 . Es claro que para cualquier tiempo t_i se tiene:

$$\gamma_i = \gamma_0 + \frac{360^\circ}{T_i} (t_i - t_0),$$

de la que se obtiene de forma inmediata:

$$\gamma_0 = \gamma_i - \frac{360^\circ}{T_i} (t_i - t_0) \quad (10).$$

No sobra advertir que este valor se obtiene con referencia al apogeo del Sol en el tiempo t_0 . Los parámetros orbitales que determinan la geometría de la órbita son, entonces: e , λ_a y γ_0 (para un t_0). Se asumió que a lo largo del año el valor de λ_a es constante, esto es, se consideró fijo el punto vernal dentro del intervalo estudiado $t_3 - t_1$, (es decir, el efecto de la precesión y el de la trepidación son nulos), lo que puede justificarse si se tiene en cuenta que la tasa anual del término principal de precesión era de apenas 26,4" y unos 7,6" por año para la trepidación a finales del siglo XV según los valores adoptados para las tablas alfonsíes (Pouille, 1969).

Un caso particular

El procedimiento descrito adopta una solución sencilla, sin apelar a la aproximación numérica, cuando se toma $\lambda_1 = 0^\circ$, $\lambda_2 = 90^\circ$ y $\lambda_3 = 180^\circ$, esto es, los valores en longitud del Sol en equinoccio de primavera, solsticio de verano y equinoccio de otoño, respectivamente. Fue con el conocimiento de la diferencia en tiempo entre tales situaciones con el que Hiparco y Ptolomeo lograron establecer los parámetros geométricos de la órbita solar. Según estos astrónomos: $t_2 - t_1 = 94,5$ d y $t_3 - t_2 = 92,5$ d, de lo que se infiere que: $t_3 - t_1 = 187$ d (Toomer, 1998). Las ecuaciones (5) se reducen entonces a:

$$a_1^2 + a_2^2 = d_{21}^2, \quad (11)$$

$$a_2^2 + a_3^2 = d_{32}^2, \quad (12)$$

$$a_1^2 + a_3^2 + 2 a_1 a_3 = d_{31}^2. \quad (13)$$

Una forma de solucionar este sistema es reemplazar el valor de a_3 despejado de la ecuación (12) en la ecuación (13), resolver la ecuación cuadrática resultante para a_1 y tomar la solución positiva para llegar a:

$$a_1 = d_{31} - \sqrt{d_{32}^2 - a_2^2},$$

con la que, al elevar al cuadrado, igualar con la ecuación (11) y despejar para a_2 , es posible obtener:

$$a_2 = \frac{\sqrt{2(d_{31}^2 d_{21}^2 + d_{31}^2 d_{32}^2 + d_{21}^2 d_{32}^2) - (d_{32}^4 + d_{31}^4 + d_{21}^4)}}{2d_{31}}.$$

Hallado a_2 , los valores de a_1 y a_3 se obtienen directamente de las ecuaciones (11) y (12), respectivamente.

El procedimiento que se sigue a continuación es idéntico al descrito atrás, solo resta agregar que las ecuaciones (6) y (8) pueden escribirse ahora así:

$$\beta_{21} = \sin^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (a_2/a_1)^2}} \right), \quad \Phi = 90^\circ - \beta_{21}.$$

El lector puede verificar que, para este caso en particular, al tomar $T_t = 365\text{d } 5\text{h } 55\text{m } 12,021\text{s}$, se obtiene directamente: $a_1 = 1,0165$, $a_2 = 1,0375$, $a_3 = 0,9821$, $e = 0,0414$, y $\lambda_a = 65,43^\circ$.

Metodología de cálculo

Habiendo establecido el proceso de cálculo, hay que definir a continuación cuáles son los valores más apropiados de longitud eclíptica para ejecutar el procedimiento, pues si se trata de seleccionar tres valores cualesquiera (entre las 365 opciones para cada año no bisiesto), el número de combinaciones posibles es, por supuesto, muy elevado. Además, los primeros ensayos evidenciaron una tendencia notoria en los resultados que era previsible hasta cierto punto. De tener una situación ideal, esto es, de suponer que los datos de longitud fueron calculados directamente a partir de una teoría solar con parámetros de valor constante, y apelando a las facilidades de cálculo con las que se dispone hoy, el proceso de determinación orbital arrojaría siempre los mismos valores de los parámetros con independencia de los datos de entrada utilizados, descartando, por supuesto, posibles errores de cálculo o errores de imprenta.

En otros términos, sin importar los instantes de tiempo y los correspondientes valores de longitud eclíptica que se escojan para el cálculo, los datos numéricos de e , λ_a y γ_0 (para un t_0) arrojarían siempre un valor constante o, de existir diferencias, estas estarían dentro de un rango muy estrecho. Sin embargo, tal comportamiento no se observa, ya que los primeros ensayos numéricos arrojaron como resultado una amplia dispersión de los valores de los tres parámetros, en particular cuando los intervalos de tiempo eran relativamente cortos, de unos cuantos días entre ellos. Esta tendencia es consistente con lo que se conoce de la construcción de las tablas por parte de los antiguos calculistas, quienes recurrían a atajos para simplificar el enorme esfuerzo matemático que implicaba su elaboración. Así pues, la selección de los tres tiempos requeridos para determinar los parámetros no es un proceso tan simple y directo.

Por ello, en el presente trabajo nos hemos decantado por utilizar dos procedimientos: el primero consiste en seleccionar valores de longitud espaciados entre sí por la cuarta parte de un año, esto es, por tres meses, aproximadamente, pero sin pretender que exista una diferencia exacta de 90° entre ellos, lo que, como vimos, puede resolverse más cómodamente; el segundo procedimiento, mucho más elaborado desde el punto de vista del cálculo, consiste en seleccionar valores de longitud dentro del mismo mes, espaciados por un número variable de días, pero siempre con igual número de días entre los intervalos. Por la extensión de los tiempos involucrados, la primera estrategia permite abarcar una porción significativa de la órbita ($\sim 3/4$), de manera que los parámetros orbitales así obtenidos se ajustan a la geometría que define la curva como un todo; la segunda, cuya selección de tiempos tan próximos unos de otros implica cubrir únicamente una parte restringida del arco de la órbita, permite detectar variaciones sutiles en los parámetros, aunque no refleje exactamente la globalidad de sus valores, que ofrezcan indicios del procedimiento utilizado en la elaboración de las tablas.

En la **tabla 1** se muestran los valores de los parámetros de la órbita solar obtenidos seleccionando arbitrariamente algunos de los valores de longitud eclíptica siguiendo el primer procedimiento (1). Se adoptó como valor del año trópico para todos los cálculos: $T_t = 365\text{d } 5\text{h } 49\text{m } 16,02\text{s}$. En la tabla se puede observar que, salvo contados casos, con los valores seleccionados de las tablas de los años 1473 a 1476 (**Zacuto**, 1496), la gran mayoría de los valores obtenidos para cada parámetro tuvieron muy poca dispersión. Con el promedio de los datos correspondientes al año de 1473 (sin tener en cuenta el dato que presenta una importante desviación), se obtuvieron los siguientes valores para cada uno de los parámetros: $e = 0,037840$, $\lambda_a = 90,89748^\circ$ y $\gamma_0 = 257,41413^\circ$ (1 de marzo de 1473). Estos valores numéricos son consistentes con los utilizados para la elaboración de las tablas alfonsíes, a saber: $e = 0,03780$ (**van der Werf**, 2017), $\lambda_a = 90,9264^\circ$ y $\gamma_0 = 257,437639^\circ$, estos dos últimos derivados de los datos utilizados por **Pouille** (1969) que, en términos algebraicos, pueden expresarse así:

$$\lambda_a = 71,423055555 + 2,0114454 \times 10^{-5} \times (FJ_{t_0} - FJ_R) + \text{sen}^{-1}(\text{sen } 9 \cdot \text{sen } \Psi),$$

$$\gamma_0 = 278,35 + 0,985646397 \times (FJ_{t_0} - FJ_R) - \lambda_a,$$

donde:

$$\Psi = 359,20944444 + 1,408037 \times 10^{-4} \times (FJ_{t_0} - FJ_R),$$

y FJ_R y FJ_{t_0} representan, respectivamente, la fecha juliana de la fecha radix (31 de diciembre del 1 a. C.) y la del 1 de marzo de 1473 (ambos a mediodía), de manera que $FJ_{t_0} - FJ_R = 2259131 - 1721423 = 537708$.

El segundo procedimiento (2) consistió en escoger valores de longitud eclíptica dentro de un mismo mes espaciados por un número de días, y ternas separadas de manera que se cumpliera $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$. Se mantuvieron estas diferencias iguales en los tiempos con fines de control, pues en tal caso se satisface:

$$a_2 = \frac{a_1^2 - a_3^2}{2[a_1 \cos(\lambda_2 - \lambda_1) - a_3 \cos(\lambda_3 - \lambda_2)]}.$$

Tabla 1. Varios de los valores de longitud seleccionados para tres tiempos separados por tres meses, aproximadamente. Aparecen también los valores de los parámetros hallados para la excentricidad e (TC), la longitud del apogeo del Sol (λ_a) y el ángulo γ_0 para la época de referencia: 1 de marzo de 1473.

Año	t_1	t_2	t_3	$\lambda_1(^{\circ})$	$\lambda_2(^{\circ})$	$\lambda_3(^{\circ})$	e	$\lambda_a(^{\circ})$	$\gamma_0(^{\circ})$
1473	Mar 11	Jun 13	Sep 14	0,334167	90,822500	180,317500	0,037802	90,924262	257,387166
1473	Abr 12	Jul 14	Oct 15	31,576389	120,311111	211,164444	0,037859	90,961430	257,350672
1473	May 11	Ago 13	Nov 14	59,421944	149,097222	241,547778	0,037860	90,806738	257,504549
1473	Jun 12	Sep 14	Dic 13	89,872222	180,317500	271,201944	0,037793†	88,820814†	259,569562†
1474	Mar 10	Jun 13	Sep 14	359,109444	90,583333	180,078333	0,037808	90,674645	257,637076
1474	Abr 14	Jul 17	Oct 16	33,268889	122,937778	211,930556	0,037823	90,772480	257,538928
1474	May 16	Ago 18	Nov 17	63,954444	153,697222	244,370556	0,037877	90,540793	257,772292
1474	Jun 09	Sep 10	Dic 11	86,781667	176,144722	268,912778	0,037724†	82,885080†	265,717894†
1475	Mar 10	Jun 12	Sep 14	358,870556	89,394167	179,840278	0,037801	90,410396	257,901909
1475	Abr 08	Jul 10	Oct 09	27,225000	116,018611	204,660000	0,037879	90,637856	257,669517
1475	May 18	Ago 20	Nov 19	65,621944	155,398611	246,155000	0,037789	90,617183	257,687558
1475	Jun 21	Sep 22	Dic 23	97,947222	187,740000	280,950278	0,037725	90,684318	257,621895
1476	Mar 07	Jun 08	Sep 09	356,655556	86,329722	175,682222	0,037663	90,642106	257,677907
1476	Abr 11	Jul 12	Oct 13	30,904444	118,663611	209,429444	0,038245	90,795119	257,533421
1476	May 15	Ago 17	Nov 17	63,500833	153,232222	244,886944	0,037873	90,877331	257,506041
1476	Jun 13	Sep 12	Dic 13	91,081944	178,615278	271,480278	0,037817	90,950008	257,361248

† Valores que se apartan de la tendencia general

La ternas se seleccionaron así: en todos los casos el intervalo de días partió de siete (esto es, $t_2 - t_1 = t_3 - t_2 \geq 7$) y fue incrementándose de uno en uno hasta llegar al último día del mes en cuestión, de manera que se operó dentro de un mismo mes con la siguiente secuencia: 1-8-15, 1-9-17, 1-10-19, ..., 1-16-31, es decir que en los meses de 31 días se alcanzó a llegar hasta un intervalo espaciado por 15 días; a partir de ahí se operó con el segundo día del mes y la misma secuencia: 2-9-16, 2-10-18, ..., 2-16-30, en la que el máximo de intervalo es de 14 días; la siguiente secuencia se inició con el tercer día, de manera que 3-10-17, 3-11-19, ..., 3-17-31, y así sucesivamente. Puede verse fácilmente que para un mes de 31 días es posible generar 81 ternas; para uno de 30, 72 ternas, y para febrero en año no bisiesto, apenas 56. El haber fijado un intervalo mínimo de siete días se debe a que si se utilizaba un número inferior, la mayoría de los parámetros obtenidos arrojarían valores desproporcionalmente elevados, con lo que se perdería el sentido de lo que se perseguía. Ahora bien, vale aclarar que no fueron pocas las veces en que fue necesario eliminar secuencias de ternas. Por ejemplo, en el mes de marzo de 1473 se eliminaron

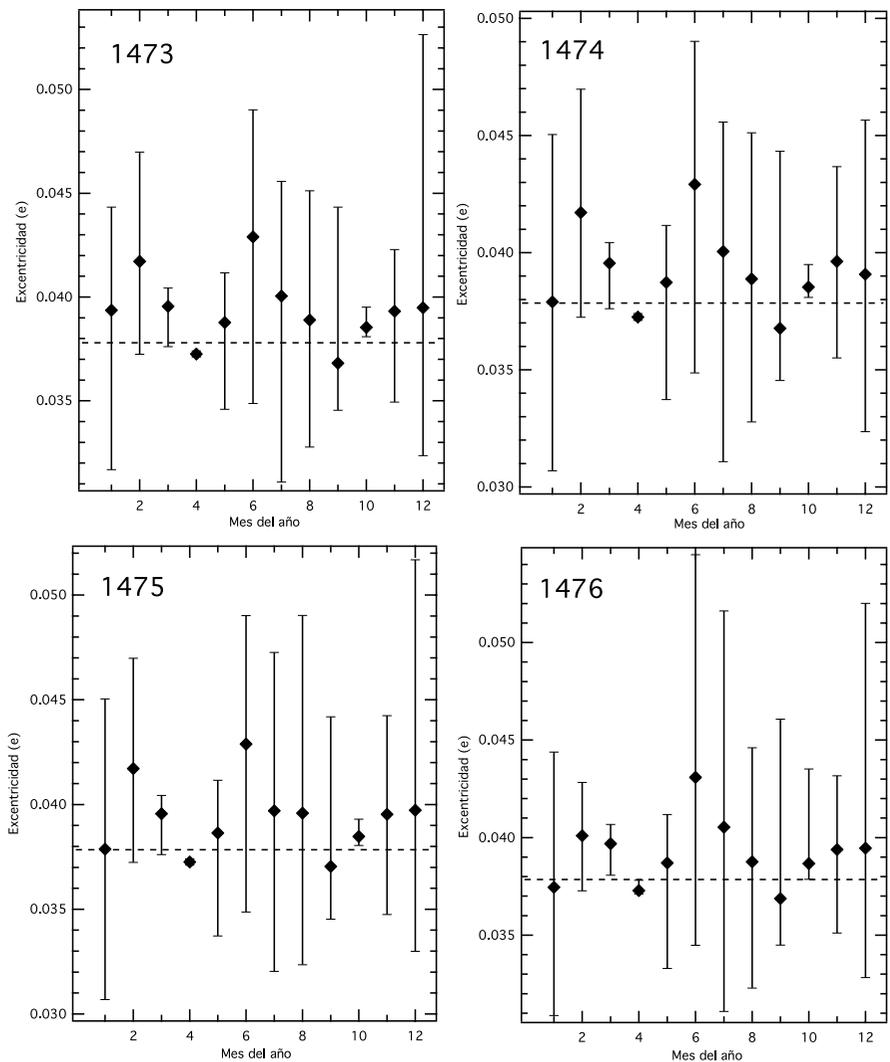


Figura 3. Rangos de valores de la excentricidad obtenidos con el segundo procedimiento (2) correspondientes a cada mes (1 es marzo, 2 abril, y así sucesivamente, ajustándonos a que Zacuto inicia el año el 1 de marzo). Se señala el promedio con la marca de diamante y el rango de los valores más extremos. La línea segmentada corresponde al valor hallado a través del primer procedimiento (1) (0,037840).

las ternas que contenían los días 29, 30 y 31, pues el código arrojaba errores matemáticos (amplitudes trigonométricas que excedían la unidad) o valores desproporcionados de los parámetros, lo que implicaba algún tipo de error numérico o de imprenta en los valores consignados en las tablas. Así mismo, en ese año se eliminaron las ternas que contenían los días entre paréntesis: junio (10) y enero (31). Lo mismo ocurrió con los años 1474: enero (11); 1475: junio (9), julio (25), septiembre (3, 17), octubre (13), noviembre (6), diciembre (25), y 1476: marzo (11, 16), abril (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7), mayo (5, 30, 31), septiembre (9), octubre (5), diciembre (19, 31), enero (3, 9, 10, 13, 18), febrero (11).

Hemos optado por presentar los resultados obtenidos a través del segundo procedimiento (2) en forma gráfica. Los datos de la excentricidad se consignan en la **figura 3**, los de la longitud del apogeo en la **figura 4** y los del ángulo γ_0 en la **figura 5**. En todas ellas se exhibe el promedio de los valores y los valores más extremos (mínimo y máximo). Como es evidente en las gráficas, se aprecia un notable grado de dispersión en cada uno de los parámetros, en particular de los angulares.

En lo que respecta a la excentricidad, se observa en general una notable dispersión de los valores, caracterizada por una tendencia a presentar mayores valores que el valor alfonsí (0,0378) propiamente dicho. La tendencia de los promedios en función del mes es prácticamente la misma para cada uno de los años, lo que refleja el hecho de que los

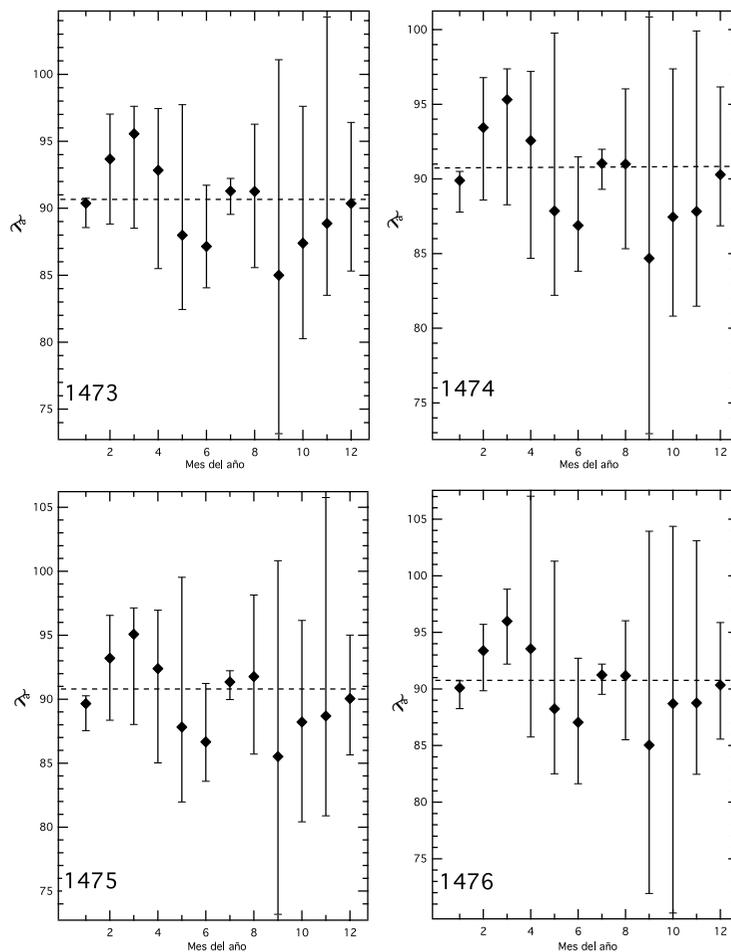


Figura 4. Rangos de valores de la longitud del apogeo (λ_a) obtenidos con el segundo procedimiento (2) correspondientes a cada mes (1 es marzo, 2 abril, y así sucesivamente). Se señala el promedio con la marca de diamante y el rango de los valores más extremos. La línea segmentada corresponde al valor hallado con el primer procedimiento (1) (90, 89748°).

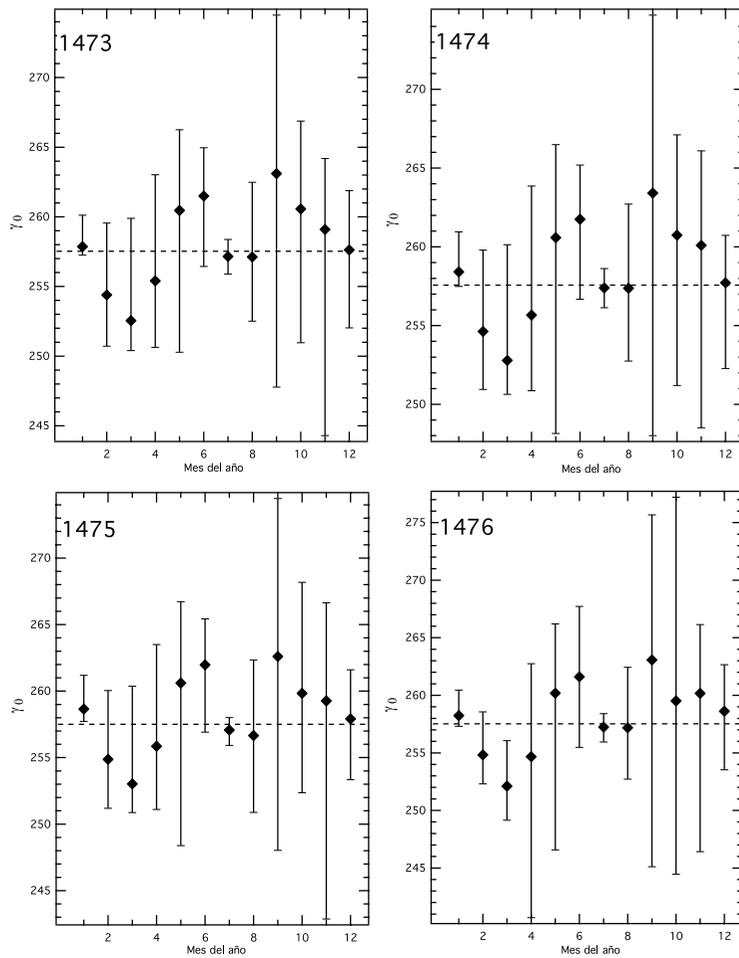


Figura 5. Rangos de los valores de la longitud del ángulo γ_0 (para el 1 de marzo de 1473) obtenidos a través del segundo procedimiento (2) correspondientes a cada mes (1 es marzo, 2 abril, y así sucesivamente). Se señala el promedio con la marca de diamante y el rango de los valores más extremos. La línea segmentada corresponde al valor hallado a través del primer procedimiento (1) (257, 41413°).

valores correspondientes a los años 1474 a 1476 son versiones ligeramente desplazadas de las del año 1473 (**van der Werf, 2017**). Es notable que en los meses de abril y agosto se presentan valores de la excentricidad cuyos promedios oscilan entre 0,040 y 0,043, significativamente elevados y curiosamente próximos al valor de la excentricidad solar determinado por Ptolomeo. Asimismo, llama especialmente la atención que los datos de la excentricidad para los meses de junio y diciembre experimentaron una dispersión muy pequeña (en particular para el primero). Los valores de e en el mes de junio estuvieron en torno a 0,0372 y de alrededor de 0,0385 en diciembre. De hecho, en casi todos los casos que contemplan esos dos meses en los cuatro años en cuestión, el rango de los valores de excentricidad no incluye el valor promedio alfonsí. Una posible explicación de la poca dispersión de estos valores remite a que tanto el apogeo solar, que se verifica alrededor del 13 de junio, como el perigeo, que ocurre alrededor del 12 de diciembre, es decir, cuando el ángulo μ (la ecuación solar) es nulo o próximo a cero, constituyen situaciones que facilitaban al calculista la obtención del ángulo γ a partir de θ , lo cual se hacía consultando una tabla y casi siempre mediante interpolaciones entre los valores existentes. Todo lo anterior podría indicar que, dependiendo del mes, los calculistas utilizaban distintas tablas con valores ligeramente diferentes de la excentricidad que permitían la determinación del ángulo γ .

En casi todos los casos, los valores angulares, esto es, λ_a y γ_0 , mostraron fuertes dispersiones alrededor de los valores promedio. Sin embargo, a diferencia de lo ocurrido con la excentricidad, la ordenación numérica de tales promedios se distribuyó de forma equidistante alrededor del valor alfonsí. En los dos casos, tales promedios no superaron los 6 grados por encima o por debajo del valor alfonsí, aunque se sabe que en ocasiones los valores más extremos pueden alcanzar diferencias hasta de 20 grados. Las más altas dispersiones se observaron en los meses de noviembre y enero. Infortunadamente, dada la dispersión generalizada de los datos angulares, no fue posible advertir una tendencia que sugiriera el uso de valores diferentes en los parámetros, como sí se evidenció en la excentricidad. En ambos casos, sin embargo, se observó que las menores dispersiones aparecían en los meses de marzo y septiembre, cuando se verifican los respectivos equinoccios ($\lambda \approx 0$, $\lambda \approx 180^\circ$).

Conclusiones

Se ha expuesto aquí un procedimiento geométrico sencillo que, a partir de tres valores de longitud solar correspondientes a tres valores cualesquiera de tiempo, permite determinar los parámetros orbitales que subyacen en la teoría del movimiento del Sol de Hiparco-Ptolomeo utilizados para construir las tablas solares de Abraham Zacuto contenidas en el *Almanach Perpetuum*. Se utilizaron dos procedimientos para seleccionar los datos de longitud solar: el primero cubría 3/4 partes de la órbita y permitió obtener parámetros orbitales consistentes con los valores utilizados para la construcción de las tablas alfonsíes; en el segundo se utilizaron datos separados por intervalos más cortos de tiempo que arrojaron resultados con una amplia dispersión. Con este segundo procedimiento, la poca dispersión de la excentricidad observada en los meses de junio y diciembre (con valores de 0,0372 y 0,0385, respectivamente), así como los valores relativamente elevados obtenidos en buena parte de los valores promedios de cada mes ($\geq 0,040$), sugieren la posibilidad del uso de varias tablas con valores distintos que relacionaban γ con θ , lo cual no es de extrañar, pues se han detectado inconsistencias no solo en las tablas alfonsíes sino también en las tablas toledanas, lo que indicaría que sus autores aceptaban material proveniente de una variedad de fuentes (Chabas & Goldstein, 2020). Por su baja dispersión (suficiente como para indicar claramente que no corresponden al valor alfonsí), los valores de excentricidad encontrados para los meses de junio y diciembre constituyen un importante resultado y evidencian el uso de valores definidos de excentricidad que no suelen ser asociados con los que comúnmente utilizaban los calculistas de la época o anteriores. Por otra parte, el hecho de que la distribución numérica de los promedios de los tres parámetros a lo largo de los meses sea prácticamente idéntica para los cuatro años en cuestión, es otra forma de reforzar la observación de van der Werf (2017) de que los valores de longitud de los años 1474 a 1476 no son otra cosa que valores ligeramente desplazados de los datos correspondientes a 1473.

El método aquí expuesto constituye una herramienta sencilla que permite comparar los valores de la longitud solar expuestos en las tablas elaboradas por distintos autores a lo largo del tiempo e inferir de manera unívoca, con base en los valores de los parámetros orbitales obtenidos, si una tabla solar en particular deriva de otras, para así obtener un conocimiento más preciso de cómo han sido utilizadas a lo largo de los años.

Agradecimientos

El autor desea expresar su sincero agradecimiento a dos árbitros anónimos por sus sugerencias para mejorar la redacción del texto. Esta investigación fue posible con el apoyo del proyecto de investigación identificado con el código Hermes 61960 de la Universidad Nacional de Colombia.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Albuquerque, L.** (1983). *Ciencia e experiência nos descobrimentos portugueses*. Instituto de Cultura e Língua Portuguesa-Ministério de Educação.
- Chabás, J. & Goldstein, B. R.** (2020). New approaches and parameters in the Parisian Alfonsine tables. *Suhayl*, 18, 51-68. <https://doi.org/10.1344/SUHAYL2020.18.3>
- Chabás, J. & Goldstein, B. R.** (2000). Astronomy in the Iberian Peninsula: Abraham Zacut and the transition from manuscript to print. *Transactions of the American Philosophical Society*, 90, parte 2.
- Dennefeld, M.** (2020). A history of the Magellanic Clouds and the European Exploration of the Southern Hemisphere. arXiv preprint arXiv:2009.04973.
- Goldstein, B. R.** (1998). Abraham Zacut and the medieval Hebrew astronomical tradition. *Journal for the History of Astronomy*, 29, 177-186. <https://doi.org/10.1177/002182869802900210>
- Marcondes de Souza, T. O.** (1957). A astronomia náutica na época dos descobrimentos marítimos. *Revista de Historia*, 20, 41-63.
- Pedersen, O.** (2010). *A survey of the Almagest*, Springer.
- Portilla, J. G.** (2023). Evolución de la teoría geocéntrica del movimiento del Sol y su uso en la primera circunnavegación del mundo. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 47, 678-692. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1940>
- Pouille, E.** (1969). Les conditions de la navigation astronomique au XV^e siècle. Separata de *Revista da Universidade de Coimbra*, 24, 1-20.
- Proverbio, E.** (1994). Astronomical and sailing tables from the second half of the 15th century to the middle of the 16th century. *Memorie della Società Astronomia Italiana*, 65, 469-496.
- Sánchez, A.** (2021). Making a Global Image of the World: Science, Cosmography and Navigation in Times of the First Circumnavigation of Earth, 1492-1522. *Culture & History Digital Journal*, 10, e014-e014. <https://doi.org/0000-0001-8323-634X>
- Sánchez, J. G.** (2023). *La astronomía en tiempos de Abraham Zacuto*. Ediciones Universidad de Salamanca.
- Swanick, L. A.** (2005). An analysis of navigational instruments in the age of exploration: 15th century to mid-17th century. Tesis de grado. Texas A&M University.
- Thomann, J.** (2022). Reverse Engineering Applied to Ephemerides: Analysis and Edition of the Arabic Ephemeris of 1326/27 ce (MS Cairo, Dār al-Kutub, miqāt 817). En: Husson, Matthieu; Montelle, Celmency; van Dalen, Benno. *Editing and Analysing Numerical Tables: Towards a Digital Information System for the History of Astral Sciences*. Turnhout: Brepols Publishers, 469-510. <https://doi.org/10.1484/M.PALS.5.125692>
- Toomer, G. J.** (1998). *Ptolomey's Almagest*, Princeton University Press.
- van Dalen, B.** (1993). Ancient and Mediaeval Astronomical Tables: mathematical structure and parameter values. Universiteit Utrecht, Faculteit Wiskunde en Informatica.
- van der Werf, S.** (2017). History and critical analysis of fifteenth and sixteenth century nautical tables. *Journal for the History of Astronomy*, 48, 207-232. <https://doi.org/10.1177/0021828617705244>
- Vieira, A.** (2005). Náutica e cartografia náutica na origem da ciência moderna. *Navigator*, 1, 53-68.
- Zacuto, A.** (1496). *Almanach perpetuum celestium motuum*, Leiria. <https://purl.pt/22001>

Artículo original

Notas sobre la ecología poblacional de *Pholidobolus montium* (Sauria: Gymnophthalmidae) en una localidad de Mulaló, Ecuador

Notes on the population ecology of *Pholidobolus montium* (Sauria: Gymnophthalmidae) in a locality of Mulaló, Ecuador

Salomón M. Ramírez-Jaramillo

Investigador independiente, Quito, Ecuador

Resumen

Durante seis meses de muestreo se evaluó una población de *Pholidobolus montium* en una localidad de Mulaló ubicada en un área intervenida con remanentes de vegetación nativa. Se establecieron dos puntos de muestreo: P1 y P2. En P1 se delimitó un área de 15 x 15 m y se colocaron piedras con tamaños entre 15 x 15 cm y 40 x 30 cm. Se empleó el método de captura, fotoidentificación y recaptura y se estimó el tamaño de la población durante el periodo de muestreo. En P2 se delimitó un área de 10 x 10 m donde se realizaron capturas únicas durante dos días y se calculó la abundancia total del sitio. En P1 se hicieron 30 capturas-recapturas de 27 individuos únicos para una estimación de 124 individuos, es decir, una densidad poblacional de 1,8 individuos por m². En P2 se hicieron 12 capturas únicas, lo que arrojó una densidad poblacional de 1 individuo por 8,3 m². En los dos sitios de muestreo, la longitud rostro cloaca (LRC) fue entre 2,6 y 9,1 cm. La cola intacta registra el mayor número de individuos en ambos sitios de muestreo, en P2, el porcentaje de colas regenerada y ausente fue mayor que en P1, considerando así que P2 está más expuesto a depredadores. En la comunidad de saurios andinos esta especie presenta simpatria con *Pholidobolus affinis* y *Stenocercus cadlei*.

Palabras clave: Educación ambiental; Interacciones; Lagartija; Evaluación poblacional; Uso de percha.

Abstract

During six months of sampling, a *Pholidobolus montium* population was evaluated in the locality of Mulaló, located in a disturbed area with remnants of native vegetation. Two sampling sites were established: P1 and P2. In P1, an area of 15 x 15 m was set, where stones between 15 x 15 cm and 40 x 30 cm were placed and the capture-photo-identification-recapture method was used to estimate the population size during the six months of sampling. In P2, an area of 10 x 10 m was delimited, single captures were made during two days of sampling, and the total abundance of the site was calculated. In P1, 30 capture-recaptures corresponded to 27 unique individuals with 124 total individuals for a population density of 1.8 individuals/m². In P2, there were 12 unique captures and a population density of 1 individual/8.3m² was calculated. Individuals' snout-vent length (SVL) ranged from 2.6 to 9.1 cm. As for the condition of the tails, intact ones prevailed in the two sites; a higher percentage of regenerated and absent tails was present in P2 compared to P1, as it is more exposed to predators. This Andean saurian species shows sympatry with *Pholidobolus affinis* and *Stenocercus cadlei*.

Keywords: Environmental education; Interactions; Lizard; Perch use; Population size.

Introducción

La lagartija de jardines de Quito, *Pholidobolus montium* (Peters 1862), es un saurio con distribución restringida y endemismo regional que se encuentra desde la provincia de Cotopaxi en Ecuador hasta Ipiales, en el departamento colombiano de Nariño (Torres-Carvajal & Mafla-Endara, 2013; Cisneros-Heredia, 2015), entre los 1.690 y los 4.100 m

Citación: Ramírez-Jaramillo SM. Notas sobre la ecología poblacional de *Pholidobolus montium* (Sauria: Gymnophthalmidae) en una localidad de Mulaló, Ecuador. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(189):797-806, octubre-diciembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2658>

Editor: Martha Patricia Ramírez Pinilla

Correspondencia:

Salomón M. Ramírez-Jaramillo;
sz.biosupay@gmail.com

Recibido: 30 de mayo de 2024

Aceptado: 29 de septiembre de 2024

Publicado en línea: 28 de octubre de 2024



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

s.n.m. (Mármol-Guijarro *et al.*, 2022). Es de comportamiento críptico y se asocia a sitios pedregosos donde ubica refugios y nidos de reproducción (Montanucci, 1973; Ramírez-Jaramillo, 2016). Su hábito semifosorial ha limitado su estudio, y aunque hay aportes recientes sobre su biología, ecología e historia natural, son pocos los registros relativos al tamaño de sus poblaciones (Goldberg, 2009; Poma-Soto *et al.*, 2021; Ramírez-Jaramillo, 2016, 2022). Los estudios poblacionales en lagartijas andinas terrestres son importantes, ya que presentan diferencia en sus abundancias comparadas con las lagartijas terrestres tropicales, lo cual explicaría que existan más estudios en lagartijas de tierras bajas (Méndez-Galeano, 2020).

El monitoreo biológico es una herramienta eficaz en los estudios de ecología, conservación y manejo de la vida silvestre, ya que así se detectan los cambios ocurridos en las poblaciones, los ensambles, las comunidades o los gremios, lo que resulta clave para la comprensión de sus dinámicas temporales y espaciales y las causas bióticas, abióticas, naturales o de origen antrópico que las explican (Moreno, 2019).

El presente estudio responde a un enfoque de ciencia participativa que se empleó como herramienta de educación ambiental y monitoreo biológico entre 2013 y 2014. En él participaron niños y jóvenes estudiantes entre los 8 y los 17 años, quienes aplicaron la metodología y recolectaron los datos en campo como parte del proceso de interacción y aprendizaje en la naturaleza. El objetivo fue evaluar la población empleando metodologías distintas en dos tipos de microhábitat, así como determinar y analizar la condición de la cola y el tamaño corporal de los individuos mediante evaluaciones temporales en un área agropecuaria cercana a Mulaló.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la provincia de Cotopaxi, cantón Latacunga, parroquia de Mulaló (78°35 '34,9" W y 0°45 '58,4" S), situada a 3.016 metros de altitud dentro de un ecosistema de arbustal siempreverde montano en el norte de los Andes (MAE, 2013) (Figura S1A, <https://www.raccefn.co/index.php/raccefn/article/view/2658/4463>). La cobertura vegetal natural de la zona ha sido reemplazada por cultivos de brócoli, rosas y pasto para ganado, incluidas pequeñas plantaciones de *Eucalyptus globulus* (eucalipto), combinadas con *Cipreus* sp. (ciprés) y *Pinus radiata* (pino), empleadas para limitar propiedades o usos del suelo. Los remanentes de sotobosque son pocos y presentan vegetación xerofítica, con algunas hierbas y pequeños arbustos que se asocian a los cipreses, eucaliptos y pinos (Valencia *et al.*, 1999).

La temperatura promedio mensual es de 8,4 °C; la época lluviosa va de octubre a junio, siendo los meses más lluviosos diciembre y abril, en tanto que la época seca va de julio a septiembre, siendo agosto el mes más seco (INAMHI, 2014).

Trabajo de campo

El estudio formó parte de un programa de educación ambiental en la escuela primaria y secundaria; los animales manipulados no fueron sacrificados y no se hicieron recolecciones, solamente fueron medidos, fotografiados y devueltos a su hábitat. Se aplicó este enfoque ético con el fin de promover el derecho de la vida silvestre entre los estudiantes.

Para evaluar la población de *Pholidobolus montium* en esta localidad, se hicieron dos evaluaciones con la técnica de muestreo por parcelas (Sánchez, 2011) a las que se denominó cuadrantes (más pequeños que una parcela) que se adaptaron a dos tipos de microhábitat. En el primero, la población se determinó a partir de 12 muestreos en seis meses, estimándose el número de individuos con el método de captura, marca y recaptura. Siguiendo el estudio de Ramírez-Jaramillo (2016), en este sitio se adecuó el microhábitat como lugar de refugio y reproducción de *P. montium* y se hizo el primer muestreo (P1) para determinar los cambios en el número de individuos y nidos registrado por Ramírez-Jaramillo (2016). El hábitat del sitio consiste en vegetación herbácea (<50 cm de alto) rodeada de árboles de pino (*Pinus* sp.), eucalipto (*Eucalyptus* sp.) y ciprés (*Cipreus* sp.). A comienzos de septiembre de 2013

se delimitó un cuadrante de 15 x 15 metros y allí se colocaron 24 piedras de tamaños entre 15 x 15 cm y 40 x 30 cm en vegetación herbácea de <30 cm de alto; las piedras se colocaron a distancias entre los 50 y los 100 cm y se dispusieron aleatoriamente dentro del cuadrante. Entre enero y junio de 2014 tres observadores efectuaron 12 muestreos realizados dos veces por mes durante 25 minutos/persona, acumulando así un total de 75 minutos/persona de esfuerzo muestral (**Figura S1B**, <https://www.raccefn.co/index.php/raccefn/article/view/2658/4463>). En seis meses de estudio se acumularon cinco horas/persona de muestreo, es decir, 15 horas/persona de esfuerzo total de muestreo. Los individuos capturados fueron fotografiados en el vientre utilizando las manchas naturales como método de marcaje para la foto-identificación (**Ramírez & Rodríguez, 2011; Ramírez-Jaramillo, 2017; Pérez-Lara & Ramírez-Jaramillo, 2021**); se empleó una cámara fotográfica Canon SX50HS. Los individuos se ubicaron en un terrario para su evaluación y se los liberó al día siguiente en el mismo sitio donde habían sido encontrados. En este sitio de muestreo se hizo el monitoreo de puestas de huevos (**Ramírez-Jaramillo, 2016**), así como la inspección de las piedras colocadas en 2013.

En el segundo microhábitat, la población se determinó con dos muestreos casi seguidos, cuantificando la abundancia poblacional mediante la captura. Este segundo sitio de muestreo (P2) se ubicó a 300 metros de distancia del primero; allí el hábitat se caracteriza por tener un suelo de pequeñas piedras con vegetación herbácea (<40 cm de alto), rodeada de pocos arbustos, asentamientos humanos y pastizales (**Figura S1C**, <https://www.raccefn.co/index.php/raccefn/article/view/2658/4463>). En abril de 2014 se delimitó un cuadrante de 10 x 10 metros y se hicieron dos muestreos; el 30 de abril y el 2 de mayo se hicieron búsquedas activas, se removieron las piedras y cuatro observadores hicieron capturas durante 25 minutos/persona (100 minutos/persona de esfuerzo muestral diario) para acumular 50 minutos/persona de muestreo, es decir, 200 minutos/persona de esfuerzo muestral. Los individuos capturados el 30 de abril fueron colocados en un terrario adecuado, con el fin de evitar el recuento, y se los liberó el 2 de mayo en el mismo sitio después del segundo muestreo.

Dado que las evaluaciones poblacionales se hicieron con fines de educación ambiental, los muestreos carecieron de una estandarización metodológica. Los muestreos en P1 estuvieron a cargo de los jóvenes y en P2 los hicieron los niños. En los dos microhábitats se tomaron dos medidas morfológicas de los individuos capturados: longitud rostro cloaca (LRC) y longitud de la cola (LC), que luego se compararon. Para describir la condición de las colas se establecieron tres categorías (**Domínguez-López et al., 2014; Ramírez-Jaramillo, 2022**): 1) intacta, es decir, cola completa sin mutilación o regeneración; 2) ausente, o sea, la cola cortada en algún segmento o con menos del 40 % de la longitud normal, y 3) regenerada, cuando la cola aparece larga y regenerada.

Análisis de datos

La información obtenida en campo sobre las capturas y recapturas de *P. montium* se tabuló en una matriz con los siguientes datos ecológicos: número de individuos (N), número de huevos (NH), LRC, LC y condición de la cola (intacta, ausente o regenerada).

La foto-identificación se hizo de forma manual (**Ramírez & Rodríguez, 2011; Ramírez-Jaramillo, 2017; Pérez-Lara & Ramírez-Jaramillo, 2021**) cumpliendo con los siguientes preceptos: 1) muestras representativas de la población, 2) manchas permanentes y correctamente registradas, 3) distribución aleatoria de los animales liberados en la población, y 4) manchas que no afectan la probabilidad de recaptura.

Assumiendo que la población era cerrada durante el periodo del estudio, se empleó el estimador de **Schumacher y Eschmeyer (1943)**, considerado apropiado para estimar tamaños poblacionales basados en recapturas de varias muestras (**Krebs, 1989; Donnelly & Guyer, 1994**), y cuya fórmula matemática es:

$$N = \frac{\sum t (Ct * Mt^2)}{\sum (Rt * Mt)}$$

donde N corresponde al tamaño poblacional, Ct al número de capturas, Rt al número de recapturas, y Mt al número de capturas con marcas realizadas antes del muestreo.

Para estimar la población, se agruparon las 12 muestras en seis meses. El tamaño corporal de las muestras se analizó estadísticamente mediante la prueba de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$); en ambos casos se utilizó el programa estadístico BioEstat 5.0 (Ayres *et al.*, 2007). La densidad bruta (denominada densidad poblacional) se calculó de acuerdo con el área de muestreo y el número total de individuos registrados en cada sitio.

Resultados

Estimación poblacional

Durante enero y junio de 2014, en el cuadrante de estudio P1, se registraron 30 individuos mediante captura-recaptura, lo que corresponde a 27 individuos con registros de única captura (**Figura S2**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2658/4463>) y tres de recaptura. Se registró una densidad poblacional de 0,12 individuos/m² (1 individuo/8,3 m²). Mediante el método de Schumacher & Eschmeyer (1943), la población se estimó en 124 individuos (**Tabla 1**), con una densidad poblacional calculada a partir de esta estimación poblacional de 1,8 individuos/m².

Fluctuación poblacional

Durante los seis meses de estudio se registraron entre cuatro y seis individuos en el cuadrante P1. Los meses con mayor abundancia de individuos fueron febrero y junio y los de menor abundancia, marzo y mayo. El número de huevos puestos varió entre seis y 16, con más abundancia en febrero y menos en mayo (**Figura 1**).

Abundancia poblacional

En el cuadrante P2, durante los dos días de muestreo el número de individuos fue de 12 (**Figura S3**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2658/4463>); se capturaron seis individuos en el primer día (50 % de los registros) y en el segundo, otros seis. La densidad poblacional fue de 0,12 individuos/m² (1 individuo/8,3 m²).

Tamaño corporal

La LRC en los 30 individuos capturados en P1 varió entre 26 y 53 mm y la LC entre 22,5 y 90,5 mm. En P2 se registraron 12 individuos con LRC entre 33 y 55 mm y una LC entre 29 y 91 mm (**Figura 2**). La LRC presentó una diferencia significativa entre las muestras de P1 y P2 ($H=6,434$; $p=0,01$), en tanto que en la LC no hubo diferencias significativas ($H=0,325$; $p=0,568$).

Tabla 1. Estimación del tamaño poblacional de *Pholidobolus montium* en P1, utilizando el método de Schumacher-Eschmeyer

P1	No Muestra	No Capturas	No Recapturas	No Marcas antes del muestreo
Ene	1	5	0	0
Feb	2	6	0	5
Mar	3	4	1	11
Abr	4	5	1	14
May	5	4	0	18
Jun	6	6	1	22
Total	6	30	3	70
Tamaño poblacional	124 individuos			
Varianza	0,05			
Error estándar	11,56			

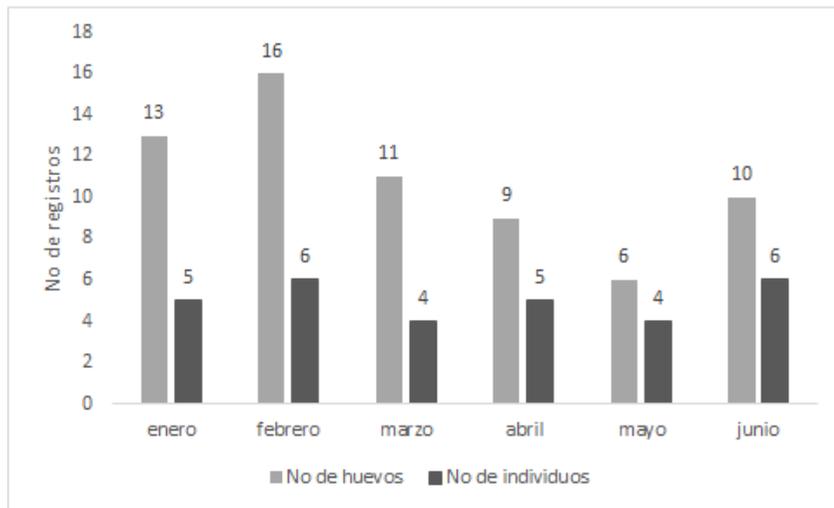


Figura 1. Fluctuación poblacional y de puestas de huevos de *Pholidobolus montium* durante seis meses de muestreo entre enero y junio de 2014 en P1

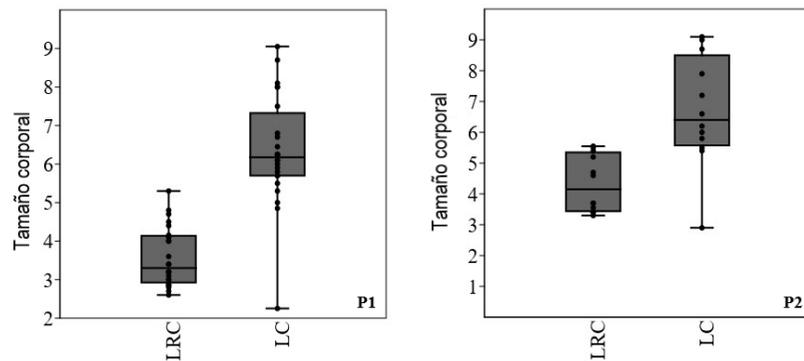


Figura 2. Tamaño corporal e intervalos de la LRC y LC (en mm) de *Pholidobolus montium* en dos cuadrantes de muestreo. Líneas verticales y terminadas en T: rango de máximos y mínimos. Punto negro central dentro de la caja gris: media aritmética. Caja gris oscura: desviación estándar de límites. Línea horizontal dentro de la caja gris: mediana. Demás puntos negros: cuartiles, error estándar y varianza

Condición de la cola

En los seis meses de estudio la condición de la cola en los dos cuadrantes fue la siguiente: cola ausente en el 7,1 % de los casos; cola regenerada en el 26,1 %, y cola intacta en el 66,6 %. En P1 la categoría ausente se presentó en el 6,6 % de los casos; la regenerada en el 23,3 %, y la intacta en alrededor del 70 %. En P2 la categoría ausente se presentó en el 8,3 % de los casos; la regenerada en el 33,3 %, y la intacta en el 58,3 % (**Tabla 2**).

Relaciones ecológicas

En P1 el microhábitat que se formó entre las piedras y la vegetación herbácea tras cuatro meses fue similar a lo registrado por **Ramírez-Jaramillo** (2016), con un ambiente propicio para refugiarse, alimentarse y hacer nidos. Entre la fauna edáfica se registraron ciempiés, hormigas, escarabajos, babosas, siete cueros, planarias y ranas (*Pristimantis unistrigatus*); en los alrededores se presentó *Stenocercus cadlei*, y cerca de una acequia, subiendo hacia los arbustos, *Gastrotheca* sp. En una ocasión se observó a un individuo adulto alimentándose de un *Tenebrio* sp., mientras que dos juveniles se vieron cerca de

hormigueros. Como depredador potencial directo, se observaron en las cercanías individuos de *Falco femoralis* perchados en busca de presas, similar a lo registrado en la dieta de *F. sparverius* por Ramírez-Jaramillo *et al.*, 2018. También se observó *Didelphis pernigra*.

El 17 de abril de 2014 se registró en P1 un individuo adulto de *P. affinis* (LRC=43 mm; LC= 101 mm), con la cola intacta (**Figura 3**), siendo el único registrado durante los seis meses de muestreo. Esto ocurrió en la misma área de estudio donde Ramírez-Jaramillo (2016) reportó un individuo (LRC= 5,4 y LC= 4,1cm) a lo largo de 13 meses. Este hecho corrobora que la simpatria entre las dos especies congéneres se ha mantenido en el tiempo (Montanucci, 1973; Hillis & Simmons, 1986; Ramírez-Jaramillo, 2016), aunque en esta zona de distribución limítrofe sus poblaciones son mucho menores que las de *P. montium*.

Asimismo, se constató la simpatria con *S. cadlei*, especie de la que se registraron dos individuos durante el estudio (un individuo muerto a 100 m del área de muestreo P1 y una observación visual a 150 m del área de muestreo P2).

Discusión

Las técnicas de muestreo y los análisis fueron distintos en cada microhábitat de estudio, pese a que los dos sitios se caracterizan por tener intervenciones antrópicas. En P1 se creó primero un microhábitat adecuado (Ramírez-Jaramillo, 2016) donde hubo 30 registros mediante captura-recaptura, correspondientes a 27 individuos únicos en un área de 225 m², con 24 piedras dispuestas sobre la vegetación, en tanto que durante 13 meses de estudio en un área de 2 m², con dos piedras dispuestas sobre la vegetación, Ramírez-Jaramillo (2016) registró 17 individuos (que no fueron marcados). Es notable el incremento de registros tras la colocación de las piedras, aunque también en el área de muestreo se reporta un aumento. Dado que el microhábitat que se forma entre las piedras y la vegetación herbácea es adecuado para el desarrollo de nidos, se podría pensar que su aumento permitiría un mayor número de avistamientos, sin embargo, aunque estos se incrementaron, no duplicaron lo registrado en 2013. Puede decirse, entonces, que la disposición de las piedras parece no

Tabla 2. Registro de la condición de la cola de *Pholidobolus montium* en dos cuadrantes de muestreo

Condición de la cola	P1	P2	Total
Intacta	21	7	28
Ausente	2	1	3
Regenerada	7	4	11
Total	30	12	42



Figura 3. Individuo de *Pholidobolus affinis* registrado durante el estudio. **A.** Vista frontolateral. **B.** Detalle de la presencia y ausencia de escamas prefrontales, presentes en *Pholidobolus affinis*. **C.** Patrón de manchas ventrales

tener mayor influencia en el número de individuos registrados, por lo menos no en el momento del estudio, aunque es posible que las hembras identifiquen estos lugares como adecuados y los utilicen en el futuro.

En otro sentido, la escasa recaptura sugiere que los individuos que visitan las piedras son diferentes y que están bien distribuidos en el área, ocupando una mayor área calculada (1 individuo/8,3 m², que puede ser un valor cercano o que sirva como referencia), y que no existe territorialismo en la especie. La asociación de individuos con las piedras podría deberse a una preferencia de uso según el género (**Méndez-Galeano**, 2020), ya que las hembras son las encargadas de encontrar el lugar adecuado para que se desarrollen los huevos que depositan.

La dinámica poblacional fue mayor en febrero, seguido de enero, mientras que en mayo hubo menos registros. En contraste, en el estudio de **Ramírez-Jaramillo** (2016) hubo una mayor abundancia en septiembre, seguido de enero y abril, mientras que en mayo esta fue menor, similar a lo aquí registrado.

En P2 se registraron 12 individuos en dos días de muestreo en un microhábitat predominantemente formado por pequeñas piedras y vegetación por debajo de los 40 cm, lo que puede incentivar sus visitas, especialmente en días soleados, cuando salen por motivos de termorregulación. **Poma-Soto et al.** (2021), aunque no reportan el área de muestreo o tiempo de esfuerzo, registraron 16 individuos en agosto y 19 en septiembre en la localidad de Calacalí, más al norte de la del presente estudio.

En este estudio se registraron 27 individuos en P1 y 12 individuos en P2, resultados que difieren de los obtenidos por **Méndez Galeano** (2020), autor que reportó una menor abundancia de gimnoftálmidos de alta montaña que de tierras bajas. Los resultados de este estudio se acercaron más a la abundancia de los gimnoftálmidos de tierras bajas.

En los dos sitios de estudio la densidad poblacional a partir de la abundancia poblacional fue igual (1 individuo/8,3 m²). En contraste, la estimación poblacional en P1 fue de 1,8 individuos/m², valor que constituye una sobreestimación, al igual que los 80.000 ind/Ha reportados por **Ramírez-Jaramillo** (2016).

El número de huevos en los nidos varió entre cuatro y seis de enero a junio, siendo enero el mes con el primer registro de puestas. En los siguientes meses hubo tanto incremento como reducción de las puestas, debido a la presencia de nidos grupales (**Medina-Rangel**, 2013; **Ramírez-Jaramillo**, 2016) en los que los huevos eclosionan en 216 días (**Bustard**, 1964). Sin embargo, la variación mensual en el número de huevos fue pequeña, así como el número de huevos registrados cada mes. **Ramírez-Jaramillo** (2016) encontró una variación entre cero y 34 huevos durante 13 meses.

Los resultados reiteran la idea de que las hembras pueden reproducirse durante todo el año (**Ramírez-Jaramillo**, 2016), ya que se registraron hembras grávidas en los meses de marzo, abril y mayo, así como fluctuaciones cortas en el número de huevos registrados a partir de enero de 2014.

En cuanto a la diferencia en la LRC, en P2 se registraron individuos más grandes, pero también una mayor incidencia de depredadores. En comparación con el estudio de **Ramírez-Jaramillo** (2016), se encontró que en P1 hubo una diferencia significativa en las poblaciones temporales ($H=10,791$; $p=0,001$), mientras que en P2 esta no se dio ($H=1,279$; $p=0,258$), por lo que su tamaño fue similar en los dos estudios. Es decir, en este estudio, se registraron en P1 individuos más pequeños que los registrados anteriormente. En contraste, su LC no presentó diferencias.

La frecuencia de la cola intacta en los individuos en ambos sitios de muestreo fue similar a lo reportado por **Ramírez-Jaramillo** (2022). Sin embargo, se observó que en P2 se registraron más los individuos con cola ausente y regenerada, lo que sugiere una mayor exposición a depredadores en este tipo de microhábitat (**Medina-Rangel & Cárdenas-Arévalo**, 2015). Por el contrario, P1 al parecer ofreció un mayor resguardo frente a los depredadores, ya que durante la manipulación de los individuos no se observaron anomalías o malformaciones.

En cuanto a los saurios simpátricos, durante el monitoreo se avistaron las especies *P. affinis* y *S. cadlei*, y, aunque sus avistamientos fueron escasos, se puede mencionar que en este sitio la población de *P. montium* es mayor que las de *S. cadlei* y *P. affinis*.

El individuo registrado de *P. affinis* presenta dos escamas prefrontales, característica compartida con *P. prefrontalis*. Sin embargo, la presencia de dos escamas supraoculares es una característica de *P. prefrontalis* y *P. montium*, así como una variación en la morfología de *P. affinis* (Montanucci, 1973), lo que puede sugerir un proceso de hibridización o especiación, ya que las lagartijas *Pholidobolus* presentan diversidad y variación entre algunas poblaciones (Parra *et al.*, 2020).

El presente estudio se restringió a dos cuadrantes, con dos tipos de muestreo y tuvo poca representatividad temporal, sin embargo, los datos obtenidos son importantes. La recopilación de datos y la manipulación de las lagartijas por parte de los niños y jóvenes fueron exitosas y una tarea emocionante para ellos. Siempre que el interés y la falta de miedo estén presentes, es posible trabajar en este tipo de proyectos, naturalmente con la planificación necesaria para su ejecución.

Conclusiones

Este estudio y los registros publicados en 2016 aportan importantes insumos para diseñar e implementar programas de educación ambiental y monitoreo de esta lagartija andina en áreas urbanas o rurales, incluidos su comportamiento y tolerancia ante determinados sitios sujetos a la antropización.

En lo relativo al monitoreo, se destaca la colocación de piedras, ya que en el momento del muestreo con los chicos es fácil registrar la especie en su microhábitat simplemente alzando la piedra, puesto que, al ser una especie semifosorial, es muy escurridiza. La disposición de rocas para el monitoreo de esta especie podría facilitar la exploración de áreas de más de 15 x 15 m.

Aunque las técnicas y el tiempo de esfuerzo de muestreo fueron diferentes en cada sitio, la densidad poblacional con base en la abundancia poblacional fue similar (1 individuo/8,3 m²), por lo que puede ser un valor aproximado mínimo del área de vida calculado de un individuo. La comunidad de los saurios andinos en esta localidad presenta tres especies, los congéneres *P. affinis* (con 3 %), *P. montium* y *S. cadlei*.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2658/4463>

Agradecimientos

A la Fundación Sierra Flor por abrirme las puertas y darme la oportunidad de ser parte de su proyecto de educación no tradicional. Gracias a Jacky Barreiro y Viviana Tantardini por darme la apertura y motivación para realizar mis prácticas de ecología en campo y enseñar a la comunidad, a Miguel Pérez, Alicia González, y Joan Rovira, entre otros, por su participación en este aprendizaje compartido y por su ayuda durante mi estancia. A los niños y jóvenes que me ayudaron y acompañaron durante las clases impartidas en el campus entre el 2012 y el 2014. A toda mi familia por su constante apoyo durante estos años. A Santiago Villamarín por su ayuda en la identificación de tenebrios. A los revisores anónimos por sus acertadas sugerencias.

Contribución de los autores

Salomón Ramírez desarrolló la metodología, ayudó en la toma de datos, compiló y analizó la información que se levantó durante las horas de cátedra impartidas durante 2012-2014. Los niños y jóvenes entre ocho y 17 años de la UESF hicieron las capturas de los individuos y la toma de datos durante 2014.

Conflicto de Intereses

El autor declara que no tiene conflicto de intereses.

Referencias

- Ayres, M., Ayres, M. Jr., Ayres, D. L., Santos, A. A. (2007). Bio Estat 5.0: aplicações estatística nas áreas das ciências biológicas e médicas. Sociedade Civil Mamirauá. CD-ROM. <https://mamiraua.org.br/downloads/programas/>
- Bustard, R. (1964). Egg laying and incubation of the striped mountain lizard *Pholidobolus montium* (Teiidae) with notes on an incubator. *British Journal of Herpetology*, 3, 163-164. <https://www.thebhs.org/publications/the-herpetological-journal/volume-1-number-3-december-1986/1132-volume-1-number-3-december-1986-full-issue>
- Cisneros-Heredia, D. F. (2015). *Pholidobolus montium*. IUCN Red List of Threatened Species Versión 2023-1. <https://www.iucnredlist.org>
- Donnelly, M. A. & Guyer, C. (1994). Estimating population size. En: Heyer, W.R., M.A. Donnelly, R.W. McDiarmid, L.A.C. Hayek y M.S. Foster (Eds). *Measuring and Monitoring Biological Diversity, standard methods for Amphibians* (183-205). Smithsonian Institution Press.
- Goldberg, S. R. (2009). Note on reproduction of *Pholidobolus* (Squamata: Gymnophthalmidae) from Ecuador. *Bulletin of the Chicago Herpetological Society*, 44, 167-168. <https://chicagoherp.org/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2019/12/4411.pdf>
- Hillis, D. M. & Simmons, J. E. (1986). Dynamic change of a zone of parapatry between two species of *Pholidobolus* (Sauria: Gymnophthalmidae). *Journal of Herpetology*, 20, 85-87. <https://doi.org/10.2307/1564130>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). (2014). Anuario Metereológico Nro. 51-2011.
- Krebs, C. J. (1989). *Ecological methodology*. Harper and Row Publishers Inc.
- Mármol-Guijarro, A., Maffa-Endara, P., Rodríguez-Guerra, A. (2022). *Pholidobolus montium*. Reptiles del Ecuador. Version 2022.0. Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <https://bioweb.bio.com>
- Medina-Rangel, G. F. (2013). *Anadia bogotensis* (Bogota *Anadia* lizard) nesting. *Herpetological Review*, 44, 312-313. https://www.researchgate.net/publication/251573750_Anadia_bogotensis-Nesting
- Medina-Rangel, G. F. & Cárdenas-Arévalo, G. (2015). Relaciones espaciales y alimenticias del ensamblaje de reptiles del complejo cenagoso de Zapatosa, departamento del Cesar (Colombia). *Papéis Avulsos de Zoologia*, 55, 143-165. <http://dx.doi.org/10.1590/0031-1049.2015.55.10>
- Méndez-Galeano, M. Á. (2020). Use of microhabitat, shelter preference, activity patterns, population structure and sexual dimorphism of the Andean lizard *Riama striata* (Squamata: Gymnophthalmidae) in a high-altitude urban area of Colombia. *Cuadernos de Herpetología*, 34, 43-51. [https://doi.org/10.31017/CdH.2020.\(2019-022\)](https://doi.org/10.31017/CdH.2020.(2019-022))
- Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE). (2013). *Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental*. Subsecretaría de Patrimonio Natural.
- Montanucci, R. R. (1973). Systematics and evolution of the Andean lizard genus *Pholidobolus* (Sauria: Teiidae). *University of Kansas, Museum of Natural History Miscellaneous Publication*, 59, 1-52.
- Moreno, C. (Edt) (2019). *Biodiversidad en un mundo cambiante*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Pérez-Lara, M. B. & Ramírez-Jaramillo, S. M. (2021). Aportes al conocimiento de la ecología de *Atelopus balios* (Anura: Bufonidae) en el Naranjal, Ecuador. *Revista Colombiana Ciencia Animal Recia*, 13, e774. <https://doi.org/10.24188/recia.v13.n1.2021.774>
- Parra, V., Nunes, P. M. S., Torres-Carvajal, O. (2020). Systematics of *Pholidobolus* lizards (Squamata, Gymnophthalmidae) from southern Ecuador, with descriptions of four new species. *Zookeys*, 954, 109-156. <https://doi.org/10.3897/zookeys.954.50667>
- Poma-Soto, F., Narváez, A. E., Romero-Carvajal, A. (2021). Visual signaling in the semi-fossorial lizard *Pholidobolus montium* (Gymnophthalmidae). *Animals*, 11, 3022. <https://doi.org/10.3390/ani11113022>
- Ramírez, S. & Rodríguez, M. (2011). Estado poblacional y relaciones ecológicas de *Gastrotheca riobambae* (Anura: Hemiphractidae) en dos localidades del Volcán Pasochoa. Prov. Pichincha. Ecuador. *Serie Zoológica*, 10, 69-97. <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-serie-zoologica/article/view/1449>

- Ramírez-Jaramillo, S. M.** (2016). Nidos de *Pholidobolus montium* en un área intervenida de Mulaló, Cotopaxi – Ecuador. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas*, 37, 29-33. <https://doi.org/10.26807/remcb.v37i1.10>
- Ramírez-Jaramillo, S. M.** (2017). Abundancia poblacional y notas de historia natural de *Gastrotheca riobambae* (Anura: Hemiphractidae) en un valle de Quito, Ecuador. *Boletín de la Asociación Herpetológica Española*, 28, 159-163. [http://www.herpetologica.org/BAHE/BAHE28\(1\)_\[240\]_06_Cons02.pdf](http://www.herpetologica.org/BAHE/BAHE28(1)_[240]_06_Cons02.pdf)
- Ramírez-Jaramillo, S. M., Allan-Miranda, N. A., Salazar, M., Jácome-Chiriboga, N. B., Robayo, J., Marçayata, A., Reyes-Puig, J. P., Yáñez-Muñoz, M. H.** (2018). Revisión de las presas vertebradas consumidas por *Falco sparverius* en América del sur y nuevos registros para Ecuador, *Hornero*, 33, 51-57. <https://doi.org/10.56178/eh.v33i1.495>
- Ramírez-Jaramillo, S. M.** (2022). Condición de la cola en dos saurios endémicos y el primer registro de colas bifurcadas en *Stenocercus guentheri* (Sauria: Tropicuridae), Andes norte de Ecuador. *Caldasia*, 44, 200-202. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v44n1.77023>
- Sánchez, O.** (2011). Evaluación y monitoreo de poblaciones silvestres de reptiles. En: Sánchez, O., Zamorano, P., Peters, E. & Moya, H. (eds). *Temas sobre conservación de vertebrados silvestres en México* (83-120). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat).
- Schumacher, F. X. & Eschmeyer, R. W.** (1943). The estimate of fish population in lakes or ponds. *Tennessee Academy of Science*, 18, 228-249.
- Torres-Carvajal, O. & Maffa-Endara, P.** (2013). Evolutionary history of Andean *Pholidobolus* and *Macropholidus* (Squamata: Gymnophthalmidae) lizards. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 68, 212-217. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2013.03.013>
- Valencia, R., Cerón, C., Palacios, W., Sierra, R.** (1999). Las formaciones naturales de la Sierra del Ecuador. En: Sierra R (eds.). *Propuesta Preliminar de un Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continental*. (79-108). Proyecto Instituto Ecuatoriano Forestal y de Áreas Naturales y Vida Silvestre/Global Environment Facility-Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento.

Artículo original

La vegetación de los páramos de Chile y del nevado del Quindío, Colombia

The vegetation of the páramos of Chile and Nevado del Quindío (Colombia)

✉ J Orlando Rangel-Ch^{1,*}, ✉ Jairo H. Pinto-Z¹, ✉ James L. Luteyn²

¹Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

²New York Botanical Garden, Nueva York, Estados Unidos

Resumen

Se presenta la caracterización fitosociológica de la vegetación paramuna del nevado del Quindío (Salento) y de Chile-Barragán (Pijao) en el departamento del Quindío. Las superficies de muestreo comprendieron desde 1 m² en los herbazales y cojines de plantas vasculares del superpáramo, 25 m² en los pajonales, entre 25 y 50 m² en los frailejonales y matorrales y entre 80 y 100 m² en los bosques achaparrados. El parámetro ecológico utilizado en el censo fue la cobertura (%). Sobre sustratos firmes del páramo se caracterizó la vegetación de la clase *Espeletio hartwegiana*-*Calamagrosti* *effusae* con el orden *Hyperico laricifoli*-*Calamagrosti* *effusae* y las alianzas de los chuscales *Chusqueo tessellata*-*Espeletion hartwegiana* con dos asociaciones, y la de los pastizales *Calamagrostion recto-effusae* con dos asociaciones. En cubetas terrizadas y en áreas pantanosas se estableció la vegetación de cojines laxos de la clase *Oritrophi limnophili*-*Plantaginetea rigidae* con el orden *Hypochaerido sessiliflorae*-*Plantaginetea rigidae* y la alianza *Disterigmo empetrifoli*-*Plantaginion rigidae* con una asociación. También se caracterizaron los cojines compactos de *Distichia muscoides* y *Monticalia vaccinioides* y los prados de la alianza *Colobantho quitensis*-*Agrostion magellanica* con dos asociaciones. En la franja altoandina se caracterizaron los bosques de coloradito de la clase *Polylepidetea quadrijugo-sericeae* con el orden *Miconio salicifoliae*-*Polylepidetalia quadrijugae* y la alianza *Ribeso leptostachi*-*Polylepidion sericeae* con una asociación. Asimismo, se caracterizaron los bosques achaparrados de *Escallonia myrtiloides* e *Hypericum laricifolium*, de *Hesperomeles ferruginea* e *Ilex colombiana* y un parche del bosque de *Alnus acuminata*.

Palabras clave: Páramo; Fitosociología; Nevado del Quindío; Riqueza vegetal; Flora de Colombia.

Abstract

We made the phytosociological characterization of the vegetation in the high mountains of the Nevado del Quindío (Salento) and Chile-Barragán (Pijao) in the department of Quindío. The sampling surfaces included zones from 1 m² in the grasslands and cushions of the superpáramo in the sandy areas of the Nevado del Quindío; 25 m² in the grasslands, 25 m² to 50 m² in the frailejonales and scrublands, and 80 m² to 100 m² in the stunted forests. The ecological parameter used in the census was coverage (%). On firm substrates in the páramo region, we characterized the *Espeletio hartwegiana*-*Calamagrosti* *effusae* class with the order *Hyperico laricifoli*-*Calamagrosti* *effusae* and the alliances of the *Chusqueo tessellata*-*Espeletion hartwegiana* chuscales with two associations, and the alliance of *Calamagrostion recto-effusae* grasslands with two associations. We found loose cushion vegetation of the *Oritrophi limnophili*-*Plantaginetea rigidae* class with the *Hypochaerido sessiliflorae*-*Plantaginetea rigidae* order and the alliance *Disterigmo empetrifoli*-*Plantaginion rigidae* with an association established in terraced basins and swampy areas. The compact cushions of *Distichia muscoides* and *Monticalia vaccinioides* and the meadows of the *Colobantho quitensis*-*Agrostion magellanica* alliance were also characterized with two associations. In the high Andean strip (border between the open páramo vegetation and the Andean

Citación: Rangel-Ch JO, *et al.* La vegetación de los páramos de Chile y del nevado del Quindío, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(189):807-830, octubre-diciembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2603>

Editor: Carolina Romero Hernández

***Correspondencia:**

J Orlando Rangel;
jorangelc@unal.edu.co;
jorangelc@gmail.com

Recibido: 13 de marzo de 2024

Aceptado: 3 de octubre de 2024

Publicado en línea: 28 de octubre de 2024



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

region elfin forests), we characterized “coloradito” forests of the *Polylepidetea quadrijugo-sericeae* class with the order *Miconio salicifoliae-Polylepidetalia quadrijugae* and the *Ribeso leptostachi-Polylepidion sericeae* alliance with an association. We also characterized the *Escallonia myrtiloides* and *Hypericum laricifolium* and the *Hesperomeles ferruginea* and *Ilex colombiana* stunted forests, and a relictual patch of *Alnus acuminata* forest.

Keywords: Páramo; Phytosociology; Nevado del Quindío; Plant richness; Flora of Colombia.

Introducción

El Parque Nacional Natural Los Nevados, creado como área protegida en 1974, cubre 58.300 hectáreas (Sánchez *et al.*, 1990). En el gradiente altitudinal entre los 2.600 y los 5.400 m (regiones de vida andina, paramuna y franja nival), se encuentran los nevados del Ruíz, Santa Isabel, Cisne, Santa Rosa, Tolima y Quindío. Adoptando un enfoque geobotánico, Cuatrecasas (1934) describió en la franja alto-andina (3.300-3.650 m) los bosques dominados por *Hesperomeles ferruginea* y los matorrales altos con *Monticalia vaccinioides* e *Hypericum laricifolium*. En las franjas media y alta del páramo (3.500-4.100 m) caracterizó las formaciones de frailejonales dominadas por *Espeletia hartwegiana*, la asociación de caulirósulas con pastizales del *Espeletietum hartwegianae-Calamagrostiosum*, matorrales del *Espeletietum hartwegianae-Hypericetosum*, y tapetes de *Sphagnum* del *Espeletietum hartwegianae-Sphagnosum*, y los pajonales con *Calamagrostis effusa* y *C. coarctata* en las laderas del volcán del Tolima, en tanto que en las partes más altas (4.400 m) se refirió a los rosetales bajos del *Culcitium canescens*. Por su parte, Sturm & Rangel (1985) y Salamanca *et al.* (2003) describieron la vegetación de la franja altoandina y del páramo del complejo Ruiz, Santa Isabel, Cisne y Santa Rosa. Sus propuestas iniciales de clasificación son la base para complementar las diagnósicos de los frailejonales dominados por *E. hartwegiana* y varios tipos de matorrales. No se tenían inventarios detallados de la vegetación del área del nevado del Quindío, incluido lo relativo al páramo de Chile, razón por la cual se los abordó aquí a manera de pregunta de investigación. Para responderla, aportamos la documentación de las diferentes unidades de vegetación establecidas en las dos áreas y su clasificación fitosociológica, con lo que ahora ha quedado cubierta toda la extensión del Parque Los Nevados y las cercanías del macizo Central.

Área de estudio

El complejo paramuno de Chile-Barragán se ubica en el municipio de Pijao. Las exploraciones botánicas y los inventarios de vegetación se realizaron entre los 3.400 y 3.700 m. En la zona del nevado el Quindío, que corresponde al municipio de Salento, los inventarios se extendieron desde el límite superior del bosque andino (3.600 m) hasta la base del nevado, en los arenales, a 4.250 m (Tabla 1). Para completar la diagnósico y la descripción de varias de las unidades de vegetación se incluyeron inventarios de otras zonas de páramo en Colombia.

Metodología

La fase de exploración botánica (trabajo de campo) se adelantó entre mayo y junio de 1989 y contó con la participación de Orlando Rangel, Jaime Aguirre-C. (Instituto de Ciencias Naturales), James L. Luteyn (New York Botanical Garden) y Javier Fuertes (Real Jardín Botánico de Madrid). Los sitios de muestreo se eligieron con base en la homogeneidad fisionómica, procurando no incluir áreas con rastros marcados de intervención humana (ganadería, agricultura, minería artesanal). Las superficies de muestreo se delimitaron de manera precisa y comprendieron desde 1 m² en los herbazales del superpáramo (arenales) del nevado del Quindío, 25 m² en los pajonales y entre 25 y 50 m² en los frailejonales y matorrales. Asimismo, se delimitaron tres parcelas de 100 m² cada una en los bosques de *Polylepis sericea* y una de 50 m² en el bosque de *Hesperomeles ferruginea*.

El parámetro ecológico utilizado en el censo fue la cobertura (%), estimada como la proyección del área cubierta por el individuo sobre la superficie del inventario o

Tabla 1. Ubicación de los levantamientos (inventarios de campo) realizados en el departamento del Quindío

Lev.	Altitud	Latitud	Longitud	Lev.	Altitud	Latitud	Longitud
Quindío, Salento, páramo de Quindío				Quindío, Pijao, páramo de Chile			
R 80-89	3800	4°40'38,5"N	75°27'18,4"W	R 52-89	3400	4°15'22,8"N	75°38'39,2"W
R 71-89	3900	4°40'12,1"N	75°26'32,6"W	R 53-89	3500	4°15'02,9"N	75°38'40,0"W
R 72-89	4000	4°41'06,1"N	75°24'57,9"W	R 54-89	3600	4°14'15,7"N	75°38'38,2"W
R 74-89	3900	4°41'02,4"N	75°24'46,7"W	R 55-89	3450	4°14'40,3"N	75°38'52,0"W
R 75-89	3760	4°40'36,7"N	75°25'18,1"W	R 56-89	3650	4°13'57,8"N	75°38'31,8"W
R 73-89	3850	4°40'44,0"N	75°25'06,7"W	R 60-89	3680	4°13'31,3"N	75°39'29,5"W
R 78-89	4100	4°41'48,5"N	75°24'24,5"W	R 63-89	3550	4°14'04,4"N	75°38'54,3"W
R 65-89	3800	4°40'23,4"N	75°27'05,5"W	R 64-89	3620	4°14'22,8"N	75°38'28,0"W
R 68-89	3900	4°40'53,2"N	75°24'58,4"W	R 61-89	3680	4°13'31,3"N	75°39'29,5"W
R 69-89	3900	4°40'20,8"N	75°25'46,4"W	R 62-89	3700	4°13'42,7"N	75°38'47,5"W
R 70-89	4200	4°42'12,6"N	75°24'00,4"W	R 57-89	3700	4°15'14,3"N	75°38'02,2"W
R 66-89	4000	4°40'31,7"N	75°25'46,6"W	R 58-89	3650	4°14'38,6"N	75°38'41,3"W
R 81-89	3600	4°40'28,0"N	75°28'04,0"W	R 59-89	3680	4°14'38,4"N	75°38'02,0"W
R 82-89	3850	4°40'06,1"N	75°26'30,7"W	Cauca, Belalcázar, Vereda Irlanda, páramo Santo Domingo			
R 83-89	3750	4°39'27,7"N	75°25'29,7"W	OR 251	3800	2°56'17,9"N	76°08'42,1"W
R 84-89	3700	4°40'00,5"N	75°26'09,3"W	OR 253	3700	2°56'57,3"N	76°08'55,1"W
R 85-89	3700	4°40'16,0"N	75°27'06,9"W	Santander, Cerrito, páramo del Almorzadero			
R 86-89	3800	4°39'50,8"N	75°25'22,2"W	C I-78	3900	6°57'55,8"N	72°43'30,5"W
R 87-89	4250	4°42'23,2"N	75°23'38,8"W	Caldas, Villamaría, P.N.N. Los Nevados, nevado del Ruiz			
R 88-89	4100	4°41'30,9"N	75°25'57,8"W	R II-78	4140	4°52'22,5"N	75°22'19,3"W
R 89-89	4150	4°41'31,2"N	75°25'34,0"W	Risaralda, Santa Rosa, P.N.N. Nevados, volcán Santa Rosa			
R 73-89	4100	4°40'41,3"N	75°26'28,0"W	R III-80	4250	4°47'29,3"N	75°23'54,9"W

levantamiento. Las observaciones adicionales incluyeron la inclinación del terreno, las condiciones de humedad del sustrato, y la altitud e influencia antrópica (agricultura, ganadería, minería). Los inventarios llevan la numeración de Orlando Rangel (R, OR).

El material herborizado bajo la numeración individual de James L. Luteyn y de Orlando Rangel-Ch. se determinó (1990-2000) y depositó en el Herbario Nacional Colombiano (COL) y en el Herbario del New York Botanical Garden (NY).

En la revisión y actualización nomenclatural, la fuente de homologación fueron las bases Trópicos (www.tropicos.org.co) y Taxonomic Name Resolution Service (<https://tnrs.biendata.org/#>). También se revisó la información de COL en línea (<http://www.biovirtual.unal.edu.co/es/colecciones/search/plants>).

En la clasificación fitosociológica se utilizó el programa Twinspan (McCune & Mefford, 1997) para definir tendencias generales o “gruesas” y, posteriormente, las tablas se procesaron manualmente hasta obtener una clasificación de asociaciones definidas según su composición florística que después se contrastaron con las observaciones de campo.

Cada unidad sintaxonómica (asociación, alianza, orden, clase) se describió con base en las especies características-dominantes, especies diagnósticas-diferenciales y asociadas (Braun-Blanquet, 1979). La descripción de las unidades de vegetación siguió la recomendación del código internacional de nomenclatura fitosociológica (Izco & del Arco, 2003; Theurillat *et al.*, 2020).

Resultados

Región del páramo

Clase *Espeletio hartwegianae-Calamagrostietaea effusae* Rangel, Pinto, Duque, Salamanca y Cleef *cl. nov.* En esta contribución, **tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2603/4464>.

Pajonales arbustivos, frailejonales y matorrales bajos con *Espeletia hartwegiana*, *Calamagrostis effusa*, *C. macrophylla* y *C. recta*.

Typus: *Hyperico laricifolii-Calamagrostietaea effusae* ord. nov.

La clase incluye diferentes formaciones de pajonales arbustivos, frailejonales y matorrales bajos en el gradiente topográfico (bajo, medio, alto) del páramo de la cordillera Central, el Macizo Colombiano y el Nudo de Los Pastos.

Especies diagnósticas: *Espeletia hartwegiana*, *Senecio formosus*, *Calamagrostis macrophylla*, *Baccharis tricuneata*, *Carex bonplandii*, *Alchemilla aphanoides*, *Cotula mexicana*, *Sibthorpia repens*, *Disterigma acuminatum*, *Monticalia arbutifolia*, *Sisyrinchium jamesonii*, *Cortaderia sericantha*, *Isolepis inundata*, *Hieracium avilae*, *Bomarea linifolia*, *Alchemilla galioides*, *Hypericum laricifolium* y *Niphogeton dissecta*.

Otras especies características son *Bartsia stricta*, *Calamagrostis effusa*, *Carex pichinchensis*, *Cortaderia sericantha*, *Eryngium humile*, *Gaultheria myrsinoides* (syn. *Pernettya prostrata*), *Linochilus floribundus*, *Monticalia vaccinioides*, *Nertera granadensis*, *Parablechnum loxense*, *Sphagnum magellanicum* y *Disterigma empetrifolium*.

En la zona de estudio (Chilí-nevado del Quindío), las especies características que se comparten a nivel de orden son: *E. hartwegiana*, *G. myrsinoides*, *C. effusa*, *D. empetrifolium* y *P. loxense*. Otras especies características de carácter local son *Calamagrostis bogotensis* y *Jamesonia rotundifolia*.

En 23 levantamientos (área total de 477 m²) el número de especies fue de 111 con una variación por levantamiento entre 11 (16 m²) y 31 (16 m²).

Distribución: cordillera Central: Caldas-Risaralda-Tolima, 3.800-4.540 m. Nevado Santa Isabel, 4.125-4.540 m; laguna Otún-nevado Santa Isabel, 3.930-4.250 m; valle del Totarito, 3.800-4.125 m; volcán Santa Rosa, 3.850-4.460 m.

Macizo Colombiano: Cauca: 3.200-3.820 m. Puracé, Azufrera, camino al volcán Puracé, 3.800 m; laguna San Rafael, 3.200-3.400 m; Pilimbalá, camino al volcán Puracé, 3.250-3.750 m; Pilimbalá-llano Paletará, 3.350-3.820 m; Santa Leticia, turbera La Candelaria, 2.380 m. Páez, Santo Domingo, nevado del Huila, 3.800 m.

Nudo de Los Pastos: Nariño: 3.550-3.810 m. Cumbal, volcán Cumbal, 3.690 m. Pasto, volcán Galeras, 3.550-3.810 m.

Nuevas localidades: Páramo de Chilí (Pijao), Quindío, 3.600-3.700 m. Nevado del Quindío (Salento), Quindío, 3.740-4.200 m. Cauca: Belalcázar, vereda Irlanda, páramo Santo Domingo, 3.700-3.800 m.

Orden *Hyperico laricifolii-Calamagrostietaea effusae* Rangel, Pinto y Duque *ord. nov.* En esta contribución, **tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2603/4464>.

Typus: *Chusqueo tessellatae-Espeletion hartwegianae*

El orden reúne diversos tipos de pajonales de *C. effusa* y *C. macrophylla*, helechales arbustivos de *P. loxense*, frailejonales de *E. hartwegiana*, chuscales de *Chusquea tessellata* y matorrales bajos con *L. floribundus*, *M. arbutifolia*, *Loricaria thuyoides* e *H. laricifolium*.

Especies características: *Vaccinium floribundum*, *Chusquea tessellata*, *Monticalia vaccinioides*, *Hieracium avilae*, *Scirpus inundatus*, *Hypericum laricifolium*, *Disterigma empetrifolium*, *Sibthorpia repens*, *Lupinus expetendus*, *Geranium confertum*, *Baccharis tricuneata*, *Hypericum strictum*, *Bidens triplinervia*, *Niphogeton ternata* y *Gynoxys tolimensis*.

Otras especies diagnósticas: *C. macrophylla*, *M. arbutifolia*, *C. sericantha*, *B. linifolia*, *C. bonplandii*, *S. repens* y *Bromus catharticus*.

Distribución: Macizo Colombiano: Cauca: 3.200-3.820 m. Puracé, laguna San Rafael, 3.200-3.400 m; Pilimbalá, camino al volcán Puracé, 3.250-3.750 m; Pilimbalá-llano Paletará, 3.350-3.820 m. Páez, Santo Domingo, nevado del Huila, 3.800 m.

Nudo de Los Pastos: Nariño: 3.550-3.810 m. Cumbal, volcán Cumbal, 3.690 m. Pasto, volcán Galeras, 3.550-3.810 m.

Nuevas localidades: Páramo de Chile (Pijao), Quindío, 3.600-3.700 m. Nevado del Quindío (Salento), Quindío, 3.740-4.200 m. Cauca, Belalcázar, vereda Irlanda, páramo Santo Domingo, 3.700-3.800 m.

Alianza *Chusqueo tessellatae-Espeleton hartwegianae* all. nov. En esta contribución **tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2603/4464>.

Typus: *Castillejo fissifoliae-Chusqueetum tessellatae*

Especies características: *Chusquea tessellata*, *Parablechnum loxense* y *Oreobolus obtusangulus*.

Fisionomía-composición: chuscal-frailejónal con un estrato arbustivo dominado por *H. laricifolium*, *P. loxense*, *G. myrsinoides*, *E. hartwegiana* y *C. tessellata*. En el estrato herbáceo predominan las macollas de *C. effusa*.

En 10 levantamientos (183 m²) el número total de especies fue de 50 con variación por levantamiento entre 11 (16 m²) y 19 (30 m²).

Los sitios son muy húmedos, en ocasiones encharcados.

Distribución: páramo de Chile (Pijao), Quindío, 3.600-3.700 m. Cauca: Belalcázar, vereda Irlanda, páramo Santo Domingo, 3.700-3.800 m.

Asociación *Castillejo fissifoliae-Chusqueetum tessellatae* ass. nov. En esta contribución, **tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2603/4464>.

Typus: R 55-89

Especies características-dominantes: *Castilleja fissifolia*, *Alteinstenia fimbriata*, *Bartsia glandulifera*, *Elaphoglossum* cf. *mathewsii*, *Rhynchospora macrochaeta* y *Linochilus floribundus*.

Fisionomía-composición: chuscal arbustivo dominado por *C. fissifolia*, *E. hartwegiana*, *L. floribundus* e *H. laricifolium*. En el estrato herbáceo dominaba ampliamente *C. effusa* acompañada por *R. macrochaeta* y *C. bogotensis*. En el estrato rasante aparecían *A. fimbriata*, *D. empetrifolium*, *Carex tristicha* y *Elaphoglossum* cf. *mathewsii*.

En siete levantamientos (112 m²) se registraron 35 especies con variación por levantamiento (16 m²) entre 11 y 16.

La asociación se establece en sitios planos, muy húmedos.

Distribución: páramo de Chile (Pijao), Quindío, 3.600-3.700 m.

Asociación *Hyperico ruscooidis-Chusqueetum tessellatae* ass. nov. En esta contribución, **tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2603/4464>.

Typus: R 62-89

Especies características-dominantes: *Hypericum ruscooides*, *Desfontainia spinosa*, *Vaccinium floribundum*, *Miconia revoluta*, *Monticalia vernicosa*, *Arcytophyllum muticum* y *Oreobolus obtusangulus*.

Fisionomía-composición: chuscal con un estrato arbustivo bajo en donde dominaban *H. ruscooides*, *V. floribundum*, *M. vernicosa* y *C. tessellata*. En el estrato herbáceo dominaba *E. hartwegiana* acompañada por *C. effusa*, *C. bogotensis*, *D. spinosa* y *M. revoluta*. En el estrato rasante se establecen *O. obtusangulus*, *A. muticum* y especies de *Bartramia* y *Sphagnum*. En tres levantamientos (71 m²) se registraron 31 especies con una variación por levantamiento entre 14 (16 m²) y 19 (30 m²).

La asociación se establece en sitios planos y ligeramente inclinados, con rocas, muy húmedos.

Distribución: páramo de Chile (Pijao), Quindío, 3650-3700 m. Cauca: Belalcázar, vereda Irlanda, páramo Santo Domingo, 3.700-3.800 m.

Alianza *Calamagrostion recto-effusae* all. nov. En esta contribución, **tabla 1S**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2603/4464>.

Typus: *Hypochaerido radicatae-Calamagrostietum rectae*

Especies características: *Calamagrostis recta*, *Alchemilla hispidula*, *Miconia salicifolia*, *Satureja nubigena*, *Oritrophium peruvianum*, *Gentiana prostrata*, *Alchemilla orbiculata*, *Dyctionema pavonii*, *Stereocaulon* cf. *vesuvianum* y *Oritrophium limnophyllum*.

Fisionomía-composición: la vegetación de la alianza incluyó un pajonal herbazal y un matorral bajo. Se encontró un estrato arbustivo de baja cobertura en el cual dominaban *H. laricifolium*, *Linochilus schultzii* y *M. salicifolia*. El estrato herbáceo estaba dominado por *C. recta*, *B. tricuneata*, *G. myrsinoides* y *C. effusa*. En el estrato rasante aparecían *A. hispidula*, *S. nubigena*, *O. limnophyllum*, *C. tristicha*, *J. rotundifolia* y *D. empetrifolium*. En 13 levantamientos (294 m²) se registraron 84 especies con variación por levantamiento entre 13 (50 m²) y 31 (16 m²).

Los sitios son arenosos, suelos sueltos.

Distribución: nevado del Quindío (Salento), Quindío, 3.740-4.200 m.

Asociación *Hypochaerido radicatae-Calamagrostietum rectae* ass. nov. En esta contribución, **tabla 1S**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2603/4464>.

Typus: R 68-89

Especies características: *Hypochaeris radicata*, *Eryngium humile*, *Hieracium avilae*, *Nertera granadensis*, *Gnaphalium graveolens*, *Sisyrinchium jamesonii*, *Mniodes kunthiana*, *Cerastium arvense*, *Hesperomeles pernettyoides*, *Baccharis chilco*, *Azorella crenata*, *Gunnera magellanica*, *Oxalis lotoides*, *Azorella pedunculata*, *Laestadia muscicola* y *Lupinus humifusus*.

Fisionomía-composición: pajonal-herbazal con un estrato herbáceo de escasa cobertura dominado por *H. pernettyoides*, *C. recta*, *B. tricuneata* y *E. hartwegiana*. En el estrato rasante dominaban *H. radicata*, *E. humile*, *G. graveolens*, *O. limnophyllum*, *C. tristicha* y *J. rotundifolia*. En siete levantamientos (112 m²) se registraron 63 especies con variación por levantamiento (16 m²) entre 15 y 31.

Esta asociación se establece en sitios con suelos muy arenosos, sueltos, probablemente afectados por soliflucción. Son frecuentes los guijarros y rocas pequeñas.

Distribución: nevado del Quindío (Salento), Quindío, 3.740-3.960 m.

Asociación *Monticalio vaccinioidis-Loricarietum colombianae* ass. nov. En esta contribución, **tabla 1S**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2603/4464>.

Typus: R 85-89

Especies características: *Monticalia vaccinioides*, *Loricaria colombiana*, *Hypericum lancioides*, *Festuca sublimis*, *Gentianella dasyantha*, *Monticalia andicola*, *Halenia weddelliana* y *Linochilus rupestris*.

Fisionomía-composición: matorral bajo con un estrato arbustivo dominado por *M. vaccinioides*, *L. colombiana*, *Hypericum lancioides*, *L. schultzii* e *H. laricifolium*. En el estrato herbáceo dominaban *G. dasyantha*, *C. effusa* y *C. recta*. En el rasante eran frecuentes *H. weddelliana*, *A. hispidula* y *J. rotundifolia*. En cuatro levantamientos (150 m²) se registraron 30 especies con variación por levantamiento entre 13 (50 m²) y 19 (25 m²).

La asociación se establece en los arenales y en sitios planos cerca a quebradas.

Distribución: nevado del Quindío (Salento), Quindío, 4.150-4.200 m.

Comunidad de *Xenophyllum humile* (Tabla 1S, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2603/4464>)

Fisionomía-composición: tapetes laxos con *X. humile* entremezclados entre la matriz de *C. recta* y *E. hartwegiana*.

Especies asociadas: *L. humifusus*, *Geranium rhomboidale*, *B. stricta* y *Geranium siboldioides*. En dos levantamientos (32 m²) se registraron 22 especies con variación por levantamiento (16 m²) entre 14 y 15.

Se establecen en áreas planas, muy húmedas.

Distribución: nevado del Quindío (Salento), Quindío, 3.940-4.110 m.

Otras comunidades

Cojines compactos de *Distichia muscoides* y *Monticalia vaccinioides* (Tabla 2A)

Especies características-dominantes: *Distichia muscoides*, *Monticalia vaccinioides*, *Gaultheria myrsinoides*, *Disterigma empetrifolium* y *Festuca procera*.

Fisionomía-composición: cojines compactos dominados por *Distichia muscoides* con cubrimiento del 50 % del área de muestreo. Entre las especies asociadas aparecían *M. vaccinioides*, *G. myrsinoides* y *F. procera*. Entremezcladas entre los cojines aparecía *D. empetrifolium* y, aunque con valores bajos de cobertura, también *C. effusa*, *C. bogotensis*, *H. laricifolium*, *L. schultzei*, *Bartsia santolinaefolia* y *C. tristicha*. En tres levantamientos (12 m²) se registraron 18 especies con variación por levantamiento entre 4 y 14.

Los cojines muy disgregados arraigan sobre sitios con suelo suelto, húmedo, cerca de los arenales del superpáramo del nevado del Quindío.

Distribución: nevado del Quindío (Salento), Quindío, 4100-4150 m.

Clase y orden no definidos

Alianza *Colobantho quitensis*-*Agrostion magellanicae* all. nov. En esta contribución, **Tabla 2B.**

Typus: *Laestadio muscicolae-Colobanthesetum quitensis*

Fisionomía-composición: vegetación de tipo prado con un estrato rasante dominado por *Colobanthus quitensis*, *Agrostis magellanica*, *A. orbiculata* y *Eleocharis stenocarpa*. También aparecen en los inventarios *C. arvense*, *Cotula minuta*, *E. humile* y *Ranunculus peruvianus*. En seis levantamientos (9 m²) se registraron 45 especies con variación por levantamiento entre 9 y 15.

La vegetación se establece en sitios planos, muy húmedos, ocasionalmente encharcados.

Distribución: nevado del Quindío (Salento), Quindío, 3.740-3.750 m. Parque Los Nevados, nevados del Ruiz, Santa Isabel y Santa Rosa (Caldas y Risaralda), 4.120-4.250 m, páramo del Almorzadero (Santander), 3.900 m.

Asociación *Laestadio muscicolae-Colobanthesetum quitensis* ass. nov. En esta contribución, **Tabla 2B.**

Typus: R 76-89

Especies características-dominantes: *Veronica serpyllifolia*, *Isoetes* cf. *karstenii*, *Laestadia muscicola*, *Gunnera magellanica* y *Aphanactis jamesoniana*.

Fisionomía-composición: vegetación de tipo prado con un estrato rasante dominante en cobertura en el cual aparecían *C. minuta*, *C. quitensis* y *L. muscicola*. Entre las especies acompañantes figuraron *A. orbiculata*, *C. tristicha*, *A. fimbriata*, *Erigeron chionophilus* y *A. jamesoniana*. En dos levantamientos (4 m²) se registraron 21 especies con variación por levantamiento entre 12 y 15.

La vegetación se establece en sitios planos, húmedos, cerca de quebradas.

Distribución: nevado del Quindío (Salento), Quindío, 3.740-3.750 m.

Asociación *Lupino microphyllae-Colobanthesetum quitensis* ass. nov. En esta contribución, **Tabla 2B.**

Typus: R II-78 (= Censo II en Aguirre et al., 1982)

Especies características-dominantes: *Arenaria serpens*, *Oritrophium peruvianum*, *Lupinus microphyllus*, *Luzula racemosa*, *Luzula volcanica*, *Belloa kunthiana*, *Gnaphalium antennarioides*, *Clinopodium nubigenum* y *Gentiana sedifolia*.

Fisionomía-composición: vegetación de tipo prado dominada por *C. quitensis*, *L. microphyllus*, *A. magellanica* y *C. nubigenum*. En cuatro levantamientos (5 m²) se registraron 32 especies con variación por levantamiento entre 9 y 15.

Se establece en sitios encharcados.
 Distribución: Parque Los Nevados, nevados del Ruiz, Santa Isabel y Santa Rosa
 (Caldas y Risaralda), 4.120-4.250 m, páramo del Almorzadero (Santander), 3.900 m.

Tabla 2. Composición florística de comunidades vegetales

A. Comunidad de <i>Distichia muscoides</i> y <i>Monticalia vaccinioides</i>				B. Alianza <i>Colobantho quitensis</i> - <i>Agrostion magellanicae</i>						
Levantamiento	R 81-89	R 82-89	R 80-89A	Levantamiento	R 67-89	R 76-89	C I-78	R II-78	R III-80	R IV-80
Altitud (m)	4150	4150	4100	Altitud (m)	3740	3750	3900	4140	4250	4120
Área (m²)	4	4	4	Área (m²)	2	2	2	1	1	1
Cobertura (%)			Cobertura (%)							
Cojines compactos de <i>Distichia muscoides</i> y <i>Monticalia vaccinioides</i>				Clase y orden no definidos						
<i>Distichia muscoides</i>				Alianza <i>Colobantho quitensis</i>-<i>Agrostion magellanicae</i>						
<i>Racomitium crispulum</i>				<i>Colobanthus quitensis</i>						
<i>Monticalia vaccinioides</i>				<i>Cerastium arvense</i>						
<i>Gaultheria myrsinoides</i>				<i>Cotula minuta</i>						
<i>Disterigma empetrifolium</i>				<i>Agrostis magellanica</i>						
<i>Festuca procera</i>				<i>Eryngium humile</i>						
<i>Hypericum laricifolium</i>				<i>Ranunculus peruvianus</i>						
<i>Linochilus schultzi</i>				<i>Alchemilla orbiculata</i>						
<i>Calamagrostis effusa</i>				<i>Eleocharis stenocarpa</i>						
<i>Calamagrostis bogotensis</i>				<i>Laestadio muscicolae</i>-<i>Colobantheum quitensis</i>						
<i>Bartsia santolinaefolia</i>				<i>Veronica serpyllifolia</i>						
<i>Carex tristicha</i>				<i>Isoetes cf. karstenii</i>						
<i>Hypericum lancioides</i>				<i>Laestadia muscicola</i>						
<i>Linochilus rupestris</i>				<i>Gunnera magellanica</i>						
<i>Rhaccocarpus purpurascens</i>				<i>Aphanactis jamesoniana</i>						
<i>Cladonia sp.</i>				<i>Lupino microphyllae</i>-<i>Colobantheum quitensis</i>						
<i>Monticalia andicola</i>				<i>Arenaria serpens</i>						
<i>Breutelia tomentosa</i>				<i>Oritrophium peruvianum</i>						
				<i>Lupinus microphyllus</i>						
				<i>Luzula racemosa</i>						
				<i>Luzula volcanica</i>						
				<i>Belloa kunthiana</i>						
				<i>Gnaphalium antennarioides</i>						
				<i>Clinopodium nubigenum</i>						
				<i>Gentiana sedifolia</i>						
				<i>Scorpidium scorpioides</i>						
				<i>Alchemilla pinnata</i>						

Otras especies presentes en la alianza *Colobantho quitensis-Agrostion magellanicae*

Gnaphalium graveolens (R 67-89/0,5), *Epilobium denticulatum* (R 67-89/1), *Geranium sibbaldioides* (R II-78/2), *Ourisia muscosa* (R 67-89/0,5), *Breutelia tomentosa* (R 76-89/5), *Carex tristicha* (R 76-89/1), *Altensteinia fimbriata* (R 76-89/1), *Erigeron chionophilus* (R 76-89/2), *Isolepis inundata* (C I-78/5), *Polytrichum juniperinum* (R IV-80/2), *Aa paludosa* (C I-78/1), *Cardamine bonariense* (C I-78/1), *Barbula* sp. (C I-78/1), *Festuca* sp. (R 67-89/5), *Oreomyrrhis andicola* (R II-78/1), *Sysyrinchium tinctorium* (R II-78/1), *Senecio repens* (R II-78/1), *Carex bonplandii* (R III-80/3), *Calandrina acaulis* (R III-80/1), *Alchemilla hispidula* (R IV-80/1), *Vesicarex collumanthus* (C I-78/3).

Clase, orden y alianza no definidos

Herbazales ralos de *Draba alyssoides* y *Cortaderia bifida* (Tabla 3A).

Especies características-dominantes: *Cortaderia bifida*, *Calamagrostis bogotensis*, *Draba alyssoides*, *Breutelia tomentosa*, *Festuca procera*, *Baccharis tricuneata*, *Linochilus rupestris* e *Hypericum laricifolium*.

Fisionomía-composición: se diferenció un estrato herbáceo de escaso cubrimiento (12 % de cobertura en promedio) en el cual aparecían *C. bifida*, *C. bogotensis*, *Myrrhidendron glaucescens*, *F. procera* y *B. tricuneata*. En el estrato rasante figuraron *A. hispidula*, *B. tomentosa*, *O. peruvianum* y *Valeriana pilosa*. En dos levantamientos (21 m²) se registraron 18 especies, con variación por levantamiento entre 10 y 12.

La vegetación crece entre las grietas de los roquedales.

Distribución: nevado del Quindío (Salento), Quindío, 3.850-3.860 m.

Comunidades pioneras

Pastizal azul de *Agrostis magellanica* y *Racomitrium crispulum* (Tabla 3B).

Especies dominantes: *Racomitrium crispulum*, *Agrostis magellanica*, *Festuca procera* y *Linochilus rupestris*. Entre las especies acompañantes figuraban *Lasiocephalus ovatus*, *Valeriana plantaginea*, *Melpomene moniliformis*, *Andraea* cf. *rupestris*, *Rhaccocarpus purpurascens*, *Alchemilla hispidula*, *Hypochaeris radicata* y *Festuca subulifolia*.

Fisionomía-composición: pastizal con un estrato herbáceo de cobertura baja (15 %) en el cual dominaban *L. rupestris* y *F. procera*. En el estrato rasante, con 40 % de cobertura, dominaron *R. purpurascens*, *Andraea* cf. *rupestris* y *A. magellanica*. En un levantamiento (9 m²) el número total de especies fue de 13.

El pastizal se establece sobre suelos sueltos en los arenales.

Distribución: nevado del Quindío (Salento), Quindío, 4.280 m. (Tabla 2)

Herbazal de *Culcitium canescens* y *Lasiocephalus ovatus* (Tabla 3C)

Fisionomía-composición: herbazales dominados por *C. (Senecio) canescens* y *L. ovatus*, junto con *V. plantaginea*, *R. crispulum* y *L. rupestris*. En dos levantamientos (16 m²) el número total de especies fue de 11, con variación por levantamiento entre 7 y 9.

Es el tipo de vegetación que coloniza los arenales del nevado, crece a manera de parches.

Distribución: nevado del Quindío (Salento), Quindío, 4.320 m.

Clase *Oritrophi limnophili-Plantaginetea rigidae* Rangel, Salamanca y Cleef class. nov. En esta contribución, tabla 4A.

Typus: *Hypochaerido sessiliflorae-Plantaginetalia rigidae*

Fisionomía-composición: cojines de plantas vasculares dominados por *Plantago rigida* y *Oritrophium limnophilum*. En ocasiones, los cojines cubrieron casi el 90 % de la superficie de las cubetas; en otros casos se observaron roturas de los cojines y colonización por parte de especies de tierra firme.

Especies características: *Oritrophium limnophilum*, *Plantago rigida*, *Bartsia* cf. *pedicularoides* y *Gentianella dasyantha*. En cinco levantamientos (17 m²) se registraron 30 especies, con variación por levantamiento entre 7 y 14.

Tabla 3. Composición florística de herbazales del nevado del Quindío

A. Comunidad de <i>Draba alyssoides</i> y <i>Cortaderia bifida</i>			B. Comunidad de <i>Agrostis magellanica</i> y <i>Racomitrium crispulum</i>	
Levantamiento	R 77-89	R 77-89 B	Levantamiento	R 87-89
Altitud (m)	3860	3850	Altitud (m)	4280
Área (m²)	12	9	Área (m²)	9
Cobertura (%)			Cobertura (%)	
Comunidad de <i>Draba alyssoides</i> y <i>Cortaderia bifida</i>			Pastizal azul de <i>Agrostis magellanica</i> y <i>Racomitrium crispulum</i>	
<i>Cortaderia bifida</i>	5	2	<i>Racomitrium crispulum</i>	15
<i>Calamagrostis bogotensis</i>	15	10	<i>Agrostis magellanica</i>	5
<i>Draba alyssoides</i>	1	5	<i>Festuca procera</i>	5
<i>Breutelia tomentosa</i>	15	20	<i>Lasiocephalus ovatus</i>	5
<i>Festuca procera</i>	20		<i>Linochilus rupestris</i>	2
<i>Baccharis tricuneata</i>	10		<i>Valeriana plantaginea</i>	1
<i>Linochilus rupestris</i>	10		<i>Stereocaulon vesuvianum</i>	1
<i>Hypericum laricifolium</i>	5		<i>Melpomene moniliformis</i>	1
<i>Myrrhidendron glaucescens</i>	2		<i>Andraea rupestris</i>	10
<i>Alchemilla hispidula</i>	1		<i>Rhaccocarpus purpurascens</i>	10
<i>Oritrophium peruvianum</i>	1		<i>Alchemilla hispidula</i>	1
<i>Baccharis chilco</i>	5		<i>Hypochaeris radicata</i>	1
<i>Valeriana pilosa</i>		5	<i>Poa pauciflora</i>	1
<i>Stereocaulon vesuvianum</i>		5		
<i>Halenia cf. campanulata</i>		2		
<i>Brachyotum strigosum</i>		1		
<i>Bartsia santolinifolia</i>		1		
<i>Lepicolea pruinosa</i>		30		
C. Comunidad de <i>Culcitium canescens</i> y <i>Lasiocephalus ovatus</i>				
Levantamiento	R 88-89	R 89-89		
Altitud (m)	4320	4320		
Área (m²)	8	8		
Cobertura (%)				
Herbazal de <i>Culcitium canescens</i> y <i>Lasiocephalus ovatus</i>				
<i>Culcitium canescens</i>	40	20		
<i>Lasiocephalus ovatus</i>	20	5		
<i>Valeriana plantaginea</i>	2	15		
<i>Linochilus rupestris</i>	10			
<i>Racomitrium crispulum</i>	10	1		
<i>Campylopus</i> sp.	5			
<i>Andraea rupestris</i>	2	2		
<i>Poa pauciflora</i>		1		
<i>Agrostis magellanicum</i>		1		
<i>Lycopodium saururus</i>		2		
<i>Bartsia santolinifolia</i>		1		

Se establecen en sitios planos con buen contenido de agua cerca a quebradas o en cubetas en avanzado estado de colmatación.

Orden *Hypochaerido sessiliflorae-Plantaginetalia rigidae* Rangel, Salamanca y Cleef ord. nov. En esta contribución, **tabla 4A**.

Typus *Hyperico lancioidis-Plantaginion rigidae*

Especies características diagnósticas: *Calamagrostis recta*, *Carex peucophila*, *Festuca sublimis*, *Gaultheria myrsinoides*, *Hypochaeris sessiliflora* y *Plantago rigida*.

Otras especies características: *Agrostis exasperata*, *Agrostis breviculmis*, *Geranium confertum*, *Disterigma empetrifolium*, *Cerastium subspicatum*, *Azorella aretioides*, *Azorella multifida*, *Senecio repens*, *Halenia campanulata*, *Agrostis foliata*, *Senecio formosus* y *Jamesonia goudotii*.

Tabla 4. Composición florística de comunidades vegetales

A. Clase <i>Oritrophi limnophili-Plantaginea rigidae</i>						B. Comunidad de <i>Escallonia myrtiloides</i> e <i>Hypericum laricifolium</i> .		
Levantamiento	R 57-89	R 58-89	R 59-89	R 80-89	R 90-89	Levantamiento	R 91-89	R 58B-89
Altitud (m)	3700	3650	3680	4150	4040	Altitud (m)	3810	3500
Área (m ²)	1	4	4	4	4	Área (m ²)	20	25
Cobertura (%)						Cobertura (%)		
Clase <i>Oritrophi limnophili-Plantaginea rigidae</i> y orden <i>Hypochaerido sessiliflorae-Plantaginealia rigidae</i>						Comunidad de <i>Escallonia myrtiloides</i> e <i>Hypericum laricifolium</i>		
Alianza <i>Hyperico lancioidis-Plantaginion rigidae</i>						<i>Escallonia myrtiloides</i>		
<i>Plantago rigida</i>	15	60	65	60	30	<i>Hypericum laricifolium</i>	15	5
<i>Disterigma empetrifolium</i>	2	1	2	5		<i>Miconia latifolia</i>	25	2
<i>Baccharis tricuneata</i>	1					<i>Linochilus schultzei</i>	1	2
<i>Eryngium humile</i>	2				2	<i>Linochilus schultzei</i>	10	
<i>Monticalia vaccinioides</i>				1		<i>Valeriana plantaginea</i>	4	
Asociación <i>Hyperico lancioidis-Plantagineum rigidae</i>						<i>Rumex tolimensis</i>	2	
<i>Hypericum lancioides</i>	5	5	5	5	2	<i>Valeriana pilosa</i>	2	
<i>Bartsia glandulifera</i>	0,5		0,5			<i>Monticalia andicola</i>	2	
<i>Carex cf. peucophila</i>	2			5		<i>Ranunculus guzmanii</i>	1	
<i>Halenia weddelliana</i>			0,5	0,5		<i>Hesperomeles obtusifolia</i>	5	
<i>Oreobolus obtusangulus</i>	15	15	2			<i>Monnina bracteata</i>	2	
<i>Oritrophium limnophyllum</i>	10	2	30			<i>Myrrhidendron glaucescens</i>	5	
<i>Lycopodium saurarum</i>		1	1	5		<i>Cerastium floccosum</i>	1	
<i>Calamagrostis bogotensis</i>				15	5	<i>Monticalia vaccinioides</i>	2	
Otras especies presentes						<i>Tibouchina mollis</i>		2
<i>Sisyrinchium jamesonii</i> (R 57-89/0,5)						<i>Ageratina tinifolia</i>		1
<i>Monnina arborescens</i> (R 57-89/1)						<i>Baccharis cf. macrantha</i>		1
<i>Cotula minuta</i> (R 57-89/5)						<i>Chusquea tessellata</i>		5
<i>Sphagnum magellanicum</i> (R 57-89/5)						<i>Miconia ligustrina</i>		5
<i>Rhynchospora macrochaeta</i> (R 58-89/0,5)						<i>Gaultheria myrsinioides</i>		1
<i>Cladonia sp.</i> (R 58-89/0,5)								
<i>Myrteola oxycoccoides</i> (R 59-89/5)								
<i>Espeletia hartwegiana</i> ssp. <i>centroandina</i> (R 80-89/1)								
<i>Azorella crenata</i> (R 80-89/1)								
<i>Linochilus rupestris</i> (R 80-89/1)								
<i>Racomitium crispulum</i> (R 80-89/10)								
<i>Rhaccocarpus purpurascens</i> (R 80-89/25)								
<i>Xenophyllum humilis</i> (R 90-89/50)								
<i>Ranunculus sp.</i> (R 90-89/0,5)								
<i>Valeriana plantaginea</i> (R 90-89/2)								
<i>Gentianella sedifolia</i> (R 80-89/0,5)								

Fisionomía-composición: cojines de plantas vasculares dominados por *Plantago rigida* e *H. sessiliflora*. En el estrato herbáceo se encontraron *H. lancioides*, *Bromus lanatus*, *L. microphyllus*, *G. antennarioides*, *C. bonplandii* y *Baccharis caespitosa*.

Alianza *Hyperico lancioidis-Plantaginion rigidae* all. nov. En esta contribución, **tabla 4A.**

Typus: *Hyperico lancioidis-Plantaginetum rigidae*

Especies características-dominantes: *Plantago rigida* y *Disterigma empetrifolium*.

Tabla 3.

Fisionomía-composición: cojines compactos de *P. rigida*. En el páramo de Chile se establece en sitios planos con buen contenido de agua cerca a quebradas; en el nevado del Quindío se encuentra cerca a los arenales del superpáramo.

Distribución: páramo de Chile (Pijao), Quindío, 3.650-3.700 m, nevado del Quindío (Salento), Quindío, 4.150 m.

Asociación *Hyperico lancioidis-Plantaginetum rigidae* ass. nov. En esta contribución, **tabla 4A.**

Typus: R 57-89

Especies características-dominantes: *Bartsia glandulifera*, *Hypericum lancioides*, *Carex pichinchensis*, *Halenia weddelliana*, *Oreobolus obtusangulus* y *Oritrophium limnophyllum*.

Fisionomía-composición: cojín con un estrato herbáceo de baja cobertura con *H. lancioides* y *C. bogotensis*. El estrato dominante fue el rasante, especialmente por *P. rigida*, *D. empetrifolium*, *O. obtusangulus* y *O. limnophyllum*.

Distribución: páramo de Chile (Pijao), Quindío, 3.650-3.700 m, nevado del Quindío (Salento), Quindío, 4.040-4.150 m.

Franja alto-andina y zona de transición con el páramo abierto

Bosques ralos-matorrales altos de *Escallonia myrtiloides* e *Hypericum laricifolium* (Tabla 4B)

Especies características-dominantes: *Escallonia myrtiloides*, *Linochilus schultzi*, *Hypericum laricifolium*, *Baccharis macrantha* y *Chusquea tessellata*.

Fisionomía-composición: Matorral alto hasta bosque ralo que reunió elementos leñosos como *Escallonia myrtiloides*, *Hesperomeles obtusifolia*, *L. schultzi* con hierbas y arbustillos típicos de la vegetación abierta como *Ranunculus guzmanii*, *Monnina bracteata*, *Myrrhidendron glaucescens* y *Cerastium* cf. *flocossum*. En dos levantamientos (45 m²) se registraron 20 especies, con variación por levantamiento entre 13 y 9.

Sobre el suelo es común que se establezcan tapetes de briofitos con especies de *Campylopus*.

Distribución: nevado del Quindío (Salento), Quindío, 3.810 m, páramo de Chile (Pijao), Quindío, 3.500 m.

Clase *Polylepidetea quadrijugo-sericeae* class. nov. Rangel en esta contribución **(Tabla 5). Bosques de *Polylepis sericea***

Typus: *Miconio salicifoliae-Polylepidetalia quadrijugae* ord. nov. Rangel en esta contribución.

Fisionomía-composición: la vegetación de la clase y orden incluye bosques achaparrados con elementos de 8 a 10 m de altura. Entre las especies características-dominantes figuran *Linochilus tenuifolium*, *L. florinudus* y *L. rosmarinifolius*. Otras especies características son *M. salicifolia*, *Luzula gigantea*, *Myrsine dependens*, *Oxalis latoides* y *R. macrochaeta*.

Los estratos bajos son pobres en especies, están muy intervenidos por el pisoteo del ganado.

Tabla 5. Composición florística de la clase *Polylepidetea quadrijugo-sericeae*

Levantamiento	R 74-89	R 75-89	R 73-89
Altitud (m)	3900	3760	3850
Área (m ²)	100	100	100
Cobertura (%)			
Clase <i>Polylepidetea quadrijugo-sericeae</i> y orden <i>Miconio salicifoliae-Polylepidetalia quadrijugae</i>			
<i>Miconia salicifolia</i>	1	10	20
<i>Luzula gigantea</i>		0,5	1
<i>Myrsine dependens</i>	2	2	1
<i>Oxalis latooides</i>	1	0,5	0,5
<i>Bomarea linifolia</i>			0,5
<i>Ilex kunthiana</i>	0,5		
<i>Hieracium avilae</i>			0,5
<i>Valeriana pavonii</i>			0,5
<i>Rhynchospora macrochaeta</i>	5	3	
Alianza <i>Ribeso leptostachi-Polylepidion sericeae</i>			
<i>Polylepis sericea</i>	30	75	80
<i>Hypericum laricifolium</i>	1	0,5	1
<i>Ribes leptostachyum</i>		2	
<i>Linochilus rosmarinifolius</i>	1	2	
Asociación <i>Linochilo tenuifoliae-Polylepidetum sericeae</i>			
<i>Greigia exserta</i>	40	3	5
<i>Weinmannia microphylla</i>	10	3	
<i>Linochilus tenuifolius</i>	10	10	
<i>Tristerix longibracteatus</i>	2	1	1
<i>Berberis guilache</i>	2		1
<i>Cardamine africana</i>	0,5		0,5
<i>Desfontainea plowmannii</i>	10	2	
<i>Gaultheria sclerophylla</i>	5	1	
<i>Gynoxys buxifolia</i>		1	5
<i>Leandra melanodesma</i>	5	20	
<i>Oreopanax tolimanus</i>	1	1	
<i>Polystichum polyphyllum</i>		0,5	0,5
Otras especies			
<i>Baccharis latifolia</i> (R 74-89/0,5)	<i>Jamesonia goudotii</i> (R 74-89/0,5)		
<i>Baccharis tricuneata</i> (R 73-89/0,5)	<i>Hydrocotyle leucocephala</i> (R 74-89/0,5)		
<i>Cardamine alberti</i> (R 75-89/0,5)	<i>Oreopanax ruizianum</i> (R 73-89/2)		
<i>Cortaderia bifida</i> (R 73-89/2)	<i>Polypodium fraxinifolium</i> (R 73-89/0,5)		
<i>Fuchsia petiolaris</i> (R 74-89/2)	<i>Polypodium lancifolium</i> (R 73-89/0,5)		
<i>Nertera granadensis</i> (R 73-89/2)	<i>Ranunculus praemorsus</i> (R 73-89/0,5)		
<i>Alchemilla andina</i> (R 73-89/2)	<i>Equisetum bogotensis</i> (R 73-89/0,5)		
<i>Galium hypocarpium</i> (R 73-89/2)	<i>Hydrocotyle bonplandii</i> (R 73-89/1)		
<i>Chusquea scandens</i> (R 75-89/1)	<i>Myrrhidendron glaucescens</i> (R 73-89/1)		
<i>Drymaria cordata</i> (R 73-89/0,5)	<i>Elaphoglossum mathewsii</i> (R 73-89/0,5)		
<i>Gynoxys pendula</i> (R 75-89/5)	<i>Gaiadendron punctatum</i> (R 74-89/50)		
<i>Rubus glabratus</i> (R 74-89/0,5)			

Alianza *Ribeso leptostachi*-*Polylepidion sericeae* Rangel y Arellano, 2010 (Tabla 5).

Fisionomía-composición florística: la vegetación de la alianza incluye bosques achaparrados con elementos de hasta de 10 m de altura, el sotobosque es pobre y ralo. Especies dominantes en el estrato subarbóreo *P. sericea*, *Linochilus rosmarinifolius* y *Ribes leptostachyum* y en el arbustivo *H. laricifolium*.

Los bosques se establecen en roquedales, en áreas que fueron sometidas a la acción glaciaria.

Distribución: páramos de la cordillera Central.

Asociación *Linochilo tenuifoliae*-*Polylepidium sericeae* Rangel y Arellano, 2010 (Tabla 5)

Fisionomía-composición florística: bosques bajos con un estrato de arbolitos en el cual están presentes como asociadas *Weinmannia microphylla*, *H. ferruginea*, *M. dependens* y *Linochilus tenuifolius*; la circunferencia de los troncos a la altura del pecho es mayor de 80 cm, están arqueados y sus copas pueden tener una proyección sobre el suelo de 25-30 metros cuadrados. En el estrato arbustivo dominan *M. salicifolia*, *Leandra melanodesma* e *H. laricifolium*, y en el herbáceo *Greigia exserta*. En tres levantamientos (300 m²) se registraron 48 especies, con variación por levantamiento entre 22 y 29.

Distribución: entre Salento (Quindío) y la parte alta del páramo del nevado del Quindío.

Se establecen estos parches muy transformados en sitios inclinados en las partes altas del nevado del Quindío en las cornisas protegidas de la acción del clima.

Bosque de *Alnus acuminata* (Tabla 6A)

Especies características-dominantes: *Alnus acuminata*, *Chusquea scandens*, *Freziera canescens*, *Saurauia* sp. y *Vallea stipularis*.

Fisionomía-composición: bosque con un estrato de arbolitos con individuos de 8-10 m de altura, que cubrió un 70 % del área del inventario, especialmente de *A. acuminata* (60 %) y *F. canescens*. En el estrato arbustivo, con 25 % de cobertura, aparecían *Miconia latifolia*, *V. stipularis*, *Saurauia* sp. y *C. scandens*. En el estrato herbáceo de escaso cubrimiento se encontraron *Monochaetum myrtoideum*, *Tibouchina mollis* y *B. macrantha*. En un levantamiento (80 m²) el número total de especies fue de 16.

Se establecen en áreas planas e inclinadas cerca de quebradas.

Distribución: páramo de Chile (Pijao), Quindío, 3.200-3.300 m, páramo del nevado del Quindío (Salento). (Tablas 4 y 5)

Bosques achaparrados de *Hesperomeles ferruginea* e *Ilex colombiana* (Tabla 6B)

Fisionomía-composición: bosque achaparrado con elementos hasta de 6-7 m de altura. En los estratos altos dominaron *I. colombiana* y *H. ferruginea*. El estrato arbustivo es el más vigoroso, dominado por *H. obtusifolia*, *M. latifolia* y *L. schultzii*, y también se entremezclaban las cañas de *C. tessellata*. En el estrato herbáceo se encontraron *Cavendishia bracteata*, *P. loxense*, *D. spinosa*, *E. hartwegiana*, *Miconia melanodesma* y *Monnina salicifolia*. En el estrato rasante aparecían *Ugni myricoides*, *J. rotundifolia* y briofitos, especialmente *Lepicolea pruinosa* y *Campylopus* sp. En un levantamiento (50 m²) se registraron 22 especies.

Distribución-ecología: páramo de Chile (Pijao), Quindío, 3.700 m. A 3.600 m de altitud los elementos arbóreos alcanzan 12-15 m de altura; se encontraron como asociadas *Morella parvifolia*, *Gaiadendron punctatum*, *M. dependens* y especies de *Gynoxys* y de *Tibouchina*. (Tabla 6)

Patrón de riqueza

En la tabla 7 se incluye el número de especies según asociación, alianza, orden y clase y su relación con el área o superficie total muestreada (el índice de riqueza). Entre los dos órdenes caracterizados en la vegetación abierta de páramo, el de los chuscales-frailejonales

Tabla 6. Composición florística de bosques achaparrados

A. Comunidad de <i>Alnus acuminata</i>		B. Comunidad de <i>Hesperomeles ferruginea</i> e <i>Ilex colombiana</i>	
Levantamiento	R 54-89	Levantamiento	R 61-89
Altitud (m)	3200	Altitud (m)	3700
Área (m ²)	80	Área (m ²)	50
Localidad	Chili	Localidad	Chili
Cobertura (%)		Cobertura (%)	
Comunidad de <i>Alnus acuminata</i>		Comunidad de <i>Hesperomeles ferruginea</i> e <i>Ilex colombiana</i>	
<i>Chusquea tessellata</i>	15	<i>Miconia latifolia</i>	40
<i>Alnus acuminata</i>	6	<i>Ilex colombiana</i>	10
<i>Freziera canescens</i>	5	<i>Greigia exserta</i>	10
<i>Saurauia</i> sp.	5	<i>Linochilus schultzei</i>	5
<i>Andesanthus lepidotus</i>	5	<i>Chusquea tessellata</i>	5
<i>Vallea stipularis</i>	5	<i>Hesperomeles obtusifolia</i>	5
<i>Aetanthus nodosus</i>	2	<i>Hesperomeles ferruginea</i>	8
<i>Boconia frutescens</i>	2	<i>Cavendishia bracteata</i>	5
<i>Morella pubescens</i>	2	<i>Lepicolea pruinosa</i>	5
<i>Miconia latifolia</i>	1	<i>Parablechnum loxense</i>	2
<i>Baccharis macrantha</i>	1	<i>Desfontainia spinosa</i>	2
<i>Cestrum buxifolium</i>	1	<i>Ugni myricoides</i>	2
<i>Macleania rupestris</i>	1	<i>Espeletia hartwegiana</i>	1
<i>Monochaetum myrtoideum</i>	1	<i>Miconia melanodesma</i>	1
<i>Elaphoglossum</i> sp.	0,5	<i>Monnina salicifolia</i>	1
<i>Chaetogastra mollis</i>	5	<i>Themistoclesia</i>	1
		<i>Campylopus</i> sp.	1
		<i>Jamesonia rotundifolia</i>	0,5

Tabla 7. Patrón de riqueza: número de especies, área de muestreo e índice de riqueza en las unidades de vegetación caracterizadas

Orden	Alianza	Asociaciones	Área total m ²	T. spp	IR (sp/m ²) x10 ⁻²
<i>Hyperico laricifolii-Calamagrostietalia effusae</i>	<i>Chusqueo tessellatae-Espeletion hartwegianae</i>	<i>Castillejo fissifoliae-Chusqueetum tessellatae</i>	112	35	31,25
		<i>Hyperico ruscoidis-Chusqueetum tessellatae</i>	71	31	43,66
		Total alianza	183	50	27,32
	<i>Calamagrostion recto-effusae</i>	<i>Hypochaerido radicatae-Calamagrostietum rectae</i>	112	63	56,25
		<i>Monticalio vaccinioidis-Loricarietum colombianae</i>	150	30	20
		<i>Comunidad de Xenophyllum humile</i>	32	22	68,75
		Total alianza	294	84	28,57
		Total orden	477	111	23,27
ND	<i>Colobantho quitensis-Agrostion magellanicae</i>	<i>Laestadio muscicolae-Colobantheum quitensis</i>	4	21	525

y pastizales del *Hyperico laricifolii-Calamagrostietalia effusae* registró el mayor número de especies (111) y un índice de riqueza de $23,2 \times 10^{-2}$ (especie/m²). Los índices de riqueza de las dos alianzas, la de los chuscales frailejonales de *Chusqueo tessellatae-Espeletion hartwegianae* (IR $27,3 \times 10^{-2}$) y los pastizales de *Calamagrostion recto-effusae* (IR $28,5 \times 10^{-2}$), son parecidos. El otro orden, *Hypochaerido sessiliflorae-Plantaginetalia rigidae*, con la alianza *Hyperico lancioidis-Plantaginion rigidae*, tiene un índice de riqueza muy alto ($176,4 \times 10^{-2}$), valor probablemente relacionado con la forma de crecimiento de las especies asociadas en estos cojines.

En la vegetación cerrada (bosques achaparrados) del orden *Miconio salicifoliae-Polylepidetalia quadrijugae* y de la alianza *Ribeso leptostachi-Polylepidion sericeae* el IR (16×10^{-2}) fue el más bajo.

En cuanto a asociación en las unidades caracterizadas en la respectiva superficie total muestreada, los mayores valores de índice de riqueza se presentaron en la vegetación de los cojines compactos y laxos, como los prados del *Lupino microphyllae-Colobantheum quitensis*, los de *Hyperico lancioidis-Plantaginietum rigidae* y los pastizales azules *Agrostis magellanica* y *Racomitrium crispulum*, en los cuales pequeñas áreas de muestreo (4-17 m²) arrojaron valores muy altos si se les compara con los de los otros tipos de vegetación.

Estos resultados ilustran una vez más las bondades del enfoque fitosociológico para diferenciar claramente patrones de riqueza según la forma de crecimiento de las especies dominantes, con lo cual se evitan generalizaciones y se facilitan interpretaciones más ajustadas a las condiciones naturales del medio.

Consideraciones finales

La clasificación fitosociológica de la vegetación según las áreas de estudio (páramo de Chile, nevado del Quindío) comprendió:

Región del Páramo (3600-4320 m)

Clase *Espeletio hartwegianae-Calamagrostietea effusae*

Orden *Hyperico laricifolii-Calamagrostietalia effusae*

Alianza *Chusqueo tessellatae-Espeletion hartwegianae*

Asociación *Castillejo fissifoliae-Chusqueetum tessellatae*

Asociación *Hyperico ruscoidis-Chusqueetum tessellatae*

Alianza *Calamagrostion recto-effusae*

Asociación *Hypochaerido radicatae-Calamagrostietum rectae*

Asociación *Monticalio vaccinioidis-Loricarietum colombianae*

Comunidad de *Xenophyllum humile*

Clase, orden y alianza no definidos

Cojines compactos de *Distichia muscoides* y *Monticalia vaccinioides*

Clase y orden no definidos

Alianza *Colobantho quitensis-Agrostion magellanicae*

Asociación *Laestadio muscicolae-Colobantheum quitensis*

Asociación *Lupino microphyllae-Colobantheum quitensis*

Alianza no definida

Comunidad de *Draba alyssoides* y *Cortaderia bifida*

Clase *Oritrophi limnophili-Plantaginetea rigidae*

Orden *Hypochaerido sessiliflorae-Plantaginetalia rigidae*

Alianza *Disterigmo empetrifoli-Plantaginion rigidae*

Asociación *Hyperico lancioidis-Plantaginietum rigidae*

Clase *Polylepidetea quadrijugo-sericeae*

Orden *Miconio salicifoliae-Polylepidetalia quadrijugae*

Alianza *Ribeso leptostachi-Polylepidion sericeae*

Asociación *Linochilo tenuifoliae-Polylepidetum sericeae*

Clase, orden y alianza no definidos

Comunidad del bosque de *Escallonia myrtiloides* e *Hypericum laricifolium*
Comunidad del bosque de *Hesperomeles ferruginea* e *Ilex colombiana*
Comunidad del herbazal de *Culcitium canescens* y *Lasciocephalus ovatus*

Franja alto-andina y en la zona de transición con el páramo (3200-3300 m)

Clase, orden y alianza no definidos

Comunidad del bosque de *Alnus acuminata*

Aspectos sintaxonómicos

Clase *Espeletio hartwegiana*-*Calamagrostietea effusae* y orden *Hyperico laricifolii*-*Calamagrostietalia effusae*. Las unidades de vegetación que se incluyen y describen en estos sintaxones habían sido reseñadas inicialmente por **Cuatrecasas** (1934, 1958), **Sturn & Rangel-Ch.** (1985) y por **Salamanca et al.** (2003) en los páramos de la cordillera Central, P.N.N. Los Nevados; por **Restrepo & Duque** (1992) en el complejo de páramos Guanacas-Puracé-Coconucos (Cauca) y los páramos del complejo volcánico de Nariño: Galeras, Cumbal, Azufral (**Rangel**, 2000). Sin embargo, no existía una definición precisa de sus estatus sintaxonómico, ni se conocían tablas con la composición florística detallada. En esta contribución se delimitan las unidades y se complementan las observaciones ecológicas para las jerarquías superiores que reúnen la vasta diversidad de frailejonales, matorrales, chuscales y herbazales de la cordillera Central y del Macizo Central.

En la clase y el orden se reúnen dos tipos de formaciones, los chuscales-frailejonales de la alianza *Chusqueo tessellatae*-*Espeletion hartwegiana*, que se establece en áreas muy húmedas, encharcadas, tal como lo hacen los diferentes chuscales en las cordilleras Oriental y Occidental de Colombia (**Rangel**, 2018).

El otro tipo de formación son los pastizales de la alianza *Calamagrostion recto-effusae*, la cual es muy distintiva de la vegetación paramuna de esta cordillera, ya que no se han encontrado en otros páramos de Colombia áreas tan extensas dominadas por pastizales de *C. recta* con sus macollas de hasta 1 m de altura.

Aspectos sinecológicos

La consolidación de la información sobre la caracterización florística de la vegetación del páramo y las síntesis que aparecieron en la memoria técnica para el mapa de la vegetación natural de Colombia (**Rangel & Suárez**, 2022) y en la disertación doctoral de **Pinto-Z** (2023), facilita una discusión ilustrada sobre la corología y los rasgos ecológicos de la mayoría de las especies características dominantes de las unidades de vegetación que se caracterizaron en los páramos de Chile y del nevado del Quindío, así:

Cojines compactos y laxos

Distichia muscoides. Forma cojines compactos que se distribuyen en las zonas de alta montaña de Suramérica desde Argentina hasta Colombia; sus relaciones ecológicas y aspectos fitogeográficos fueron reseñados por **Cleef** (1980). En Colombia estos cojines son frecuentes desde el páramo medio hasta el superpáramo. En la clase *Oritrophio peruviani*-*Valerianetea microphyllae*, en el orden *Oritrophio peruviani*-*Valerianetalia microphyllae* y en la alianza *Lupino alopecuroidis*-*Valerianon microphyllae* figuran las asociaciones *Distichio muscoides*-*Lupinetum expetendi*, establecidas en cubetas terrizadas o en áreas pantanosas en Puracé, Pilimbalá, camino al volcán de Puracé entre los 3.950 y los 4.360 m y *Alchemillo pectinatae*-*Distichetum muscoidis* en Puracé, valle del Paletará, entre los 3.600 y los 3.980 m.

Hace parte de la clase *Oritropho limnophili*-*Plantaginetea rigidae*, del orden *Hypochaerido sessiliflorae*-*Plantaginetalia rigidae* y de la alianza *Hyperico lancioideis*-*Plantaginion rigidae*, con la asociación *Oritropho limnophili*-*Distichetum muscoides*, que arraiga en cubetas terrizadas en el P.N.N. Los Nevados, en los nevados de Santa Isabel, El Cisne, Arenales, y el nevado del Ruiz, entre los 4.080 y los 4420 m (**Salamanca**, 1991). Asimismo, figura en la clase *Disterigmo empetrifoli*-*Xenophylletea humilis*, en el

orden *Alchemillo hispidulae-Xenophylletalia humilis* y en la alianza *Linochilo rupestris-Plantaginion rigidae* con la asociación *Distichio muscoidis-Plantaginetum rigidae* en sitios planos, pantanosos, en turberas en el volcán Chiles entre los 3.850 y los 4.100 m. En la cordillera Oriental, Sierra Nevada del Cocuy, se ha encontrado en cubetas y lagunetas y ampliamente extendida la asociación *Floscaldasio hypsophillae-Distichietum muscoides* (Cleef, 1981), cuyas relaciones sintaxonómicas no han sido definidas.

Plantago rigida. Crece en colchones laxos y compactos y se extiende desde Bolivia y Perú (Cleef, 1980; Rivas-Martínez & Tovar, 1982) hasta Venezuela. En Colombia se establece en los valles glaciares, en lagunas y lagunetas desde el páramo medio hasta el superpáramo en las tres cordilleras. Exhibe una amplia valencia ecológica, lo cual ha significado que figure como especie característica dominante en diferentes clases fitosociológicas, algunas con representación en las cordilleras Central y Oriental, como *Oritrophi limnophili-Plantaginetea rigidae*, en el orden *Hypochaerido sessiliflorae-Plantaginetalia rigidae*, la alianza *Hyperico lancioidis-Plantaginion rigidae* con las asociaciones *Sisyrinchio trinervis-Plantaginetum rigidae* en sitios planos, muy húmedos y en cubetas terrizadas, en Tolima, Santa Isabel, P.N.N. Los Nevados, nevados de Santa Isabel, El Cisne, Arenales, y nevado del Ruiz entre los 3.970 y los 4.230 m. Es igualmente dominante en la cordillera Oriental en las asociaciones *Oritrophi limnophili-Plantaginetum rigidae* y *Oreobolo cleefii-Plantaginetum rigidae*, que crecen en sitios planos, ligeramente inclinados en Boyacá, Duitama, páramo de La Rusia entre los 3.720 y los 3.810 m (Pinto-Z., 2005).

En la clase *Hyperico lancioidis-Calamagrostietea effusae* y en el orden *Hyperico lancioidis-Plantaginetalia rigidae*, en el páramo de Belén (cordillera Oriental) entre los 3.500 y los 3.700 m se establecen los cojines de *Plantago rigida* y *Sphagnum* cf. *magellanicum*. En la cordillera Occidental en la misma clase y orden se incluyen las alianzas *Orithropio peruviani-Plantaginion rigidae* con las asociaciones *Phlegmariuro cruenti-Plantaginetum rigidae* y *Disterigmo empetrifoli-Plantaginetum rigidae* en lagunetas terrizadas, en Risaralda, Pueblo Rico, Tatamá, entre los 3.400 y los 3.560 y *Disterigmo empetrifoli-Plantaginion rigidae* con la asociación *Halenio foliosae-Plantaginetum rigidae* en cubetas terrizadas, sitios planos, húmedos en Antioquia, Urrao, páramo de Frontino, Puente Largo, entre los 3.550 y los 3.630 m.

En la clase *Espeletio hartwegiana-Calamagrostietea effusae*, en el orden *Calamagrostio rectae-Espeletietalia hartwegiana* (cordillera Central) y en la alianza *Festuco dolichophyllae-Calamagrostion effusae*, figura el pajonal-herbazal de *Plantago rigida* y *Festuca dolichophylla* que se establece en sitios planos, húmedos, en Caldas, Villamaría, P.N.N. Los Nevados, nevados de Santa Isabel, El Cisne, entre los 4.100 y los 4.250 m.

En la clase *Disterigmo empetrifoli-Xenophylletea humilis*, el orden *Alchemillo hispidulae-Xenophylletalia humilis* y la alianza *Linochilo rupestris-Plantaginion rigidae* en los volcanes del sur del país, Cumbal, Chiles, se caracterizó la asociación *Distichio muscoidis-Plantaginetum rigidae* en sitios planos, pantanosos y turberas.

Xenophyllum humilis. Es una especie dominante en varios tipos de cojines de la clase *Oritrophi limnophili-Plantaginetea rigidae*, del orden *Hypochaerido sessiliflorae-Plantaginetalia rigidae* y de la alianza *Hyperico lancioidis-Plantaginion rigidae*, así: en la cordillera Central (P.N.N. Los Nevados) en la asociación *Carici peucophilae-Xenophylletum humili*, entre los 4.000 y los 4.400 m en cubetas y sitios encharcados. En la cordillera Oriental, P.N.N. Chingaza, embalse de Chuza, páramo de Palacio, entre los 3.575 y los 3.790 m en la asociación *Xenophyllo humili-Oreoboletum venezuelensis*. En la Sierra Nevada del Cocuy y en los páramos de Belén y Pisba, entre los 3.500 y 3.925 m se encontraron los cojines laxos (tipo prado) con *Cotula mexicana* y *Xenophyllum humilis*. En la clase *Disterigmo empetrifoli-Xenophylletea humilis*, en el orden *Alchemillo hispidulae-Xenophylletalia humilis* y en la alianza *Bartsio orthocarpiflorae-Hypochaeridion sessiliflorae* figuró la asociación *Agrostio magellanicae-Xenophylletum humili* en suelos sueltos, pedregosos en los volcanes del sur (Galeras) entre los 4.100 y los 4.250 m (Erazo et al., 1991; Rangel, 2000).

Prados con *Laestadia muscicola*. Es una especie dominante en los prados de sitios encharcados y en el estrato rasante de los frailejonales de la asociación *Laestadio muscicolae-Espeletietum lopezii*, que arraiga en sitios planos húmedos en los valles glaciares de la Sierra Nevada del Cocuy, laguna Grande de los Verdes, alrededores del nevado Ritacuba Negro, entre los 4.000 y 4.100 m, que se adscribió a la alianza *Espeletio colombianae-Calamagrostion effusae* del orden *Espeletio colombianae-Calamagrostietalia effusae* y la clase *Espeletio colombianae-Calamagrostietea effusae*. En el nevado del Quindío se caracterizó la alianza *Colobantho quitensis-Agrostion magellanicae* con las asociaciones *Laestadio muscicolae-Colobanthesetum quitensis* y *Lupino microphyllae-Colobanthesetum quitensis*. Estas dos fitocenosis nuevas enriquecen el conocimiento sobre la ecología de los herbazales (prados) dominados por *Colobanthus quitensis*, inicialmente registrados en Colombia por Aguirre *et al.* (1982) en localidades de la cordillera Oriental (páramos del Almorzadero, y la Sierra Nevada del Cocuy).

Matorrales bajos de *Loricaria colombiana*. Esta especie, con sus tallos de tonos cobrizos, confiere distintividad al paisaje en la transición entre el superpáramo y la franja nival de nuestros macizos montañosos-volcanes. Los matorrales bajos en los cuales domina ampliamente crecen en abrigos formados por rocas pequeñas y guijarros que les brindan protección, especialmente en las noches, cuando las temperaturas descienden por debajo de los 0 °C en la zona periglacial. La especie exhibe una amplia valencia ecológica que le permite estar representada en la mayoría de los macizos volcánicos del centro, sur y occidente del país. En la clase *Espeletio hartwegianae-Calamagrostietea effusae*, en el orden *Agrostion magellanicae-Calamagrostietalia rectae* y en la alianza *Clinopodio nubigeni-Calamagrostion rectae* se agrupó el matorral de *Loricaria colombiana* y *Monticalia gelida*, frecuente en el P.N.N. Los Nevados, en los volcanes de Santa Rosa y Santa Isabel, entre los 4.330 y 4.400 m (Salamanca *et al.*, 2003). En la clase *Bromo lanati-Agrostietea magellanicae*, en el orden *Hypochaerido sessiliflorae-Agrostietalia magellanicae* y en la alianza *Festuco brevistaratae-Agrostion magellanicae* figuró la asociación del matorral *Linochilo eriophori-Loricarietum colombianae*, que crece en laderas inclinadas, arenosas del P.N.N. Los Nevados, nevados de Arenales y del Ruiz, entre los 4.275 y 4.450 m. En la clase *Disterigmo empetrifoli-Xenophylletea humilis*, el orden *Alchemillo hispidulae-Xenophylletalia humilis* y la alianza *Loricario colombianae-Disterigmion empetrifoli*, figuró el matorral de *Loricaria colombiana* y *Epidendrum frutex* que crece en sitios ligeramente inclinados en laderas del volcán Azufral en Túquerres (Nariño), entre los 3.500 y 3.600 m.

Rosetales con *Culcitium (Senecio) canescens*. Es una especie típica de los ambientes abrigados y rocosos del superpáramo y de la zona periglacial. Es característica dominante de la alianza *Bromo lanati-Culcitium canescens* del orden *Hypochaerido sessiliflorae-Agrostietalia magellanicae* y de la clase *Bromo lanati-Agrostietea magellanicae* en el P.N.N. Los Nevados, los nevados Cisne-Santa Isabel, Tolima, entre los 4.100 y 4.500 m (Salamanca *et al.*, 2003). También es característica dominante en la asociación *Culcitium canescens-Cerastietum floccosi*, herbazal que crece en suelos sueltos y arenosos en los nevados de Santa Isabel y El Cisne entre los 4.400 y 4.550 m; hace parte de la alianza *Erigeron chionophili-Hypochaeridion sessiliflorae*, del orden *Hypochaerido sessiliflorae-Cerastietalia floccosae* y de la clase *Agrostion foliatae-Cerastietea floccosae*.

Quizá el primer registro histórico de la importancia ecológica de *C. canescens* (*rufescens*) fue el de Cuatrecasas (1934), bajo la denominación de *Culcitietum rufescens-Agrostiosum*, rosetales en el nevado del Tolima.

Matorrales y bosques achaparrados

Escallonia myrtilloides se establece desde la franja alta de la región Andina hasta el páramo medio (3500-3810 m); en la primera es especie característica dominante en varias fitocenosis que se agruparon en el orden *Escallonio myrtilloidis-Weinmannietalia mariquitae* de la clase *Escallonio myrtilloidis-Weinmannietea mariquitae*, y se caracterizaron en localidades de Risaralda, Santuario, entre los 2.860 y 3.700 m, en Chocó, San José del Palmar, laguna el

Encanto entre 3420 y 3400 m, sobre sitios inclinados con deslizamientos y en sitios planos. Es especie dominante en la asociación *Drymo granadensis-Escallonietum myrtilloides* de la alianza *Drymo granadensis-Weinmannion microphyllae*, del orden *Drymo granadensis-Weinmannietalia tomentosae* y de la clase *Weinmannietea microphylo-tomentosae*, en bosques de la franja altoandina del P.N.N. Chingaza entre los 3.200 y 3.400 m, donde crecen en terrenos escarpados, muy inclinados (Vargas & Rivera, 1991).

En el páramo, *E. myrtilloides* constituye parches de bosques en medio de la matriz de pastizales o de chuscales y, excepcionalmente, entre frailejonales, así: en el matorral de la asociación *Hyperico laricifoli-Escallonietum myrtilloides* de la alianza *Calamagrostio rectae-Monticalion vernicosae*, del orden *Calamagrostio rectae-Espeletietalia hartwegiana* y la clase *Espeletio hartwegiana-Calamagrostietea effusae*, conformando una vegetación que crece en la base de morrenas y sobre flujos de lavas en el P.N.N. Los Nevados, los nevados de Santa Isabel y El Cisne entre los 3.800 y 4.140 m (Salamanca et al., 2003). Es dominante también en el rosetal-matorral de la asociación *Parablechno loxensis-Escallonietum myrtilloides*, del orden *Hyperico laricifoli-Chusqueetalia tessellatae* y la clase *Orthrosantho chimboracensis-Calamagrostietea effusae*; crece en sitios planos, encharcados, en el páramo de La Rusia (Boyacá, Duitama) entre los 3.550 y 3.670 m (Sturm & Rangel, 1985). La especie también es característica-dominante en el pastizal-matorral de la asociación *Calamagrostio effusae-Escallonietum myrtilloides*, alianza *Linochilo rupestris-Chusqueion tessellatae* del orden *Loricario complanatae-Chusquetalia tessellatae* y clase *Chusqueo tessellatae-Calamagrostietea effusae*, en vegetación que crece en planos húmedos y vallecitos en Chocó-Risaralda, Pueblo Rico, Tatamá, Mirilas, entre los 3.700 y 3.950 m (Cleef et al., 2005).

Polylepis sericea. Era la especie con mayor área de distribución en los páramos de los volcanes del sur de Colombia (Cumbal) y en las cordilleras Central y Occidental. También se reconocía *P. quadrijuga*, con distribución en el páramo de Frontino, en Boyacá y en áreas cercanas a Bogotá (Simpson, 1979). Las poblaciones de Frontino ahora se agruparon bajo el nombre de *Polylepis frontinoensis* y las del volcán Cumbal bajo el de *Polylepis ochreatea* (Boza & Kessler, 2022). En la cordillera Central, P.N.N. de Los Nevados, en el sector del cráter Arenales y en el valle de Potosí, nevado del Ruiz, entre los 4.000 y 4.300 m, se establecen entre roquedales los bosques achaparrados de la asociación *Linochilo violacei-Polylepidetum sericeae* (Salamanca et al., 2003) y de la comunidad de *Polylepis sericea* y *Gynoxys pendula*, de la alianza *Ribeso leptostachi-Polylepidion sericeae*, que en esta contribución se adscriben al orden *Miconio salicifoliae-Polylepidetalia quadrijugae* y la clase *Polylepidetia quadrijugo-sericeae*.

Estos bosques son las comunidades vegetales con elementos leñosos que alcanzan mayor elevación en localidades típicamente paramunas; crecen en parches sobre roquedales producto de la acción de las lenguas glaciares (Flórez, 1989), lo cual originó la discontinuidad del área de distribución original y dejó poblaciones aisladas. Los bosques constituyen un refugio con condiciones microclimáticas muy particulares (conservación de calor en las horas de la noche, evasión de heladas), por lo cual es un sitio de trascendental importancia para el desarrollo de las funciones vitales de otras especies de flora y de la fauna asociada del páramo. Lamentablemente, el uso constante de su madera ha empobrecido su composición y sus aspectos de estructura y arquitectura, transformándose en algunos casos en bosques muy abiertos. Sufren demasiado cuando se presentan los incendios provocados en los páramos. Algunos aspectos de su historia natural y su paleoecología fueron discutidos por Rangel & Arellano (2010).

Hesperomeles ferruginea. Es la especie arbórea dominante en los bosques que alcanzan mayor altitud en las tres cordilleras de Colombia y en los macizos montañosos del Caribe, Sierra Nevada de Santa Marta y Serranía de Perijá (Rivera, 2007). Los bosques mejor documentados en cuanto a su composición florística y aspectos de la estructura, se establecen en la cordillera Central, P.N.N. Los Nevados, vertiente oriental, con la gran formación (orden) de los bosques de *Hesperomeles ferruginea* y especies de *Gynoxys* y

la alianza *Gynoxyo baccharoidis-Hesperomelion ferruginae* que agrupa bosques bajos y bosques ralos, abiertos entre los 3.315 y 3.750 m en sitios planos, muy húmedos, por ejemplo, en alrededores de la quebrada África en el valle del Totarito, Santa Isabel, Tolima (Rangel, 2000). En la cordillera Occidental, en Dabeiba, Antioquia, en laderas y sitios planos a 3.000 m se han establecido los bosques de *Freziera* cf. *verrucosa* y *Hesperomeles ferruginea*, de la formación (alianza) y la gran formación (orden) de los bosques de *Hesperomeles ferruginea* y especies de *Clethra*. Otros bosques con individuos de más de 20 m de altura de *H. ferruginea* han sido caracterizados en la Sierra Nevada de Santa Marta, en los filos y en las cañadas del costado norte entre los 3.100 y 3.300 m con la asociación *Hesperomelo ferruginae-Myrcianthetum ternifoliae* de la alianza *Cybiantho iteoidis-Weinmannion pinnatae*, orden *Chusio multiflorae-Weinmannietalia pinnatae* y clase *Chusio multiflorae-Weinmannietea pinnatae*.

En la Serranía de Perijá se caracterizó la asociación *Paraginioxio martingrantii-Hesperomeletum ferruginae* de la alianza *Ilici sessiliflorae-Hesperomelion ferruginae* y orden *Viburno triphylo-Hesperometalia ferruginae*, establecida en sitios inclinados en localidades del Cesar, Manaure y Sabana Rubia entre los 2.950 y 3.000 m, y en San Alberto, Vda. Monte Negro y Alto Centella a 2.674 m (Rangel, 2018). También se caracterizaron bosques achaparrados con individuos de 5-7 m de altura, como los de la asociación del Quindío con *Hesperomeles ferruginea* e *Ilex colombiana*, en Cucutilla, Norte de Santander, Parque Nacional Regional Sisavita, vereda Carrizal, entre los 3.400 y 3.500 m, donde crecen en laderas ligeramente inclinadas en la asociación *Hesperomelo ferruginae-Ilicetum ellipticae* de la formación (alianza) de *Ilex elliptica* y *Hesperomeles ferruginea* (Galván & Ortiz, 2002).

Alnus acuminata. Forma bosques casi homogéneos con expresión máxima de su dominancia (tipo rodal); son frecuentes en las orillas de las quebradas y de las lagunas y lagunetas de la región andina. Rangel & Suárez (2022) se refirieron a estos bosques, que se establecen de manera continua alrededor del lago de Tota (Boyacá). Otras especies arbóreas frecuentes son *Viburnum tinoides*, *Oreopanax floribundum* y *W. microphylla*. En comparación con los bosques de *A. acuminata* del Quindío, comparten muy pocas especies (*A. acuminata* y *V. stipularis*).

Conclusiones

Las áreas geográficas que se cubrieron en este estudio (páramo de Chile, Pijao y nevado del Quindío, Salento) presentan vegetación típica de la región del páramo de Colombia. Entre las unidades sintaxonómicas compartidas en las dos áreas figura la clase *Espeletio hartwegiana-Calamagrostietea effusae* y el orden *Hyperico laricifolii-Calamagrostietalia effusae*, inicialmente documentadas en los nevados de Santa Isabel, Santa Rosa, Ruiz, el macizo central (volcán del Puracé) y los páramos de Nariño. Como novedades sintaxonómicas, pero con distribución geográfica diferente, se caracterizaron en el páramo de Chile entre los 3.700 y 3.800 m, sobre sitios húmedos–encharcados, los chuscales de la alianza *Chusqueo tessellatae-Espeletion hartwegiana* con las asociaciones *Castillejo fissifoliae-Chusqueetum tessellatae* e *Hyperico ruscoideis-Chusqueetum tessellatae*. En el nevado del Quindío, entre los 3.740 y 4.200 m, se estableció la alianza *Calamagrostion recto-effusae* con las asociaciones *Hypochoerido radicatae-Calamagrostietum rectae*, *Monticalio vaccinioidis-Loricarietum colombiana* y la comunidad de *Xenophyllum humile*.

La clase *Oritrophi limnophili-Plantaginetea rigidae* y el orden *Hypochoerido sessiliflorae-Plantaginetalia rigidae*, cojines compactos que constituyen las fases finales en el proceso de colmatación de lagos y lagunetas del páramo, está representada en las dos áreas estudiadas con la alianza *Hyperico lancioidis-Plantaginion rigidae* y la asociación *Hyperico lancioidis-Plantagineteum rigidae*, entre los 3.650 y 4.150 m. Otros tipos de vegetación presentes en las dos áreas de estudio corresponden a los bosques ralos y matorrales altos de *Escallonia myrtiloides* e *Hypericum laricifolium* entre los 3.500 y 3.810 m y el bosque de *Alnus acuminata* entre los 3.200 y 3.300 m.

En el nevado del Quindío (Salento), entre los 3.760 y 3.900 m, se caracterizaron los bosques de la clase *Polylepidetea quadrijugo-sericeae*, orden *Miconio salicifoliae-Polylepidetalia quadrijugae* y alianza *Ribeso leptostachi-Polylepidion sericeae* con la asociación *Linochilo tenuifoliae-Polylepidetum sericeae*. En el páramo alto-superpáramo, entre los 3.750 y 4.250 m, se han establecido los cojines compactos de *Distichia muscoides* y *Monticalia vaccinioides*, los prados de la alianza *Colobantho quitensis-Agrostion magellanicae* con las asociaciones *Laestadio muscicolae-Colobanthesetum quitensis* y *Lupino microphyllae-Colobanthesetum quitensis* y los herbazales de *Draba alyssoides* y *Cortaderia bifida*. En la parte más alta (4280-4320 m), sobre suelos esqueléticos en los arenales, arraigan el pastizal azul de *Agrostis magellanica* y *Racomitrium crispulum* y el herbazal de *Culcitium canescens* y *Lasciocephalus ovatus*.

En el páramo de Chile (Pijao), a 3.700 m, se establecieron los bosques achaparrados de *Hesperomeles ferruginea* e *Ilex colombiana*.

El mayor número de unidades de vegetación se caracterizó en el área del nevado del Quindío, cuyo gradiente altitudinal es más amplio que el del páramo de Chile, resultado que confirma nuevamente lo expuesto por **Sturm & Rangel-Ch.** (1985) y **Rangel-Ch.** (2000, 2018), sobre el papel fundamental de la topografía (gradiente altitudinal) en la expresión del patrón de riqueza vegetal en los páramos de Colombia.

La información que se presenta fue básica para adelantar la fase de cartografía temática del proyecto “Mapa de la vegetación natural de Colombia” (**Rangel & Suárez,** 2022), en lo que concierne a los páramos del Quindío. Las áreas cubiertas en nuestro tratamiento están cobijadas en la resolución que creó el Parque Los Nevados. En el sector de Chile, las áreas de la franja altoandina (3200-3300 m) están bajo la influencia de la ganadería extensiva promovida por los pobladores cercanos y serían las más expuestas a las oscilaciones de las condiciones del clima (**Moreno et al.,** 2022) ante un escenario relacionado con los movimientos de las líneas naturales de distribución de la vegetación por efecto de afectaciones promovidas por el hombre (cambio climático).

Información suplementaria

Ver información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2603/4464>

Agradecimientos

Al Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia. J. Luteyn agradece a USA National Science Foundation por el apoyo económico para el trabajo de campo. Las sugerencias de dos de los evaluadores ayudaron a consolidar aspectos del documento.

Contribución de los autores

J.O.R.C. participó en las exploraciones de campo, la determinación taxonómica del material, el análisis de la información y la elaboración del manuscrito. J.H.P.Z. participó en el análisis de la información y la revisión nomenclatural de las unidades de vegetación. J.L. participó en las exploraciones de campo, la determinación taxonómica del material, la revisión de las versiones iniciales y la actualización nomenclatural.

Conflicto de intereses

Los autores declaramos que no tenemos ningún conflicto de intereses personal ni institucional.

Referencias

- Aguirre-C., J., Rangel-Ch., J.O., Cleef, A.M., Hooghiemstra, H.** (1982). *Colobanthus quitensis* (H.B.K.) Bartl. (Caryophyllaceae) en los Andes Colombianos. *Caldasia*, 13(63), 367-377.
- Boza-E., T.E. & Kessler, M.** (2022). A monograph of the genus *Polylepis* (Rosaceae). *PhytoKeys*, 203, 1-274.

- Braun-Blanquet, J.** (1979). *Fitosociología: Bases para el Estudio de las Comunidades Vegetales*. H. Blume editores. Madrid.
- Cleef, A.M.** (1980). La vegetación del páramo neotropical y sus lazos australo-antárticos. *Colombia Geográfica* 7(2), 68- 86. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Cleef, A.M.** (1981). The vegetation of the páramos of the Colombian cordillera Oriental. *Tesis de doctorado*. Universidad de Utrecht, Utrecht. Holanda.
- Cleef, A.M., Rangel-Ch., J.O., Salamanca, S., Ariza, C.L., van Reenen, G.B. A.** (2005). La vegetación del páramo del macizo de Tatamá (cordillera Occidental, Colombia). En T. Van der Hammen, J.O. Rangel-Ch. y A.M. Cleef (eds). *Estudios de Ecosistemas Tropandinos-Ecoandes 6. La cordillera Occidental, transecto de Tatamá* (pp. 377-458). J. Cramer (BORNTRAEGER), Berlín-Stuttgart.
- Cuatrecasas, J.** (1934). Observaciones geobotánicas en Colombia. *Trab. Museo Nacional Ciencias Naturales, Serie Bot.*, 27, 144. Madrid.
- Cuatrecasas, J.** (1958). Aspectos de la vegetación natural de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 10(40), 221-268.
- Erazo, G.H., Guatusmal, C.A., Delgado, L.A., Montenegro, L.M.** (1991). Caracterización de la vegetación paramuna de los volcanes Azufral y Galeras. *Trabajo de grado de la especialización en Ecología*. Escuela de Posgrado de la Universidad de Nariño. 241 pp.
- Flórez, A.** (1989). Evidencias de inestabilidad en los sistemas morfogénicos de alta montaña. *Revista Colombia sus Gentes y Regiones* 13, 16-32.
- Galván, S. & Ortiz, N.** (2002). Análisis florístico y estructural de la vegetación del páramo de Sisavita. Norte de Santander. *Tesis de grado*. Universidad Industrial de Santander.
- Izco, J. & Del Arco, M.** (2003). Código internacional de nomenclatura fitosociológica. Materiales Didácticos Universitarios. *Universidad de Laguna, Serie Botánica*, 2, 9-154.
- McCune, B. & Mefford, M.J.** (1997). PC-ORD. Multivariate Analysis of Ecological Data, Version 3.0: Supplement. MjM Software Design, Glenden Beach, Oregon, USA.
- Moreno, C., Palma, J.D., Trilleras, J.M., Salamanca, J.A.** (2022). Vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán, Colombia, a los incrementos de temperatura en un escenario de cambio climático. *Revista Geográfica*, 164, 21-37.
- Pinto-Z., J.** (2005). Síntesis fitosociológica de la vegetación azonal del páramo de la Cordillera Oriental de Colombia. *Tesis de grado*. Instituto de Ciencia Naturales. Universidad Nacional de Colombia.
- Pinto-Z., J.** (2023). La vegetación de la región de vida paramuna colombiana: con énfasis en la cordillera Central y los Andes Centrales. *Tesis de Doctorado*. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Rangel-Ch., J.O.** (2000). La Diversidad Beta: Tipos de vegetación. En J.O. Rangel-Ch. (ed.). *Colombia Diversidad Biótica III. La región de vida paramuna* (pp. 658-719). Instituto de Ciencias Naturales-Instituto Alexander von Humboldt.
- Rangel-Ch., J.O.** (2018). El páramo colombiano: aspectos macroecológicos y ecológicos. En J.O. Rangel-Ch. (ed.). *Colombia Diversidad Biótica XVI. Patrones de riqueza y de diversidad de las plantas con flores en el bioma de páramo* (pp. 83-141). Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales.
- Rangel-Ch., J.O. & Arellano-P., H.** (2010). Bosques de *Polylepis*: un tipo de vegetación condenado a la extinción. En J.O. Rangel-Ch. (ed.). *Colombia Diversidad Biótica X: cambios global (natural) y climático (antrópico) en el páramo colombiano* (pp. 443-477). Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales.
- Rangel-Ch., J.O. & Suárez, C.** (2022). *Memoria técnica del mapa de la vegetación natural de Colombia*. Instituto de Ciencias Naturales – MADS, Ideam, Instituto Alexander von Humboldt, Instituto Sinchi, Instituto de investigaciones aplicadas del Pacífico.
- Restrepo, C. & Duque, A.** (1992). Tipos de vegetación del llano de Paletará. cordillera Central Colombia. *Caldasia*, 17(1), 21-34.
- Rivas-Martínez, S. & Tovar, O.** (1982). Vegetatio Andinae, I. Datos sobre las comunidades vegetales altoandinas de los Andes Centrales del Perú. *Lazaroa*, 4, 167-187.
- Rivera-D., O.** (2007). Caracterización florística de la alta montaña de Perijá. En J.O. Rangel-Ch. (ed.). *Colombia Diversidad Biótica V. La alta montaña de la serranía de Perijá* (pp. 71-132). Instituto de ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, CORPOCESAR, Gobernación del Cesar.

- Salamanca, S.** (1991). The vegetation of the paramo and its dynamics in the volcanic massif Ruiz – Tolima (Cordillera Central, Colombia). *Thesis*, University of Amsterdam. 122 pp.
- Salamanca, S., Cleef, A.M., Rangel-Ch., J.O.** (2003). The Paramo Vegetation. En T. Van der Hammen, A. Dos-Santos (eds). *Estudios de Ecosistemas Tropandinos. Ecoandes 5*. J. Cramer (BORNTRAEGER).
- Sánchez, H., Hernández-C., J., Rodríguez-M., J., Castaño, C.** (1990). Nuevos Parques Nacionales Colombia. Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Medio Ambiente (Inderena) y Fondo FEN Colombia, pp. 176-135.
- Simpson, B.B.** (1979). A revision of the genus *Polylepis* (Rosaceae: Sanguisorbae). *Smithsonian Contribution Botany*, 43, 1-62.
- Sturm, H. & Rangel-Ch., J.O.** (1985). *Ecología de los páramos andinos. Una visión preliminar integrada*. Biblioteca J. Jerónimo Triana. Instituto de Ciencias Naturales.
- Theurillat, J.P., Willner, W., Fernández-G., F., Bültmann, H., Čarni, A., Gigante, D., Mucina, L., Weber, H.** (2020). International Code of Phytosociological Nomenclature. 4th Edition. *Applied Vegetation Science* 24, 1-62. <https://doi.org/10.1111/avsc.12491>
- Vargas, O. & Rivera, D.** (1991). Comunidades vegetales del Parque Nacional Natural Chingaza: sector I Río La Playa – Río Guatiquía (resultados preliminares). *Cuadernos Divulgativos Universidad Javeriana* 23, 1-74.

Original article

Diversity and phorophyte preferences of lichens in the Cerro Machín volcano cloud forest (Tolima, Colombia)

Diversidad y preferencias de forófito de los líquenes en el bosque de niebla del volcán Cerro Machín, Tolima, Colombia

Diego Rincón-Murillo^{1,2}, Diego Simijaca^{2,3}, Héctor Esquivel⁴, Robert Lücking^{2,5},
Bibiana Moncada^{2,5,6}

¹Programa de Biología, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

²Grupo Colombiano de Liquenología (GCOL), Bogotá, Colombia

³Lichen Specialist Group, IUCN Species Survival Commission, Gland, Switzerland

⁴Grupo de Investigación en Biodiversidad y Dinámica de Ecosistemas Tropicales, GIBDET, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

⁵Botanischer Garten und Botanisches Museum Berlin, Freie Universität Berlin, Berlin, Germany

⁶Licenciatura en Biología, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

Abstract

Cerro Machín is located in the municipality of Ibagué. It is a volcano with active fumaroles reaching 2650 m of elevation. Montane forest relics mostly cover it, but the forest in the surroundings has been largely replaced by pastureland. We surveyed its lichenized fungi communities focusing on species composition, community structure, diversity, and phorophyte preferences. Thirty-five of the 113 species observed are new reports for the department of Tolima and six of them for Colombia. The overall species richness is the highest reported in the municipality of Ibagué. In the study area, the forest has a good conservation status indicated by the presence of the genus *Sticta*. We registered an average of seven lichenized fungal species per tree, i.e., a low richness, possibly due to the exhausts of the fumaroles. A beta diversity analysis showed a high percentage of rare species. We found evidence of some preference of lichens for bark characteristics, but we did not observe specificity towards tree species.

Keywords: Lichen biota of Colombia; Andean ecosystems; Central mountain range.

Resumen

El volcán Cerro Machín está ubicado en el municipio de Ibagué; alcanza los 2.650 m de altitud y sus fumarolas están activas. En la mayoría de su área se encuentran relictos de bosque montano, en tanto que en sus alrededores éste ha sido reemplazado sobre todo por pastizales. Nuestro estudio evaluó las comunidades de hongos liquenizados, su composición de especies, la estructura de la comunidad, su diversidad y su preferencia de forófito. De las 113 especies observadas, 35 correspondieron a registros nuevos en el departamento de Tolima, de los cuales seis lo eran también para Colombia. La riqueza total registrada es la más alta que hasta ahora se ha reportado en el municipio de Ibagué. En el área de estudio se encontró un bosque conservado y en buen estado, según lo indicó la presencia del género *Sticta*. Un promedio de siete especies de hongos liquenizados se registró en cada árbol, valores de riqueza bajos que pueden deberse a la emisión de gases de las fumarolas. El análisis de la diversidad beta evidenció una proporción alta de especies raras. También se observó que los líquenes presentaban algunas preferencias características de la corteza, pero no de especificidad de especies de árboles.

Palabras clave: biota líquénica de Colombia; ecosistemas andinos, cordillera Central.

Citation: Rincón-Murillo D, *et al.*
Diversity and phorophyte preferences
of lichens in the Cerro Machín volcano
cloud forest (Tolima, Colombia).
Revista de la Academia Colombiana de
Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
48(189):831-851, octubre-diciembre
de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2638>

Editor: Carolina Romero Hernández

***Corresponding autor:**
Diego Rincón-Murillo;
diegorincomurillo@gmail.com

Received: April 30, 2024

Accepted: October 14, 2024

Published on line: November 7, 2024



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

Introduction

The Cerro Machín Volcano (CMV) is one of the most dangerous in Colombia due to its high potential for outbursts, the extent of its deposits, and the magnitude of its eruptions (Cortés, 2001). Following the Holdridge (1966) classification system, it is situated in the life zones of premontane wet forest (wf-P) and lower montane wet forest (wf-LM) (Servicio Geológico Colombiano, 2007). Andean rainforests are seriously threatened by anthropogenic interventions in Colombia, including wood extraction, agriculture, traffic, and urbanization (Armenteras *et al.*, 2017). Many of these forests have been turned into *Eucalyptus spp.* and *Pinus patula* plantations, with negative effects on the diversity, composition, and structure of lichenized fungi communities (Ardila *et al.*, 2015; Simijaca *et al.*, 2018).

Aguirre *et al.* (2008) reported that the Colombian Andean region harbors 1,396 species of lichens representing 89% of all the species in the country according to the checklist by Sipman *et al.* (2008). More recently, Sipman & Aguirre (2016) reported 1,674 lichen species in Colombia, corrected to 1,672 by Lücking *et al.* (2021). The most recent report considerably increased this number to 2,670 species, placing Colombia in the top ten countries with the highest diversity of these organisms (Moncada *et al.*, 2022). However, the number of species in the Andean region has not been updated.

In Andean ecosystems, lichens are an important biological element associated with tree bark and shrubs. They are pioneers in the colonization of soils and exposed rocks (Watanabe & Kitagawa, 2004; Alfonso, 2016) and they contribute to the water (McCune, 2000) and nutrient cycles, especially the nitrogen input (Benner *et al.*, 2007). Many studies in Colombia have focused on the Andean ecosystems (Moncada *et al.*, 2022), documenting an enormous richness in mid and high-mountain zones (Soto Medina *et al.*, 2021). However, little is known about the lichen biota of volcanic landscapes in the Colombian Andes (Sipman, 1989; Wolf, 1994) and the factors influencing the colonization by epiphyte communities under these harsh conditions (Díaz-Escandon *et al.*, 2016). The recent discovery of new species, including *Cora celestino*, *Sticta lobarioides*, and *Sticta phyllidiokunthii*, on volcanic mountains in Colombia (Moncada *et al.*, 2013a; Lücking *et al.*, 2017), suggest that these ecosystems harbor unique lichen assemblages.

In recent years, research in the department of Tolima has focused on the mid and high altitude mountain forests of the Andean ecosystems leading to the discovery of several new species and new records in diverse groups of organisms (Neita-Moreno & Ratcliffe, 2019; Volkova, 2020; Rincon-Gonzalez & Escalante, 2020; Rincón-González *et al.*, 2020; Correa-Carmona *et al.*, 2021; Fernández-Alonso, 2021; Murillo-Serna *et al.*, 2021; Anganoy-Criollo *et al.*, 2022; Orejuela *et al.*, 2022; Sierra-Ariza *et al.*, 2022). These findings show the significance of the department of Tolima as a refuge for the Colombian flora and fauna. However, information about the lichenized fungi in this department is still limited.

Lichen research performed in Tolima includes the report of different species in the premontane plant formation of the upper basin of the Combeima River (Esquivel & Nieto, 2003). Additionally, the diversity and composition of lichens in different urban areas of Ibagué (Barreto & Esquivel, 2020), lichens as pollution bioindicators in its city reserves (Díaz-Villanueva & Morales-Nieto, 2019), and the metabolites of some species of the genus *Sticta* have been evaluated (Albornoz *et al.*, 2022). One of these studies in Ibagué examined the preferences of lichens towards certain phorophytes (Zárate-Arias *et al.*, 2019), a topic rarely studied in Colombia (Soto *et al.*, 2012; Ardila-Ríos *et al.*, 2015; Gutiérrez *et al.*, 2019; Zárate-Arias *et al.*, 2019). Besides phorophyte preferences, the different factors influencing the composition, diversity, and establishment of lichens in tree vertical layers have been the focus of some few studies (Wolf, 1993 a b; Simijaca, 2011; Díaz-Escandón *et al.*, 2016; Simijaca *et al.*, 2018).

Focusing on phorophyte preferences, Ardila-Ríos *et al.* (2015) reported that planting exotic *Eucalyptus* species decreased species richness, possibly influenced by the peeling of the bark. Lichen communities are also sensitive to variations in bark pH (Wolf, 1993 a;

Cáceres *et al.*, 2007; Díaz-Escandón *et al.*, 2016; Zárate-Arias *et al.*, 2019). Simijaca *et al.* (2018) noted that bark roughness affects species composition since certain lichens prefer smooth bark while others tend to grow on rough bark. It is also known that trees with a high number of grooves or lumps on the trunk bark limit the growth of crustose lichens (Rosabal *et al.*, 2013) and that the age of the trees influences species composition (Ellis & Coppins, 2006, 2007). Besides phorophyte features, lichen community composition is influenced by light intensity variations (Soto-Medina *et al.*, 2012), including forest types or tree layers (Lücking, 1999; Koch *et al.*, 2013; Käffer *et al.*, 2021; Koch *et al.*, 2022).

Given the unique characteristics of Cerro Machín: being one of the lowest altitude volcanoes of Colombia, having a strong topography, and the influence of fumaroles, and considering the lack of information about its lichen biota, this region is an exceptional study area to assess the diversity, composition, structure, and phorophyte preferences of its lichen biota.

Materials and methods

Study area

The study area was located 17 km west of the municipality of Ibagué (4°29'11"N and 75°22'54"W), on the eastern flank of the Cordillera Central of Colombia (Moreno, 2012). It is part of the San Diego-Machín volcano-tectonic province (Martínez *et al.*, 2014) (Figure 1). The volcanic complex has an area of 13 km² and its crater has a diameter of 2.4 km (Piedrahita *et al.*, 2018) enclosed by three domes with a height ranging between 1,524 and 2,750 m (Moreno, 2012). Climatic conditions vary from temperate to warm, with dry and rainy periods throughout the year, a temperature oscillating between 20°C and 22°C, average annual rainfall reaching 1150 mm, and relative humidity of 85% (Servicio Geológico Colombiano, 2007).

Sampling

Sampling was done between August 20, 2021, and January 10, 2022, in six field trips. Plots were selected along an altitudinal gradient from the base of the volcano at 2000 m to the top at 2750 m on the southeast and northwestern faces of the main dome. Forests

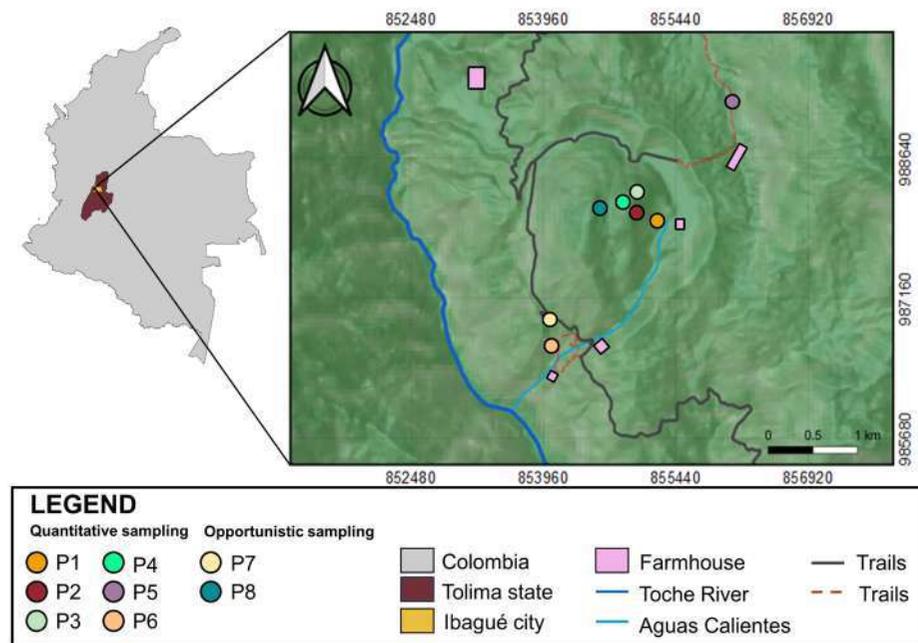


Figure 1. Map of the CMV area with sampling plots georeferencing

were predominant (63%), with some grasslands from local agricultural farms (36%), and streams accounting for 1% of the area (CORTOLIMA & Universidad del Tolima, 2008; Vargas *et al.*, 2007). Plots P1, P2, P3, P4, and P8 were located within the lower montane wet forest (wf-LM) and plots P5, P6, and P7 were in the premontane wet forest (wf-P) (Holdridge, 1966). Most of the trees at plot locations ranged from 10 to 25 meters in height and bryophytes predominated in their bark (Candela & Fernández, 2021). Other specific characteristics of the zones are detailed in **table S1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2638/4465>.

We conducted two types of sampling: first, quantitative, for the analysis of community composition and structure in six plots, P1 to P6 (20 m x 50 m in size) (**Figure 1**, **table S1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2638/4465>). We selected four phorophytes from *Weinmannia pubescens*, *Hedyosmum bonplandianum*, *Clusia multiflora*, and *Myrcia popayanensis* species in each of the six plots, adding up to 24 studied trees. For lichen recording, we used 20 cm x 50 cm rectangles fixed to each phorophyte at breast height on the side of the trunk with the highest lichen coverage (Soto Medina *et al.*, 2012). For the opportunistic sampling, lichens were collected outside the plots on different selected substrates to complement the recorded species (Sipman, 1996). Access to P7 and P8 was difficult and the trees suggested for quantitative sampling were never found, so these plots were used for opportunistic sampling (**Figure 1**).

Taxonomy

We identified lichen samples using taxonomic keys, with the help of a dissecting microscope and an OMAX M82ES-SC100-LP100 compound microscope. For genus-level identifications, we used the neotropical lichen key by Sipman (2005) and the identification guide of Colombian lichens by Moncada & Lücking (preprint). For species-level identifications, we used specialized literature depending on the group (Rivas-Plata *et al.*, 2008; Lücking *et al.*, 2009; Moncada, 2012; Moncada *et al.*, 2013b; Aptroot & Lücking, 2016; Gumboski *et al.*, 2018; Sarlej *et al.*, 2018; Kitaura *et al.*, 2018; Kitaura *et al.*, 2019). Chemical tests followed the standardized methods for lichen chemotaxonomy (Orange *et al.*, 2001; McCune *et al.*, 2002) employing potassium hydroxide (K), sodium hypochlorite (C), paraphenylenediamine (P), and iodine (I). The collections are deposited in the herbarium of the University of Tolima (TOLI), with selected duplicates in the Emilio Mahecha Forest herbarium (UBDC).

Phorophyte characteristics

We assessed four parameters for each phorophyte sample. We calculated the diameter at breast height (DBH) of the tree by measuring the circumference at 1.30 m and dividing this value by π . We assessed bark pH by collecting superficial bark fragments and analyzing them in the lab. A gram of bark was mixed with 10 ml of distilled water and after an hour, the pH was measured with a digital pH meter (Tester CHECKER® HI 98103) (Kricke, 2002). Light intensity was estimated using hemispherical photographs of the canopy above each phorophyte taken with a 180° fisheye lens (OPTEKA Hd2 0.20) mounted on a CANON T3 digital camera. The camera was positioned one meter above the ground and oriented towards the selected side of the tree, with the lens pointing to the magnetic north, determined using a compass (Koch *et al.*, 2012; Menezes, 2013) to standardize the photographs across all phorophytes. The images were analyzed using the Gap Light Analyzer (GLA) software with a setting according to the orientation parameters and the coordinates of each phorophyte (Frazer *et al.*, 2000). Finally, bark roughness was measured using a twine to draw the bark topography (ridges and hollows) over 10 cm marked with a plastic ruler. The roughness coefficient resulted from the difference between the twine length divided by the 10 cm ruler, a method modified from Rosabal *et al.*, (2012).

Data analysis

We measured alpha diversity on each of the 24 phorophyte samples as the number of species and using a quantitative diversity measure through the effective number of species of order q_0 (richness of species), q_1 (number of common or frequent effective species), and q_2 (number of dominant effective species) (Hill, 1973; McCune *et al.*, 2002). We evaluated sample coverage to determine the representativeness of the samples relative to the proportion of species found (Chao & Jost, 2012) and calculated rarefaction curves to allow comparisons of the richness between the plots studied without considering the frequency of each species (Gotelli & Colwell, 2001). For these analyses, we used the Rstudio iNEXT package (Hsieh *et al.*, 2016; Moreno, 2019). We also produced a species accumulation curve to evaluate the completeness of the sampling using the Jackknife 1 estimator and we made comparisons with the rarefaction curves using PAST® version 4.10 (Hammer *et al.*, 2001).

Beta diversity was measured using Sørensen's relative dissimilarity index calculated for each pair of the 24 phorophyte samples resulting in 276 pairwise comparisons (McCune *et al.*, 2002). We also employed this index to evaluate the differences between the six plots pooling the four trees within each sampling site.

We evaluated potential phorophyte preferences using non-metric multidimensional scaling (NMDS) with the Sørensen index. The NMDS was conducted with 999 randomizations using a stability criterion of 0.000001 and 100 iterations. Additionally, a two-way cluster analysis was done based on the same Sørensen distance matrix index (McCune *et al.*, 2002). These two analyses were complemented by an analysis of indicator species with Monte Carlo simulations to test which lichen species had statistically significant preferences for the different groups of phorophytes based on the criteria of significance ($p < 0.05$) and marginal significance ($p < 0.1$) (McCune *et al.*, 2002). For the statistical analysis, we used the PC-ORD® software version 5.0 (McCune *et al.*, 2002).

Results

Taxonomic composition

The inventory of the Cerro Machín volcano resulted in 113 species belonging to 47 genera and 26 families. The quantitative sampling yielded 77 species, 37 genera, and 19 families, and the opportunistic sampling 57 species, 27 genera, and 16 families (Table 1). The quantitative and opportunistic sampling shared only 21 species (19%); the quantitative sampling resulted in 55 species (almost 49%) and the opportunistic sampling resulted in 36 species (32%); i.e., the first sampling method yielded a higher richness. *Sticta* was the richest genus, with 11 species, followed by *Parmotrema* (9), *Pyrenula* (7), *Leptogium* (7), and *Cladonia* (7).

Cyanobacterial photobionts occurred in 25 species (22% of those recorded), including the genera *Coccocarpia*, *Cora*, *Leptogium*, *Peltigera*, and several species of *Sticta*. Species with chlorococcoid photobiont (green algae) represented 53% of the total, including the genera *Lobariella* and *Yoshimuriella*, and another set of *Sticta* species. Graphidaceae, Pyrenulaceae, and Trypetheliaceae species (amounting to 25% of the species) featured a trentepohlioid photobiont (Table 1).

Thirty five (35) species were new records for the department of Tolima: *Allographa macella*, *Aspidothelium cinerascens*, *Cladonia macilentoides*, *Emmanuelia tenuis*, *Hypotrachyna horrescens*, *Kalbographa cabbalistica*, *Leptogium javanicum*, *Lobariella pallida*, *Parmotrema sancti-angelii*, *Phaeographis sculpturata*, *Pyrenula acutispora*, *P. quassiiicola*, *Sticta pseudolobaria*, and *Yoshimuriella peltigera*. Additionally, *Allographa superans*, *Architrypethelium penuriixanthum*, *Graphis breussii*, *Lepra tropica*, *Phaeographis coriaria*, and *Pyrenula montocensis* were new records for Colombia (Figure 2).

Table 1. Lichenized fungi species at the CMV. Sampling type (P: plots - quantitative sampling; O: opportunistic) and photobiont type (trente = trentepohliode, cloroc = clorococcoide, cyano = cyanobacteria).

Species	Sampling type	Photobiont
<i>Allographa macella</i> (Kremp.) R. Lücking & K. Kalb*	P	trente
<i>Architrypethelium penuriixanthum</i> Flakus & Aptroot **	P	trente
<i>Arthonia</i> sp.	P	trente
<i>Aspidothelium cinerascens</i> Vain. *	P	trente
<i>Bacidia</i> sp.	P	cloroc
<i>Brigantiaea leucoxantha</i> (Spreng.) R.Sant. & Hafellner	O	cloroc
<i>Chrysothrix chlorina</i> (Ach.) J.R.Laundon	O	cloroc
<i>Cladonia arbuscula</i> (Wallr.) Flot.	O	cloroc
<i>Cladonia didyma</i> (Fée) Vain.	O	cloroc
<i>Cladonia grayi</i> G. Merr. Ex Sandst	O	cloroc
<i>Cladonia macilentoides</i> Ahti & Fleig *	O	cloroc
<i>Cladonia rangiferina</i> (L.) Weber	O	cloroc
<i>Cladonia</i> sp1.	O	cloroc
<i>Cladonia</i> sp2.	O	cloroc
<i>Coccocarpia erythroxyli</i> (Spreng.) Swinscow & Krog	O	cyano
<i>Coccocarpia palmicola</i> (Spreng.) Arv. & D.J. Galloway	O	cyano
<i>Coccocarpia pellita</i> (Ach.) Müll. Arg.	P	cyano
<i>Coenogonium linkii</i> Ehrenb.	P, O	trente
<i>Coenogonium roumeguerianum</i> (Müll. Arg.) Kalb*	P	trente
<i>Coenogonium</i> sp.	P	trente
<i>Coniarthonia</i> sp.	P	trente
<i>Cora applanata</i> B. Moncada, Soto-Medina & Lücking	O	cyano
<i>Cora aspera</i> Wilk, Lücking & E. Morales*	O	cyano
<i>Cora</i> sp2.	O	cyano
<i>Crocodia aurata</i> (Ach.) Link	O	cyano
<i>Cryptothecia</i> sp.	P	trente
<i>Emmanuelia tenuis</i> (Vain.) Lücking, B. Moncada & Gumboski *	P	cloroc
<i>Graphis breussii</i> G. Neuwirth & Lücking*	P	trente
<i>Graphis nanodes</i> Vain.	O	trente
<i>Graphis</i> sp1.	P	trente
<i>Graphis</i> sp2.	P	trente
<i>Graphis superans</i> Müll. Arg. *	P	trente
<i>Herpothallon roseocinctum</i> (Fr.) Aptroot, Lücking & G. Thor	P, O	trente
<i>Heterodermia comosa</i> (Eschw.) Follmann & Redón	O	cloroc
<i>Hypotrachyna horrescens</i> (Taylor) Krog & Swinscow *	P	cloroc
<i>Hypotrachyna imbricatula</i> (Zahlbr.) Hale	P	cloroc
<i>Hypotrachyna laevigata</i> (Sm.) Hale	P	cloroc
<i>Hypotrachyna rockii</i> (Zahlbr.) Hale	P	cloroc
<i>Kalbographa cabbalistica</i> (Nyl.) Lücking*	P	trente
<i>Lecanora</i> sp.	P	trente
<i>Lepra</i> sp.	P, O	cloroc
<i>Lepra tropica</i> (Vain.) Lendemer & R.C. Harris*	P	cloroc
<i>Leptogium andinum</i> P.M. Jørg.	P	cyano

Species	Sampling type	Photobiont
<i>Leptogium azureum</i> (Sw.) Mont.	P, O	cyano
<i>Leptogium cyanescens</i> (Ach.) Körb.	O	cyano
<i>Leptogium foveolatum</i> Nyl.	P, O	cyano
<i>Leptogium javanicum</i> Mont. *	O	cyano
<i>Leptogium phyllocarpum</i> (Pers.) Mont.	O	cyano
<i>Leptogium punctulatum</i> Nyl.	P, O	cyano
<i>Leucodermia circinalis</i> (Zahlbr.) Kalb	O	cloroc
<i>Leucodermia leucomelos</i> (L.) Kalb	P, O	cloroc
<i>Lobariella flavomedullosa</i> B. Moncada, Betanc. & Lücking	P	cloroc
<i>Lobariella pallida</i> (Hook.) B. Moncada & Lücking*	O	cloroc
<i>Lobariella parmelloides</i> B. Moncada & Lücking*	O	cloroc
<i>Lopezaria versicolor</i> (Flot.) Kalb & Hafellner	P, O	cloroc
<i>Malmidea nigromarginata</i> (Malme) Lücking & Breuss	P	cloroc
<i>Megalospora tuberculosa</i> (Fée) Sipman	P	cloroc
<i>Parmotrema cetratum</i> (Ach.) Hale	P	cloroc
<i>Parmotrema commensuratum</i> (Hale) Hale	O	cloroc
<i>Parmotrema dilatatum</i> (Vain.) Hale	P, O	cloroc
<i>Parmotrema gardneri</i> (C.W. Dodge) Sérus. *	P	cloroc
<i>Parmotrema louisianae</i> (Hale) Hale*	P	cloroc
<i>Parmotrema robustum</i> (Degel.) Hale	O	cloroc
<i>Parmotrema sancti-angeli</i> (Lyngé) Hale *	O	cloroc
<i>Parmotrema subtinctorium</i> (Zahlbr.) Hale *	P	cloroc
<i>Parmotrema zollingeri</i> (Hepp) Hale*	P	cloroc
<i>Peltigera austroamericana</i> Zahlbr.	O	cyano
<i>Peltigera dolichorhiza</i> (Nyl.) Nyl.	O	cyano
<i>Pertusaria tetrathalamia</i> (Fée) Nyl.	O	cloroc
<i>Phaeographis coriaria</i> (M. Wirth & Hale) M. Cáceres, Aptroot, Parmen & Lücking *	P	trente
<i>Phaeographis dendritica</i> (Ach.) Müll.	P, O	cloroc
<i>Phaeographis scalpturata</i> (Ach.) Staiger*	P	trente
<i>Phlyctis cf. Brasiliensis</i> Nyl.	P	trente
<i>Phyllopsora furfuracea</i> (Pers.) Zahlbr.	P	cloroc
<i>Phyllopsora janeirensis</i> (Müll. Arg.) Swinscow & Krog*	P	cloroc
<i>Phyllopsora parvifolia</i> (Pers.) Müll. Arg.	P	cloroc
<i>Polyblastidium corallophorum</i> (Taylor) Kalb*	P	cloroc
<i>Polyblastidium japonicum</i> (M. Satô) Kalb *	P, O	cloroc
<i>Pseudocyphellaria sandwicensis</i> (Zahlbr.) B. Moncada & Lücking	P, O	cyano
<i>Punctelia</i> sp.	P	cloroc
<i>Pyrenula acutispora</i> Kalb & Hafellner *	P	trente
<i>Pyrenula complanata</i> (Mont.) Trevis.	P	trente
<i>Pyrenula montocensis</i> Lücking*	P	trente
<i>Pyrenula platystoma</i> (Müll. Arg.) Aptroot	P	trente
<i>Pyrenula quassiiicola</i> Fée*	P	trente
<i>Pyrenula</i> sp.	P	trente
<i>Pyrenula thelomorpha</i> Tuck. **	P	trente
<i>Ramalina camptospora</i> Nyl.	P, O	cloroc

Species	Sampling type	Photobiont
<i>Ramalina celastri</i> (Spreng.) A. Massal.	P, O	cloroc
<i>Ramalina pusiola</i> Müll. Arg.	O	cloroc
<i>Ramalina usnea</i> (L.) R. Howe*	O	cloroc
<i>Remototrachyna costaricensis</i> (Nyl.) Divakar, Lumbsch, Ferencová, Prado & A. Crespo	P	cloroc
<i>Stereocaulon ramulosum</i> Raesch.	O	cloroc
<i>Sticta andina</i> B. Moncada, Lücking & Lumbsch	P, O	cyano
<i>Sticta cometia</i> Ach.	P	cyano
<i>Sticta cordillerana</i> Gyeln.	P, O	cloroc
<i>Sticta dilatata</i> (Nyl.) Vain.	O	cyano
<i>Sticta leucoblepharis</i> Tuck. & Mont.	P, O	cyano
<i>Sticta neopulmonarioides</i> B. Moncada & Coca	P	cloroc
<i>Sticta plumbeociliata</i> B. Moncada, A. Suárez & Lücking	P	cyano
<i>Sticta pseudolobaria</i> B. Moncada & Coca*	P, O	cloroc
<i>Sticta roseocyphellata</i> Bungartz, Moncada & Sipman	P, O	cyano
<i>Sticta subfilicinella</i> B. Moncada, Coca & Lücking*	P	cyano
<i>Sticta tomentosa</i> (Sw.) Ach.	O	cyano
<i>Teloschistes exilis</i> (Michx.) Vain.	O	cloroc
<i>Teloschistes flavicans</i> (Sw.) Norman	O	cloroc
<i>Thallolooma astroideum</i> (Müll. Arg.) Staiger*	P	trente
<i>Usnea columbiana</i> Motyka ex Räsänen	P	cloroc
<i>Usnea rubicunda</i> Stirt.	P, O	cloroc
<i>Varicellaria velata</i> (Turner) I. Schmitt & Lumbsch*	P	cloroc
<i>Yoshimuriella dissecta</i> (Sw.) B. Moncada & Lücking	P, O	cloroc
<i>Yoshimuriella peltigera</i> (Vain.) Lücking & B. Moncada *	P	cloroc
<i>Yoshimuriella subdissecta</i> (Nyl.) B. Moncada & Lücking	P	cloroc

Completeness and rarefaction

The quantitative sampling yielded 77 species. The proportion of completeness based on the Jackknife 1 estimator (116 species) was 66.3% (**Figure 3a**). The rarefaction curves showed significant differences between P4 richness values and the other sampling sites. When the values in the curves were close to the total of sampling units (48), an asymptotic pattern was observed, which remained after the extrapolation (**Figure 3b**), evidencing sample coverage oscillating between 96% (Plot 1) and 99% (Plot 6) (**Table S2**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2638/4465>).

Alpha diversity

Hedyosmum, *Myrcia*, and *Weinmannia* had the same mean richness value per sample (seven lichen species) and *Clusia* had a lower one (five species). Individually, the richest phorophyte was *Hedyosmum* 1, with 10 species, followed by *Weinmannia* 5 (9) and *Myrcia* 5 and *Hedyosmum* 3 (both with 8). *Clusia* 4 had the lowest diversity per sample (only 3 species) (**Table S3**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2638/4465>).

When we examined effective species values at standardized sample coverage (98%), Plot 1 was the most diverse site (${}^0D=27$; ${}^1D=22$; ${}^2D=19$), followed by Plot 5 (${}^0D=22$; ${}^1D=18$; ${}^2D=16$). In contrast, Plot 4 (${}^0D=11$; ${}^1D=8$; ${}^2D=6$) showed less diversity and significant differences in the 0D values and the rarefaction (**Figure 3b**, **figure 4**). The 0D values showed the same pattern when comparisons were based on observed values vs. standardized sample coverage (**Table 2**).

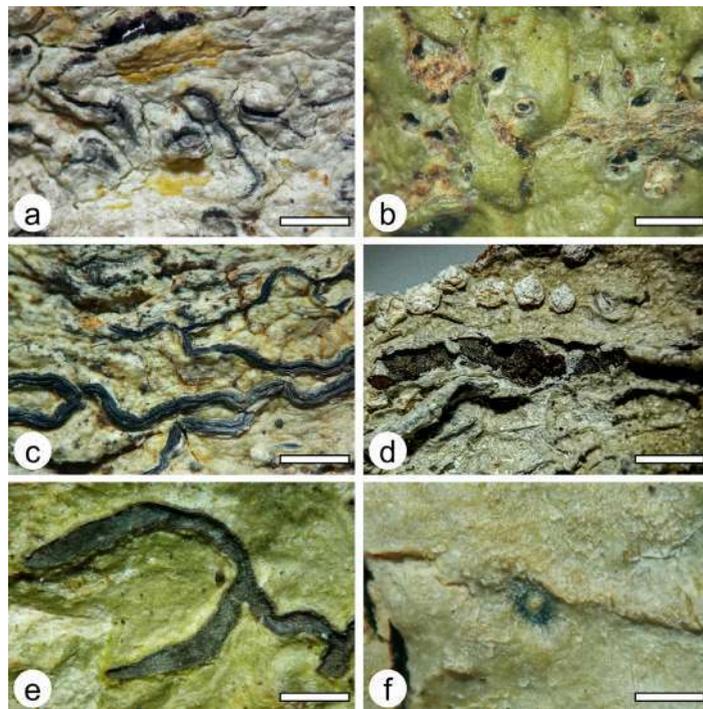


Figure 2. New records of lichenized fungi for Colombia. **a.** *Allographa superans*. **b.** *Architrypetelium penuriixanthum*. **c.** *Graphis breussii*. **d.** *Lepra tropica* (Photo taken to a humid sample making the thallus look greenish). **e.** *Phaeographis coriaria*. **f.** *Pyrenula montocensis*. Scale bar: 1 mm

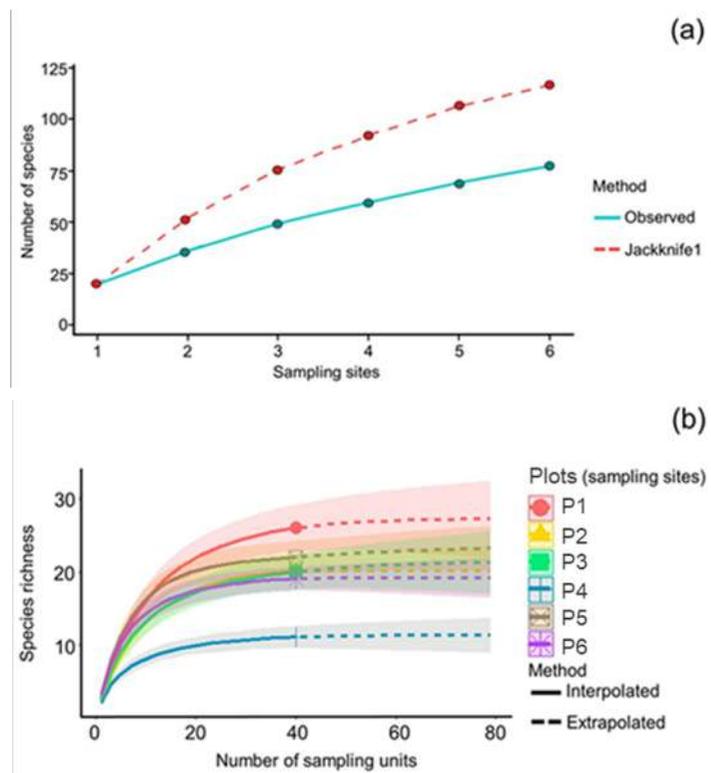


Figure 3. Completeness and rarefaction for the study sites. **a.** Species accumulation curve for the observed species and Jackknife 1 estimator. **b.** Rarefaction curves based on the richness of species

Beta diversity

Beta diversity measured with the Sørensen dissimilarity index showed that 95% of the pairwise comparisons among the phorophyte samples had values greater than 0.7, 4.7% ranged between 0.4 and 0.6, and only 0.3 % had a distance value of 0.1 or lower, indicating high sample heterogeneity (Figure 5). Similar patterns were found when comparing the plots, with all pairwise comparisons showing values above 0.68 % (Table 3).

The high sample heterogeneity was also evident in the cluster analysis, resulting in distinct groups of phorophytes with few shared species (Figure 6). A substantial proportion of the species (57 out of 77, 74%) were rare. Out of these, 41 were very rare, recorded only on one phorophyte, and the remaining 16 were rare, i.e., found on two phorophytes (Figure 6).

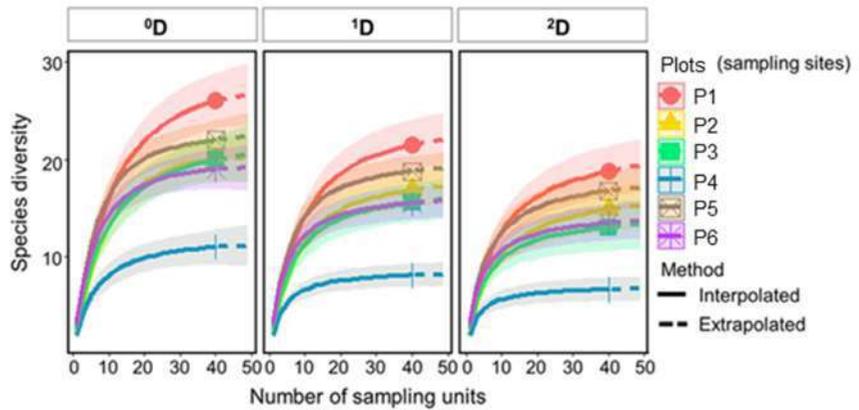


Figure 4. Diversity profiles (⁰D) for the study sites depicting the effective number of species in each order

Table 2. Values for the three orders of diversity based on the effective number of species for each of the six plots and value comparison based on sample coverage at 98%

Plots	⁰ D	¹ D	² D	⁰ D [SC 98%]	¹ D* [SC 98%]	² D* [SC 98%]
P1	26	21.5	18.8	27	22.1	19.4
P2	20	16.9	14.8	20	16.7	14.7
P3	20	15.6	13.1	20	15.8	13.3
P4	11	8.1	6.7	11	8.0	6.6
P5	22	18.8	16.8	22	18.8	16.8
P6	19	15.5	13.5	19	15.3	13.2

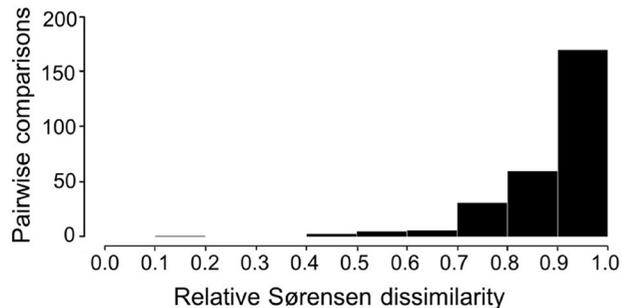


Figure 5. Paired comparisons of beta diversity of phorophytes based on Sørensen dissimilarity

Phorophyte relations

The NMDS analysis (stress = 0.107) did not show a marked separation of lichen communities based on phorophytes, except for *Weinmannia* phorophytes, which formed a separate group in the lower left portion of the diagram (Figure 7). Bark pH ($R^2=0.21$) and richness ($R^2=0.25$) showed a significant correlation with axis two ($p < 0.1$) (Table 4). *Weinmannia* individuals had a lower pH compared to the other phorophyte

Table 3. Paired comparisons of beta diversity among the study sites based on the Sørensen index

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
P1	0					
P2	0.78	0				
P3	0.83	0.75	0			
P4	0.95	0.68	0.68	0		
P5	0.83	0.71	0.81	0.82	0	
P6	0.82	0.95	0.9	0.93	0.76	0

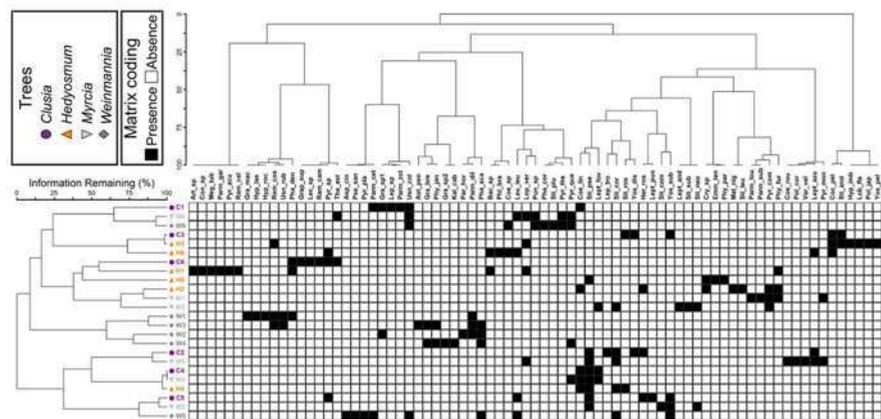


Figure 6. Two-way cluster dendrogram based on the Sørensen similarity index. The numbers (1 to 6) represent the study sites

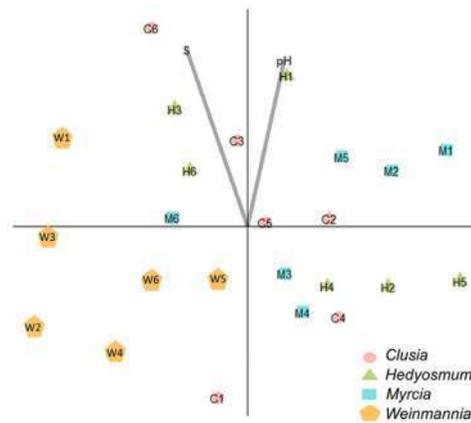


Figure 7. NMDS ordination plot based on the four phorophyte species evaluated showing the correlation of richness and pH parameters with axis two

Table 4. Significance and correlations for the two NMDS dimensions based on the environmental variables.

	NMDS1	NMDS2	r ²	p	
Eleva	0.1774	-0.98414	0.086	0.391	
Roug	-0.98836	0.15213	0.0424	0.626	
DBH	0.2778	0.96064	0.1912	0.098	
Cop	-0.87577	0.48273	0.1169	0.283	
pH	0.23542	0.97189	0.2101	0.087	*
S	-0.35552	0.93467	0.2559	0.056	*

Eleva: Elevation; Roug: Roughness, DBH: diameter at breast height; Cop: Canopy Openness; S: Richness; * significant values

species (**Table S1**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2638/4465>), although the Kruskal-Wallis test showed no significant differences ($p > 0.05$) among the four phorophyte species for this and other environmental variables (**Table S3**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2638/4465>).

Clusia included the individuals with the roughest bark (average = 2.25), and *Myrcia* trees had the smoothest bark (1.75). Canopy openness was higher for *Weinmannia* individuals (average = 20.2 W/m²) and lower for *Hedyosmum* phorophytes (16.8 W/m²). *Clusia* individuals' trunks had the highest DBH (average = 30.0 cm), and *Weinmannia* individuals had the lowest one (20.2 cm) (**Table S1**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2638/4465>).

The indicator species analysis (ISA) detected few species with significant preferences for a given phorophyte species, namely *Parmotrema dilatatum* (IV = 50.0) and *Phaeographis sculpturata* (IV = 66.7), both significantly related ($p < 0.05$) with *Weinmannia* phorophytes.

Discussion

This is the first assessment of lichenized fungi diversity on the Cerro Machín volcano. The 113 lichen species we found represent 4.2% of the currently documented lichen biota in Colombia. Similar richness values were observed in the area of the Puracé Volcano, where 104 species were collected from 30 phorophytes at three different study sites (**Díaz-Escandón et al.**, 2016). A study in Parque Los Nevados resulted in 178 species, with 37 to 51 species per study site depending on their elevation (**Wolf**, 1993 a). The Cerro Machín volcano houses a similar number of species; the richness of the altitudinal zones varies between 11 and 26. Exploring undocumented areas offers the opportunity to learn about rare species occupying habitats in need of protection (**Stropp et al.**, 2020). The number of species recorded in Cerro Machín volcano is remarkable for the department of Tolima, given that previous studies had only documented 21 to 38 species for given localities (**Villanueva & Morales-Nieto**, 2019, **Zárate-Arias et al.**, 2019, **Barreto & Esquivel**, 2020).

The following species are newly recorded for the Colombian territory (**Figure 2**): *Allographa superans* (Müll. Arg.) Lücking & Kalb, originally described from barks in a tall forest at the Lutindi Forest Reserve, Tanzania (**Müller**, 1894); *Architrypethelium penuriixanthum* Flakus & Aptroot, previously reported in a cloud forest in the Yungas geographical region of Bolivia (**Flakus & Aptroot**, 2016); *Graphis breussii* G. Neuwirth & Lücking, first documented from Venezuela, Amazonas state, near the border with Colombia, on the edges of River Orinoco (**Neuwirth & Lücking**, 2009); *Lepra tropica* (Vain.) Lendemer & R.C. Harris, first discovered in Serra da Chela, Angola, and originally described as *Pertusaria tropica* (**Vainio**, 1901); *Phaeographis coriaria* (M. Wirth & Hale) M. Cáceres, Aptroot, Parmen & Lücking, originally found in a mossy forest on the island of Dominica

in Morne Anglais, at an elevation of 3000 to 3600 m, and then reported as *Phaeographina coriaria* (Wirth & Hale, 1978), and, finally, *Pyrenula montocensis* Lücking, first discovered in San Pedro de Montes de Oca in Costa Rica, in an area that is now an urban fabric with factories (Aptroot *et al.*, 2008). These new records highlight the importance of tropical cloud forests as a reservoir of biodiversity (Soto-Medina *et al.*, 2019).

Cloud forests are suitable for colonization by cyanolichens due to their high humidity, mostly acidic bark, and dense canopy cover (Benítez *et al.*, 2018, Simijaca *et al.*, 2018, Chuquimarca *et al.*, 2019). Cyanolichens are an important component in ecosystems for their usual association with specific microhabitats such as preserved primary forests (Merinero *et al.*, 2014). Accordingly, in the study area, we found several species of cyanolichens, such as *Cora applanata*, *Leptogium foveolatum*, and *Sticta cometia*.

Other lichen biotypes, characteristic of well-preserved forests, were also identified in this study, for example, lichenized fungi with perithectoid and thelotremoid ascomata, considered a good indicator of forest health in the tropics, were abundant (Rivas-Plata *et al.*, 2008). The presence of lobarioid Peltigeraceae with green algae photobiont is also considered indicative of conserved forests (Ramírez-Morán *et al.*, 2016). The Cerro Machín volcano yielded nine species of lobarioid Peltigeraceae with green algal photobionts, six species with perithectoid ascomata, and one thelotremoid taxon, indicating that the study area is still relatively well conserved.

Phorophyte preferences have been evaluated based on diverse tree species from various habitats throughout the tropics (Nöske, 2004; Käffer *et al.*, 2009, Cáceres *et al.*, 2007). In Colombia, stands of *Quercus humboldtii* harbored 41 to 109 species (Ardila-Rios *et al.*, 2015; Simijaca, 2011; Simijaca *et al.*, 2018) with up to 50 species per tree (Sipman, 2006), and studies on *Weinmannia* have recorded 54 to 104 species associated with this genus (Díaz-Escandón *et al.*, 2016; Ramírez-Morán *et al.*, 2016). Our study resulted in a total of 29 species on *Weinmannia*, with an average of seven species of lichens per tree, indicating a much lower diversity. However, the lichen richness on *Weinmannia* at Cerro Machín volcano is similar to the richness on other phorophytes examined by Zárate-Arias *et al.* (2019) in urban green areas in Ibagué (Tolima), with 21 species and an average of three species on each phorophyte. *Clusia* genus has been reported to host between six and eight lichen species per phorophyte (Soto Medina *et al.*, 2012), while in our study it was between three and six species per tree.

The overall low richness values per tree may be explained by the exhausts from the fumaroles in the study area, which emanate sulfur dioxide as steam at high pressure and temperature. The steam then condenses or dissolves in rainwater that subsequently precipitates as acid rain or fog (Hochstein & Browne, 2000). The acid precipitation may affect the lichens directly or indirectly by changing tree bark characteristics such as pH. This effect was observed by Díaz-Escandón *et al.* (2016) with sulfur dioxide-containing steam emerging from the El Vinagre River in the area of the Puracé volcano. According to their findings, the trees closest to pollution sources had a lower bark pH, richness, and lichenized fungi coverage, in line with our study, where trees also exhibited low bark pH (between 4 to 6). This was particularly evident in *Weinmannia* phorophytes, which had the lowest pH values of all the studied trees. Also, P4, located 30 m from fumaroles, showed the lowest lichen diversity, and the remaining plots, located 95 to 560 m from them, had increasing diversity. However, P5 and P6 might potentially be affected by anthropogenic intervention in the area given their location near hot springs and trails. There, we observed uncontrolled tourist activities with high traffic resulting in environmental pressures, soil degradation, and vegetation damage. We also observed habitat fragmentation caused by extensive livestock farming in the area surrounding the Cerro Machín volcano, which may contribute to a loss of biodiversity in the region (CORTOLIMA, 2020).

Diversity per phorophyte at Cerro Machín volcano was less than in other studies but the contribution of beta diversity to the overall site richness (gamma diversity) coincides with findings in other tropical forests, especially regarding the high number of rare species

(Cáceres *et al.*, 2007; Soto-Medina *et al.*, 2012; Ardila-Ríos *et al.*, 2015; Díaz-Escandón *et al.*, 2016), which supports the idea that beta diversity is the most important component of lichen diversity in tropical forests (Komposch & Hafellner, 2000; Cáceres *et al.*, 2007). Besides the specific conditions found in tropical forests and their great diversity of microhabitats (Gradstein *et al.*, 1996; Victorino, 2012), sampling techniques may also play a role in the detection of many rare species (Soto-Medina *et al.*, 2012). In our study, we used the microsquare technique to quantify species frequency, which allowed for the detection of more inconspicuous taxa compared to opportunistic sampling (Cáceres *et al.*, 2007).

Since rare species add a strong stochastic component to the data, evidence of phorophyte preferences or even the specificity of lichens may be more difficult to detect. In our study, the *Weinmannia* genus was the one that seemed to filter certain lichen species; the subtle trends detected may be explained by the moderate influence of bark pH as seen in the ordination analysis. This is supported by the study of Cáceres *et al.* (2007), who also highlighted the influence of bark pH on lichen communities, along with other bark features such as lenticels or shedding. Díaz-Escandón *et al.* (2016) also reported that *Weinmannia* trees, with their low average pH (4.15), hosted only three species on average, had less coverage, and even absence of lichens sometimes. Generally, bark acidity directly impacts the lichen thallus, preventing the establishment and reproduction of certain species (Brodo, 1973).

Other parameters, such as bark roughness, also influence the composition of lichen communities. Here, we recorded 1.7 to 2.2 averages, relatively high compared to the study by Rosabal *et al.* (2013) in Cuba, who reported average values slightly over 1.0 and a negative correlation between species richness and bark roughness. Similarly, Cáceres *et al.* (2007) found that the density and size of bark lenticels were negatively correlated with lichen area cover but did not affect the species richness. In another study in Colombia, *Q. humboldtii* trees exhibited a lower bark roughness average and lower richness compared to *Pinus patula* trees (Simijaca *et al.*, 2018). One may assume that phorophytes with rough barks host a greater number of species, as they allow better thallus adherence. However, particularly crustose lichens may have difficulties establishing and growing on rough bark in competition with three-dimensional macrolichens (Rosabal *et al.*, 2013).

Light intensity is an important factor in shaping lichen communities. In foliicolous lichens, the community composition was associated mainly with the distribution of light gaps (Lücking, 1998; 1999 a, b, c). The degree of canopy openness has also been linked to lichens with specific functional traits (Benítez *et al.*, 2018; Soto-Medina *et al.*, 2019). In this sense, López *et al.* (2016) identified a positive correlation between richness and luminosity, an effect not detected in the present study, likely because there was no strong variation in canopy openness in our study sites.

On the other hand, certain lichen biotypes have been associated with shady microhabitats in closed-canopy forests. In a sub-Andean forest in Popayán, *Coccocarpia*, *Phyllopsora*, *Sticta*, and *Coniarthonia* lichens were associated with shaded microsites (López *et al.*, 2016). Also, filamentous lichens belonging to the genus *Coenogonium* are mostly found in shaded forest microhabitats (Sipman & Harris, 1989; Brodo *et al.*, 2001). Certain crustose growth forms represent an adaptation to low light conditions (Koch *et al.*, 2013), since they may cover large areas with little biomass (Lakatos *et al.*, 2006; Koch *et al.*, 2013). Some notable such genera include *Cryptothecia* and *Herpothallon* (Lakatos *et al.*, 2006; Benítez *et al.*, 2018); we recorded a high number of species in these genera in Cerro Machín, among them, *Coccocarpia erythroxyli*, *C. palmicola*, *Coenogonium linkii*, *C. roumeguerianum*, *Herpothallon roseocinctum*, *Sticta subfilicinella*, *S. neopulmonarioides*, and *S. tomentosa*. Canopy opening measurements in our study displayed a pattern of homogeneity as to the amount of light entering the understory, with averages ranging from 17% to 20% per phorophyte, considered low in comparison to Soto *et al.* (2012), who observed a range from 20% to 40% for this parameter, which influenced the composition of the lichen communities in their study.

In general, our results support other findings on possible lichen preference towards some aspects of tree bark such as pH or structure, but very rarely genuine specificity between lichen and tree species (Cáceres *et al.*, 2007; Soto-Medina *et al.*, 2012). The absence of phorophyte specificity may be related to the high diversity of trees present in tropical forests since many tree species share traits and there are no obvious differences between them. Phorophyte specificity would be disadvantageous for lichens, as it lowers the abundance of appropriate substrates and involves a lower chance of a lichen species establishment, typically because dispersion of diaspores follows stochastic patterns (Cáceres *et al.*, 2007).

Acknowledgments

We thank the Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA) for their financial support. DRM and BM thank Mr. Genaro, owner of the La Secreta farm, and his family for allowing us entry to their property and for being guardians of the Cerro Machín Volcano's biodiversity, as well as all the families living around the Volcano for their hospitality. This research was carried out under the *Permiso Marco De Recolección De Especímenes De Especies Silvestres De La Diversidad Biológica* granted by the Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) to the Universidad del Tolima, under Resolution 02191, November 27, 2018.

Author contributions

BM and DRM designed the investigation. DRM and HE collected the study material in the field. BM and DRM identified the specimens collected and carried out the work lab. BM, DRM, RL, and DS made the ecological analyses of the information collected, wrote the first manuscript draft, edited the draft, and approved the final version.

Conflicts of interest

The authors declared no conflicts of interest.

References

- Aguirre, C. J., Rangel Churio, J., Avendaño T., K., Ruíz, C., Sipman, H. (2008). *Colombia diversidad biótica VI: Riqueza y diversidad de los musgos y líquenes en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Albornoz, L., Torres-Benítez, A., Moreno-Palacios, M., Simirgiotis, M. J., Montoya-Serrano, S. A., Sepulveda, B., Stashenko, E., García-Beltrán, O., Areche, C. (2022). Phylogenetic Studies and Metabolite Analysis of *Sticta* Species from Colombia and Chile by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-High Resolution-Q-Orbitrap-Mass Spectrometry. *Metabolites*, 12(2), 156. <https://doi.org/10.3390/metabo12020156>
- Alfonso, A. T. (2016). Líquenes y rocas como ejemplo de interacción entre subsistemas terrestres. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24(2), 143-152. <https://raco.cat/index.php/ECT/article/view/31254>
- Anganoy-Criollo, M., Viuche-Lozano, A., Enciso-Calle, M. P., Bernal, M. H., Grant, T. (2022). The Enigmatic *Hyloxalus edwardsi* Species Group (Anura: Dendrobatidae): Phylogenetic Position, a New Species, and New Putative Morphological Synapomorphies. *Herpetologica*, 78(4), 253-267. <https://doi.org/10.1655/Herpetologica-D-21-00015>
- Aptroot, A. (2012). A world key to the species of *Anthracothecium* and *Pyrenula*. *The Lichenologist*, 44(1), 5-53. <https://doi.org/10.1017/S0024282911000624>
- Aptroot, A. & Lücking, R. (2016). A revisionary synopsis of the Trypetheliaceae (Ascomycota: Trypetheliales). *The Lichenologist*, 48(6), 763-982. <https://doi.org/10.1017/S0024282916000487>
- Aptroot, A., Lücking, R., Sipman, H., Umaña, L. & Chaves J. L. (2008). Pyrenocarpous lichens with bitunicate asci: A first assessment of the lichen biodiversity inventory in Costa Rica. *Bibliotheca Lichenologica*, 97, 1-162
- Ardila-Ríos, A.I., Moncada, B., R. Lücking. (2015). Epiphyte homogenization and dediversification on alien *Eucalyptus* versus native *Quercus Forest* in the Colombian Andes: a case study using lirellate Graphidaceae lichens. *Biodiversity and Conservation* 24, 1239-1252. <https://doi.org/10.1007/s10531-014-0855-7>

- Armenteras, P. D., Cadena, V. C. E., Moreno, R. D. P.** (2017). Evaluación del estado de los bosques de niebla y de la meta 2010 en Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Barreto G, D. & Esquivel, H. E.** (2020). Diversidad, distribución y riqueza de líquenes en las zonas verdes de la ciudad de Ibagué. *Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural*, 24(2), 25 - 39. <https://doi.org/10.17151/bccm.2020.24.2.2>
- Benner, J.W., Conroy, S., Lunch, C.K., Toyoda, N., Vitousek, P.M.** (2007). Phosphorus Fertilization Increases the Abundance and Nitrogenase Activity of the Cyanolichen *Pseudocyphellaria crocata* in Hawaiian Montane Forests. *Biotropica*, 39, 400-405. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2007.00267.x>
- Benítez, A., Aragón, G., González, Y., Prieto, M.** (2018). Functional traits of epiphytic lichens in response to forest disturbance and as predictors of total richness and diversity. *Ecological Indicators*, 86, 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.021>
- Brodo, I.M.** (1973). Substrate ecology. In: Ahmadjian V, Hale ME Jr (eds). *The Lichens*. Academic Press, New York.
- Brodo, I. M., Sharnoff, S. D., Sharnoff, S.** (2001). *Lichens of North America*. Yale University Press.
- Cáceres, M. E., Lücking, R., Rambold, G.** (2007). Phorophyte specificity and environmental parameters versus stochasticity as determinants for species composition of corticolous crustose lichen communities in the Atlantic rain forest of northeastern Brazil. *Mycol Progress*, 6, 117-136. <https://doi.org/10.1007/s11557-007-0532-2>
- Candela, O. M. & Fernández, L.** (2021). Diversidad, composición y caracterización de la brioflora del área del volcán Cerro Machín (IBAGUÉ – TOLIMA) [Tesis de Pregrado, Universidad del Tolima]. Repositorio Universidad del Tolima.
- Chao, A. & Jost, L.** (2012). Coverage-based rarefaction and extrapolation: standardizing samples by completeness rather than size. *Ecology*, 93, 2533-2547. <https://doi.org/10.1890/11-1952.1>
- Chuquimarca, L., Gaona, F. P., Iñiguez-Armijos, C., Benítez, Á.** (2019). Lichen Responses to Disturbance: Clues for Biomonitoring Land-use Effects on Riparian Andean Ecosystems. *Diversity*, 11 (5), 73. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/d11050073>
- CORTOLIMA & Universidad del Tolima.** (2008). Plan General de Ordenación Forestal para el Departamento del Tolima - PGO. Coporación Autónoma Regional del Tolima, Universidad del Tolima.
- CORTOLIMA. & Universidad del Tolima.** (2019). Informe de inventario de biodiversidad de fauna y flora y los aspectos socioeconómicos como línea base para la declaratoria de los predios Reserva Forestal Protectora Regional Machín. Coporación Autónoma Regional del Tolima, Universidad del Tolima.
- Correa-Carmona, Y., Giusti, A., Haxaire, J., Rougerie, R., Kitching, I.J.** (2021). Three new species of the *Xylophanes crotonis* species-group (Lepidoptera: Sphingidae) from Colombia and a neotype designation for *Xylophanes aristor*. *European Journal of Entomology*, 118, 64-81. <https://doi.org/10.14411/eje.2021.009>
- Cortés, G. P.** (2001). *Estudio geológico de los depósitos de lahar asociados a la actividad eruptiva del Volcán Cerro Machín*. Reporte interno, INGEOMINAS.
- Díaz-Escandón, D., Soto-Medina, E., Lücking, R., Silverstone-Sopkin, P. A.** (2016). Corticolous lichens as environmental indicators of natural sulphur emissions near the sulphur mine El Vinagre (Cauca, Colombia). *The Lichenologist*, 48, 147-159. <https://doi.org/10.1017/S0024282915000535>
- Díaz-Villanueva, E. & Morales-Nieto.** (2019). Líquenes cortícolas como bioindicadores de calidad atmosférica en reservas naturales de la sociedad civil del municipio de IBAGUÉ. (Tesis de pregrado). <https://hdl.handle.net/20.500.12313/784>
- Ellis, C. J. & Coppins, B. J.** (2006). Contrasting Functional Traits Maintain Lichen Epiphyte Diversity in Response to Climate and Autogenic Succession. *Journal of Biogeography*, 33 (9), 1643-1656. <http://www.jstor.org/stable/3838554>
- Ellis, C. & Coppins, B.** (2007). Reproductive strategy and the compositional dynamics of crustose lichen communities on aspen (*Populus tremula* L.) in Scotland. *The Lichenologist*, 39(4), 377-391. <https://doi.org/10.1017/S0024282907006937>
- Esquivel, H. E. & Nieto, V.A.** (2003). *Diversidad florística de la cuenca alta del río Combeima*. Proyecto Servicios Integrados para Jóvenes.
- Fernández-Alonso, J. L.** (2021). Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae X. New species of Quararibea from Colombia and Ecuador. *Anales Del Jardín Botánico De Madrid*, 78(2), e112. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2584>

- Flakus, A., Kukwa, M., Aptroot, A.** (2016). Trypetheliaceae of Bolivia: an updated checklist with descriptions of twenty-four new species. *The Lichenologist*, 48(6), 661-692. <https://doi.org/10.1017/S0024282915000559>
- Frazer, G. W., Canham, C. D., Lertzman, K. P.** (2000). Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0. Technological tools. *Bulletin of the Ecological Society of America*, 81, 191-197.
- Gotelli, N.J. & Colwell, R.K.** (2001). Quantifying biodiversity: procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. *Ecology Letters*, 4, 379-391. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2001.00230.x>
- Gradstein, S. R., Hietz, P., Lücking, R., Lücking, A., Sipman, H. J. M., Vester, H., ... Gardette, E.** (1996). How to sample the epiphytic diversity of tropical rain forest. *Ecotropica*, 2, 59-72.
- Gumboski, E. L., Eliasaro, S., Scur, M. C., Lorenz-Lemke, A. P., da Silveira, R. M. B.** (2018). A new riparian species of *Ramalina* (Ramalinaceae) from Brazil, with a key to neotropical saxicolous species. *The Lichenologist*, 50(5), 541-553. <https://doi.org/10.1017/S0024282918000361>
- Gutiérrez, M. F. C., Medina, E. A. S., Escandón, D. D.** (2019). Especificidad de forófito en líquenes cortícolas en un gradiente de intervención en Guarinocito, Caldas. *Revista Biodiversidad Neotropical*, 9(4), 1-12. <https://doi.org/10.18636/bioneotropical.v9i4.289>
- Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D.** (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4, 1-9.
- Hill, M.O.** (1973). Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology*, 54(2), 427-432. <https://doi.org/10.2307/1934352>
- Hochstein, M. P. & Browne, P. R.** (2000). Surface manifestations of geothermal systems with volcanic heat sources. *Encyclopedia of volcanoes*, 1, 835-855.
- Holdridge, L.R.** (1966). *Life zone ecology*. San José, Costa Rica. Tropical Science Center.
- Hsieh, T.C., Ma, K.H., Chao, A.** (2016). iNEXT: an R package for rarefaction and extrapolation of species diversity (Hill numbers). *Methods Ecol Evol*, 7, 1451-1456. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12613>
- Käffer, M.I., Ganade, G., Marcelli, M.P.** (2009). Lichen diversity and composition in Araucaria forests and tree monocultures in southern Brazil. *Biodiversity Conservation*, 18, 3543-3561. <https://doi.org/10.1007/s10531-009-9659-6>
- Käffer, M. I., Port, R. K., Brito, J. B., Schmitt, J. L.** (2021). Lichen functional traits and light influx in the analysis of environmental quality of subtropical riparian ecosystems. *Ecological Indicators*, 125, 107510. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107510>
- Kitaura, M. J., Gumboski, E. L., Koroiva, R.** (2018). Five new records and an identification key of the lichen genus *Leptogium* from Santa Catarina state, Brazil. *Rodriguésia*, 69, 423-428. <https://doi.org/10.1590/2175-7860201869213>
- Kitaura, M. J., Koch, N. M., Lucheta, F., Käffer, M. I., Schmitt, J. L., Pedroso, J., ... Canez, L. S.** (2019). A new species and new records of *Leptogium* (Ach.) Gray (Collembataceae, Peltigerales) from Rio Grande do Sul State with an identification key for the genus. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 91(1), 1-26. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180313>
- Koch, N. M., Maluf, R. W., Martins, S. M. de A.** (2012). Comunidade de líquens foliosos em *Piptocarpha angustifolia* Dusén ex Malme (Asteraceae) em área de Floresta Ombrófila Mista no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. *Iheringia, Série Botânica*, 67(1), 47-57. <https://isb.emnuvens.com.br/iheringia/article/view/31>
- Koch, N. M., de Azevedo Martins, S. M., Lucheta, F., Müller, S. C.** (2013). Functional diversity and traits assembly patterns of lichens as indicators of successional stages in a tropical rainforest. *Ecological indicators*, 34, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.04.012>
- Koch, N. M., Stanton, D., Müller, S. C., Duarte, L., Spielmann, A. A., Lücking, R.** (2022). Nuanced qualitative trait approaches reveal environmental filtering and phylogenetic constraints on lichen communities. *Ecosphere*, 13(4), e4042. <https://doi.org/10.1002/ecs2.4042>
- Komposch, H., & Hafellner, J.** (2000). Diversity and vertical distribution of lichens in a Venezuelan tropical lowland rain forest. *Selbyana*, 11-24.
- Kricke, R.** (2002). Measuring Bark pH. In: Nimis, P.L., Scheidegger, C., Wolseley, P.A. (eds). *Monitoring with Lichens — Monitoring Lichens*. NATO Science Series, vol 7. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0423-7_30
- Lücking, R.** (1999). Líquenes folícolas de la Estación Biológica La Selva, Costa Rica: Inventario, comunidades y comparación florística de tipos de vegetación. *Revista De Biología Tropical*, 47(3), 287-308. <https://doi.org/10.15517/rbt.v47i3.19079>

- Lakatos, M., Rascher, U., Büdel, B.** (2006). Functional characteristics of corticolous lichens in the understory of a tropical lowland rain forest. *New phytologist*, 172(4), 679-695. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01871.x>
- López, L. G. C., Medina, E. A. S., Peña, A. M.** (2016). Effects of microclimate on species diversity and functional traits of corticolous lichens in the Popayan Botanical Garden (Cauca, Colombia). *Cryptogamie, Mycologie*, 37(2), 205-215. <https://doi.org/10.7872/crym/v37.iss2.2016.205>
- Lücking, R.** (1998). Ecology of foliicolous lichens at the “Botarrama” Trail (Costa Rica), a Neotropical rainforest site. Part II. Patterns of diversity and area cover, and their dependence on microclimate and phorophyte species. *Ecotropica*, 4, 1-24.
- Lücking, R.** (1999 a). Líquenes folícolas de la Estación Biológica La Selva, Costa Rica: Inventario, comunidades y comparación florística de tipos de vegetación. *Revista De Biología Tropical*, 47 (3), 287-308. <https://doi.org/10.15517/rbt.v47i3.19079>
- Lücking, R.** (1999 b). Ecology of foliicolous lichens at the “Botarrama” trail (Costa Rica), a neotropical rain forest. I. Species composition and its ecogeographical implications. *Biotropica*, 31(4), 553-564.
- Lücking, R.** (1999). Ecology of Follicolous Lichens at the ‘Botarrama’ Trail (Costa Rica), a Neotropical Rainforest. IV. Species Associations, their Salient Features and Their Dependence on Environmental Variables. *The Lichenologist*, 31(3), 269-289. <https://doi.org/10.1006/lich.1998.0186>
- Lücking, R., Archer, A. W., Aptroot, A.** (2009). A world-wide key to the genus *Graphis* (Ostropales: Graphidaceae). *The Lichenologist*, 41(4), 363-452. <https://doi.org/10.1017/S0024282909008305>
- Lücking, R., Forno, M. D., Moncada, B., Coca, L. F., Vargas-Mendoza, L. Y., Aptroot, A., ... Lawrey, J. D.** (2017). Turbo-taxonomy to assemble a megadiverse lichen genus: seventy new species of *Cora* (Basidiomycota: Agaricales: Hygrophoraceae), honouring David Leslie Hawksworth’s seventieth birthday. *Fungal Diversity*, 84, 139-207. <https://doi.org/10.1007/s13225-016-0374-9>
- Lücking, R., Moncada, B., Soto-Medina, E., Simijaca, D., M. Sipman, H. J.** (2021). Actualización nomenclatural y taxonómica del Catálogo de Líquenes de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45(174), 147-189. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1266>
- Martínez, T., Valencia, R., Ceballos, H., Narváez, M., Pulgarín, A., Correa, T., Navarro, A., Murcia, A., Zuluaga, M., Rueda, G., Pardo, V.** (2014). *Geología y estratigrafía del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz. Informe final, Bogotá –Manizales –Popayán*. Servicio Geológico Colombiano.
- McCune, B.** (2000). Lichen Communities as Indicators of Forest Health. *The Bryologist*, 103(2), 353-356. [https://doi.org/10.1639/0007-2745\(2000\)103\[0353:LCAIOF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1639/0007-2745(2000)103[0353:LCAIOF]2.0.CO;2)
- McCune, B., Grace, J.B., Urban, D.L.** (2002). *Analysis of ecological communities*. Portland, Oregon: MjM Software design.
- Menezes, A.** (2013). Resposta da comunidade de microlíquenes corticícolas a fatores ambientais em duas fitofisionomias. 2013. 111 f (Doctoral dissertation, Dissertação (Mestrado em Ecologia e Conservação) –Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.
- Merinero, S., Rubio-Salcedo, M., Aragón, G., Martínez, I.** (2014). Environmental factors that drive the distribution and abundance of a threatened cyanolichen in Southern Europe: A multi-scale approach. *American Journal of Botany*, 101 (11), 1876-1885. <https://doi.org/10.3732/ajb.1400077>
- Moncada, B., Coca, L. F., Lücking, R.** (2013 a). Neotropical members of *Sticta* (lichenized Ascomycota: Lobariaceae) forming photosymbiodemes, with the description of seven new species. *The Bryologist*, 116 (2), 169-200. <https://doi.org/10.1639/0007-2745-116.2.169>
- Moncada, B., Lücking, R., Betancourt-Macuase, L.** (2013 b). Phylogeny of the Lobariaceae (lichenized Ascomycota: Peltigerales), with a reappraisal of the genus *Lobariella*. *The Lichenologist*, 45 (2), 203–263. Corrigendum. *The Lichenologist*, 45 (4), 581-581 <https://doi.org/10.1017/S0024282913000273>
- Moncada, B.** (2012). El género *Sticta* (Schreb.) Ach. en Colombia: taxonomía, ecogeografía e importancia. (Tesis Doctoral). Universidad Nacional de Colombia.
- Moncada, B., Coca, L. F., Díaz-Escandón, D., Jaramillo-Ciro, M., Simijaca-Salcedo, D., Soto-Medina, E., Lücking, R.** (2022). Diversity, Ecogeography, and Importance of Lichens

- of Colombia. In: de Almeida, R. F., Lücking, R., Vasco-Palacios, A. M., Gaya, E. & Diazgranados, M. (eds.). *Catalogue of Fungi of Colombia*. Kew Publishing, Royal Botanic Gardens. ISBN 978-1-84246-790-9; eISBN 978-1-84246-791-6.
- Moncada, B. & Lücking, R.** (In prep.). Introducción a la Biología y Taxonomía de los LÍQUENES colombianos Una Guía para Reconocer su Biodiversidad e Importancia.
- Moreno, C. E. (Ed.)**. (2019). *La biodiversidad en un mundo cambiante: fundamentos teóricos y metodológicos para su estudio*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Moreno, M. D. C.** (2012). Influencia de la actividad sísmica del Volcán Machín en la generación de deslizamientos (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia). Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola.
- Murillo-Serna, J. S., Londono-Echeverri, Y., David-Higuaita, H.** (2021). *Miconia lorenaensis* (Melastomataceae), a new species from Colombian Andes. *Phytotaxa*, 501(1), 162-170. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.501.1.7>
- Müller, J.** (1894) Lichenes usambarenses. *Botanischer Jahrbücher für Systematik, Pflanzengeschichte und Pflanzengeographie*, 20, 238-298.
- Neita-Moreno, J. C. & Ratcliffe, B. C.** (2019). The Genera of *Agaocephalini* (Coleoptera: Scarabaeidae: Dynastinae) of Colombia, with Description of a New Species of *Lycomedes* Brême. *The Coleopterists Bulletin*, 73(4), 1049-1063. <https://doi.org/10.1649/0010-065X-73.4.1049>
- Neuwirth, G. & Lücking, R.** (2009). A new species of *Graphis* (Graphidaceae) from Venezuela. *The Lichenologist*, 41(3), 271-274. <https://doi.org/10.1017/S0024282909008354>
- Nöske, N.** (2004). Effekte anthropogener Störung auf die Diversität kryptogamischer Epiphyten (Flechten, Moose) in einem Bergregenwald in Südecuador (Doctoral dissertation) Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen.
- Orange A., James P. W., White F. J.** (2001). *Microchemical methods for the identification of lichens*. British Lichen Society. ISBN: 9780954041892
- Orejuela, A., Villanueva, B., Orozco, C. I., Knapp, S., Särkinen, T.** (2022). Monograph of *Doselia* (Solanaceae), a new hemiepiphytic genus endemic to the northern Andes. *PhytoKeys*, 202, 73-96. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.202.82101>
- Piedrahita, D. A., Aguilar-Casallas, C., Arango-Palacio, E., Murcia, H., Gómez-Arango, J.** (2018). Estratigrafía del cráter y morfología del volcán Cerro Machín, Colombia. *Boletín de Geología*, 40(3), 29-48. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n3-2018002>
- Ramírez-Morán, N. A., León-Gómez, M., Lücking, R.** (2016). Uso de biotipos de líquenes como bioindicadores de perturbación en fragmentos de Bosque Altoandino (Reserva Biológica” Encenillo”, Colombia). *Caldasia*, 38(1), 31-52. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v38n1.5782>
- Rincon-González, M., Escalante, M. F.** (2020). *Epidendrum machinense* (Orchidaceae: Laeliinae), a new species from Colombia. *Phytotaxa*, 435(1), 33-40. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.435.1.4>
- Rincón-González, M., Sierra-Ariza, M. A., Karremans, A. P.** (2020). A new species of *Acianthera* (Orchidaceae, Pleurothallidinae) from the Cordillera Central of Colombia. *Phytotaxa*, 474 (1), 93-98. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.474.1.10>
- Rivas-Plata, E., Lücking, R., Lumbsch, H. T.** (2008). When family matters: an analysis of Thelotremaaceae (lichenized Ascomycota: Ostropales) as bioindicators of ecological continuity in tropical forests. *Biodiversity and conservation*, 17, 1319-1351. <https://doi.org/10.1007/s10531-007-9289-9>
- Rosabal, D., Burgaz, A.R., Altamirano, A., & Aragón, G.** (2012). Differences in diversity of corticolous lichens between interior and edge of the Monte Barranca semi-deciduous forest, Santiago de Cuba. *The Bryologist*, 115(2), 333-340. <https://doi.org/10.1639/0007-2745-115.2.333>
- Rosabal, D., Burgaz, A. R., Reyes, O. J.** (2013). Substrate preferences and phorophyte specificity of corticolous lichens on five tree species of the montane rainforest of Gran Piedra, Santiago de Cuba. *The Bryologist*, 116(2), 113-121. <https://doi.org/10.1639/0007-2745-116.2.113>
- Sarlej, M. I., Michlig, A., Ferraro, L. I.** (2018). El género *Heterodermia* (Physciaceae, Lecanorales) en la reserva de biosfera Yaboty (Misiones, Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 53(1), 9-16. <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v53.n1.19858>
- Servicio Geológico Colombiano** (2007). *Generalidades Volcán Cerro Machín*. <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanCerroMachin/Paginas/generalidades-volcan-cerro-machin.aspx>.

- Sierra-Ariza, M.A., Rincón-González, M. W. M., Villanueva-Tamayo, B.** (2022). Una nueva especie de *Pleurothallis* (Pleurothallidinae) subsección Macrophyllae-Fasciculatae para la región Andina colombiana. *Lankesteriana: International Journal on Orchidology*, 22(1), 25-35. <https://dx.doi.org/10.15517/lank.v22i1.50823>
- Simijaca, D.** (2011). Líquenes epífitos de *Quercus humboldtii* en el parque natural municipal Robledales de Tipacoque (Boyacá-Colombia) (trabajo de pregrado, Ciencias Biológicas). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Bogotá.
- Simijaca, D., Moncada, B., Lücking, R.** (2018). Bosque de roble o plantación de coníferas, ¿qué prefieren los líquenes epífitos? *Colombia forestal*, 21(2), 123-141. <https://doi.org/10.14483/2256201X.12575>
- Sipman, H. J. M.** (1989) Lichen zonation in the Parque Los Nevados transect. In T. van der Hammen & V. J. Alvarez, eds. *La Cordillera Central Colombiana Transecto Parque los Nevados. Studies on Tropical Andean Ecosystems*. Vaduz, Liechtenstein: J. Cramer. ISBN 978-3-443-65002-5.
- Sipman, H. J. M.** (1996). Corticolous lichens. In: Gradstein SR, Hietz P, Lücking R, Lücking A, Sipman HJM, Vester HFM, Wolf JHD, Gardette E. *How to sample the epiphytic diversity of tropical rainforests*. Ecotropica.
- Sipman, H. J. M.** (2005). *Identification key and literature guide to the genera of Lichenized Fungi (Lichens) in the Neotropics*. Botanischer Garten Und Botanisches Museum Berlin-Dahlem. <https://archive.bgbm.org/BGBM/STAFF/Wiss/Sipman/keys/>
- Sipman, H. J. M.** (2006). Diversity and biogeography of lichens in Neotropical montane oak forests. In M. Kappelle (Ed.), *Ecology and Conservation of Neo-tropical montane oak forests*. Ecological Studies 185. Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/3-540-28909-7_6
- Sipman, H., Hekking, W., Aguirre, J.** (2008). *Checklist of lichenized and lichenicolous fungi from Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Naturales.
- Sipman, H. J. M. & Aguirre-C., J.** (2016). Líquenes. In: Bernal, R., Gradstein, S. R. & Celis, M. *Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia*. Volumen 1. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Naturales.
- Sipman, H. J. M. & Harris, R. C.** (1989) Lichens. In H. Lieth & M. J. A. Werger (eds). *Tropical Rain Forest Ecosystems-Biogeographical and Ecological Studies*. Amsterdam: Elsevier.
- Soto-Medina, E., Lücking, R., Bolaños-Rojas, A.** (2012). Especificidad de forófito y preferencias microambientales de los líquenes cortícolas en cinco forófitos del bosque premontano de finca Zingara, Cali, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 60(2), 843-856. <https://doi.org/10.15517/rbt.v60i2.4017>
- Soto-Medina, E., Lücking, R., Silverstone-Sopkin, P. A., Torres, A. M.** (2019). Changes in functional and taxonomic diversity and composition of corticolous lichens in an altitudinal gradient in Colombia. *Cryptogamie, Mycologie*, 40(6), 97-115. <https://doi.org/10.5252/cryptogamie-mycologie2019v40a6>
- Soto-Medina, E., Díaz, D., Montaña, J.** (2021). Biogeografía y riqueza de los líquenes de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45 (174), 122–135. <https://doi.org/10.18257/racefyn.1224>
- Stropp, J., Umbelino, B., Correia, R. A., Campos-Silva, J. V., Ladle, R. J., Malhado, A. C. M.** (2020). The ghosts of forests past and future: deforestation and botanical sampling in the Brazilian Amazon. *Ecography*, 43(7), 979-989. <https://doi.org/10.1111/ecog.05026>
- Vainio, E.** (1901). Lichens. In: Hiern, W. P., Rendle, A. B., & Welwitsch, F. M. J. *Catalogue of the African Plants collected by Dr. Friedrich. Welwitsch in 1853-1861, vol. 2(2)*. London: 396-463.
- Vargas, R., Rojas, A. M., Huertas, F. A., Fernández, D. L., Murillo, M. H., Dávila, Y. P., Valderrama, S.** (2007). *Plan General de Ordenación Forestal para el Departamento del Tolima*, Tomo II. Universidad del Tolima.
- Victorino, R.** (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.
- Volkova, J. S.** (2020). Vadimas Volkova, gen. n., a new genus of Megalopygidae (Insecta: Lepidoptera). *SHILAP Revista de lepidopterología*, 48(189), 31-38.
- Watanabe, K. & Kitagawa, R.** (2004). Alteration mechanism of biotite in granitic rock caused by crustose lichen “*Porpidia*”. *Clay Science*, 12(4), 249-257.

-
- Wirth, M. & Hale Jr, M. E.** (1978). Morden-Smithsonian expedition to Dominica: the lichens (Graphidaceae). *Smithsonian Contributions to Botany*, 40, 1-64. <https://doi.org/10.5479/si.0081024X.40>
- Wolf, J.** (1993a). Diversity patterns and biomass of epiphytic bryophytes and lichens along an altitudinal gradient in the northern Andes. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 80(4), 928–960. <https://doi.org/10.2307/2399938>
- Wolf, J.** (1993b). Epiphyte communities of tropical montane rain forest in the northern Andes II. Upper montane communities. *Phytocoenologia*, 22(1), 53-103. <https://doi.org/10.1127/phyto/22/1993/53>
- Wolf, J. H.** (1994). Factors controlling the distribution of vascular and non-vascular epiphytes in the northern Andes. *Vegetatio*, 112, 15-28. <https://doi.org/10.1007/BF00045096>
- Zárate-Arias, N., Moreno-Palacios, M., Torres-Benítez, A.** (2019). Diversidad, especificidad de forófito y preferencias microambientales de líquenes cortícolas de un bosque subandino en la región Centro de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(169), 737-745. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.886>

Artículo original

Condición de la población de *Ageneiosus pardalis* (Siluriformes: Auchenipteridae) en el río Tuira, Panamá

Condition of the *Ageneiosus pardalis* (Siluriformes: Auchenipteridae) population in the Tuira River, Panama

© Samuel Valdés-Díaz¹, © Humberto Garcés B.^{2,*}, © Francisco Barahona²,
© Indra Candanedo³

¹ Biodiversity Consultant Group, Panamá

² Departamento de Biología Marina y Limnología, Universidad de Panamá, Campus central, Panamá

³ Centro Regional Panamá Oeste, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

Resumen

La doncella (*Ageneiosus pardalis*) es una de las principales especies en la pesca artesanal del Darién y contribuye a la dieta y los ingresos de las comunidades que habitan a orillas del río Tuira. Hay pocos datos sobre la biología, la ecología y las pesquerías de esta especie en Panamá. En este estudio se estimó la relación entre longitud y peso, las relaciones lineales de talla y el factor de condición (K) de la doncella en el río Tuira para determinar el estado de su población. Se recolectaron 185 especímenes del pez entre junio de 2022 y julio de 2023 en un tramo de 28 km en la cuenca media del río Tuira. Los especímenes se midieron y pesaron, se evaluó su composición por talla, la relación entre peso y longitud y el factor de condición. La longitud total promedio fue de $35,9 \pm 5,9$ cm con un rango entre 21 y 54, siendo 30 y 40 cm las tallas más frecuentes; el peso promedio fue de $369,10 \pm 22,1$ g, con un rango entre 39,6 y 1.320 g. Los datos son consistentes con condiciones de sobrepesca de doncella en la cuenca media del río Tuira, con el 75 % de la captura por debajo de la talla de madurez sexual estimada para la especie. El análisis de la relación entre longitud y peso fue positivo (> 3), altamente significativa en ambas variables, y el crecimiento alométrico también fue positivo. Los valores del factor de condición de la doncella en el Tuira reflejan que la población subsiste en condiciones subóptimas.

Palabras claves: Alometría; Darién; Doncella; Ictiofauna; Pesquerías.

Abstract

Ageneiosus pardalis (doncella) is considered one of the main species in the artisanal fishing of the Darien contributing to the diet and income of the communities that live on the banks of the Tuira River. There is little data on the biology, ecology, or fisheries of this species in Panama. Here, we estimated the longitude-weight ratio, the linear proportions of height, and the factor of condition (K) of the doncella in the Tuira River to determine the state of its population. A total of 185 doncella specimens were collected between June 2022 and July 2023 over a 28 km stretch in the middle basin of the Tuira River. The specimens were measured and weighed, and their composition was evaluated by size, weight-length ratio, and condition factor. The average total length was 35.9 ± 5.9 cm with a range between 21 and 54, with the most common sizes being 30 and 40 cm; the average weight was 369.10 ± 22.1 g ranging from 39.6 to 1,320 g. These data are consistent with an overfishing condition of the doncella in the mid-Tuira River basin, with 75 % of the catch below the estimated sexual maturity size for the species. The analysis of the length-to-weight ratio indicated a > 3 positive ratio, highly significant between the two variables, with positive allometric growth. The values of the doncella's condition factor in the Tuira reflected suboptimal conditions for its population.

Keywords: Allometry; Darien; doncella; ichthyofauna; fisheries.

Citación: Valdés-Díaz S, *et al.*
Condición de la población de
Ageneiosus pardalis (Siluriformes:
Auchenipteridae) en el río Tuira,
Panamá. Revista de la Academia
Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas
y Naturales. 48(189):852-858, octubre-
diciembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefn.2670>

Editor: Arturo Acero

***Correspondencia:**
Humberto Garcés B.;
hgarcésb@gmail.com

Recibido: 17 de junio de 2024

Aceptado: 17 de octubre de 2024

Publicado en línea: 5 de noviembre
de 2024



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

Introducción

Los peces de la familia Auchenipteridae son siluriformes neotropicales ampliamente distribuidos en las principales cuencas de Suramérica (Ferraris, 2003; Ribeiro *et al.*, 2017). Algunas especies, particularmente las del género *Ageneiosus* Lacépede 1803, tienen importancia comercial y son fuente de proteínas en comunidades que viven de la pesca de subsistencia (Pérez-Nova *et al.*, 2006). Algunas especies de este género tienen potencial para la acuicultura, ya que el desove puede inducirse mediante inyección de hormonas (Contreras *et al.*, 2012).

La doncella (*Ageneiosus pardalis*) se distribuye desde la cuenca del lago de Maracaibo y hasta las cuencas del río Magdalena y el San Juan en Colombia y el Tuira en Panamá (Ribeiro *et al.*, 2017). La doncella es un pez de cuerpo comprimido y cabeza deprimida, con barras o líneas oscuras en los flancos sobre un fondo amarillento. Los machos presentan dimorfismo sexual: los primeros radios de la aleta anal se alargan y modifican hasta formar un órgano intromitente (gonopodio) para facilitar la deposición de esperma dentro de la hembra (Contreras *et al.*, 2012).

A pesar de su importancia comercial y como fuente de alimento, poco se sabe de la biología básica de *A. pardalis*, lo que dificulta su manejo y conservación. Estudios sobre la ecología trófica de *A. pardalis* en el río Sinú indican que es un pez carnívoro con tendencia piscívora (Tobías-Arias *et al.*, 2006). Sin embargo, también hay evidencia de que consume crustáceos e insectos (Atencio-García *et al.*, 2005; Dahl, 1971); por la poca diversidad de su dieta se le considera estenofágico. Hoy la doncella se considera especie en peligro en el libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia como resultado de la sobreexplotación y la interrupción de su migración por la construcción de represas (Mojica *et al.*, 2012; Olaya-Nieto *et al.*, 2003; Salas-Guzmán *et al.*, 2018). Por otra parte, la pérdida de su hábitat dentro de su rango de distribución también ha causado el declive de sus poblaciones (Mallinson & Lyons, 2020).

En Panamá *A. pardalis* es conocida por las comunidades del río Tuira como doncella y se le captura mediante el uso de trasmallos y pesca con anzuelo (A. Peña, com. pers., 2022). Es una de las tres especies más importantes de la pesca artesanal dulceacuícola del Darién (ARAP, 2003) y aporta a la dieta y el comercio de las comunidades que habitan a orillas del río Tuira. Sin embargo, no hay datos precisos sobre la biología, la ecología o las pesquerías de esta especie en Panamá.

El estudio de las relaciones entre longitud y peso y del factor de condición (K) en peces proporciona información indirecta sobre el crecimiento, la madurez, la reproducción, la nutrición y, en consecuencia, el estado de salud de las poblaciones (Jellyman *et al.*, 2013; Ogle, 2018). Ello permite efectuar estudios comparativos a escala espacial y temporal (Anene, 2005; Nishikawa & Okamoto, 2021) que luego pueden ser usados en modelos predictivos del comportamiento o la dinámica tanto de la población como de la comunidad (Matthews, 1998). Esta información es clave para la elaboración de normativas que procuren el uso sostenible de especies de importancia para las pesquerías. En ese contexto, el objetivo de nuestro estudio fue estimar la relación entre longitud y peso, relaciones lineales de talla y el factor de condición de *A. pardalis* en la cuenca media del río Tuira para así determinar el estado de su población.

Materiales y métodos

Área de estudio

El río Tuira, con una longitud de 231 km, es el más caudaloso de la República de Panamá, con un área de influencia de 10.664 km², incluidos los importantes afluentes de Chucunaque y Balsas. El área de estudio se limitó a un tramo de 27 km de la cuenca media del río Tuira entre las localidades de Boca del Real (8° 7' 18" N y 83° 45' 21" O) y Sumacate, asociadas a la laguna de Matusagaratí (8° 9' 12" N y 83° 49' 44" O). Se hicieron tres muestreos en los meses de marzo a junio de 2022 y de marzo a julio de 2023 (Figura 1), coincidiendo con las temporadas secas y lluviosas de cada año.

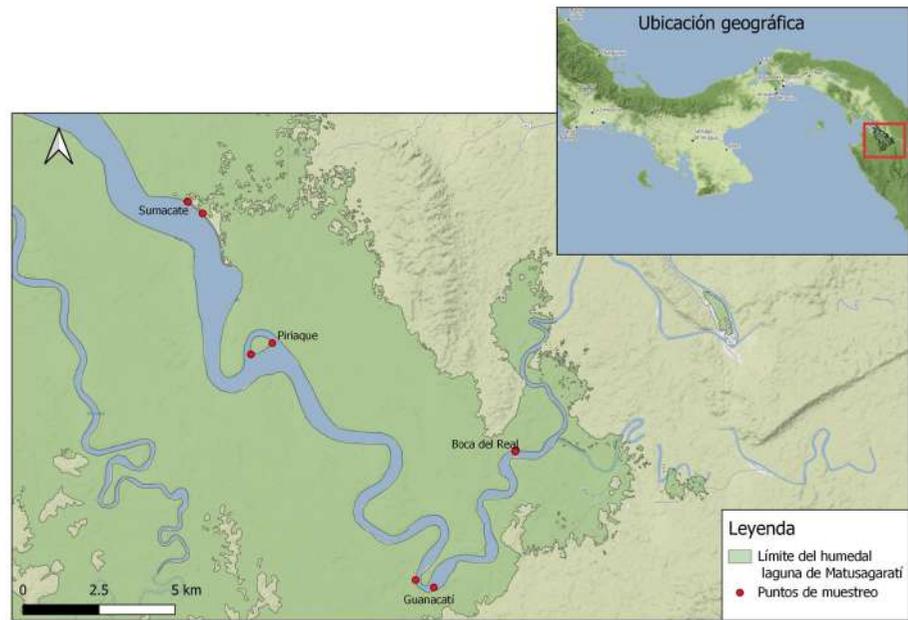


Figura 1. Mapa con los puntos de muestreo en la cuenca media del río Tuira

Muestreo en campo

En el muestreo se emplearon las técnicas y artes de los pescadores locales del río Tuira: se instalaron trasmallos de 6,25 cm de ojo de malla y entre 30 y 60 m de longitud en los sitios de pesca habitual de doncella. El muestreo se hizo en tres periodos diurnos y nocturnos entre el 22 y el 25 de junio de 2022, el 20 y el 23 de marzo de 2023 y el 13 y el 17 de julio de 2023 con las redes extendidas durante dos horas en cada fecha y localidad. Los ejemplares capturados fueron sexados, pesados con una balanza portátil Optika con capacidad de 2.200 g y precisión de 0,1 g. Las medidas de longitud total (LT) y longitud estándar (LE) se tomaron en mm con cinta métrica y posteriormente se pasaron a cm para la estimación de los índices.

Se estimaron las correlaciones lineales de LT-LE con un modelo lineal utilizando el programa R (**R CORE TEAM**, 2023). La relación talla-peso, determinada como la relación entre la longitud total (LT: cm) y el peso (g), se estimó antes de la transformación logarítmica de los valores y el ajuste mediante un modelo lineal (lm) con el uso del paquete FSA (**Derek et al.**, 2023). El factor de condición se calculó con la ecuación $Fc = peso/LT^b$, en donde b corresponde al factor de crecimiento de la relación longitud-peso (**Blackwell et al.**, 2000; **Ogle**, 2018).

Resultados

Se capturaron un total de 185 especímenes; la talla media de captura se estimó en $35,90 \pm 5,9$ cm de LT (**Tabla 1**). La relación entre la longitud de horquilla (LE) y la LT se expresó mediante la ecuación $LT = 1.088 + 1.931$ de LE, con una probabilidad del 98 % (**Figura 2**). La longitud total máxima registrada fue de 54 cm y la mínima de 21 cm; el histograma de frecuencias de LT indicó que el 25 % de la muestra estuvo en un rango de talla entre los 40 y los 55 cm de LT (**Figura 3**).

Los parámetros de la relación longitud-peso de *A. pardalis* en el río Tuira se presentan en la **tabla 1**. El rango de peso de los especímenes capturados fluctuó entre 39,6 y 1.320 g de peso total, con un promedio de $369,1 \pm 22,2$ g. El ajuste del modelo lineal de datos de talla y peso transformados mediante su logaritmo indicaron que el 95 % de la variabilidad del peso se explicaba por la longitud total; la regresión fue altamente significativa ($F_{1,185} = 3.284$, $p < 0,00001$), estadísticamente diferente de cero.

Tabla 1. Valores de talla, peso y relación longitud-peso de *A. pardalis* en la cuenca media del río Tuira

N	Longitud total (cm)			Peso total (g)			Relación longitud-peso			
	Rango	\bar{x}	DS	Rango	\bar{x}	d.s.	b	a	r	r ²
185	21-54	35,9	±5,9	39,6-1 320	369,1	22,19	3,38	0,002	0,951	0,951

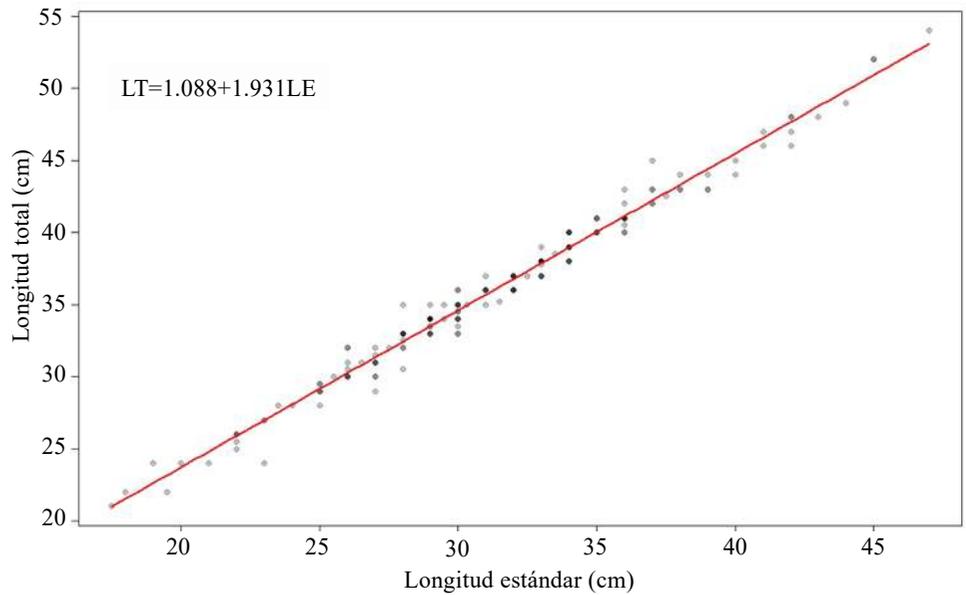


Figura 2. Relación longitud estándar-longitud total de *A. pardalis* en la cuenca media del río Tuira

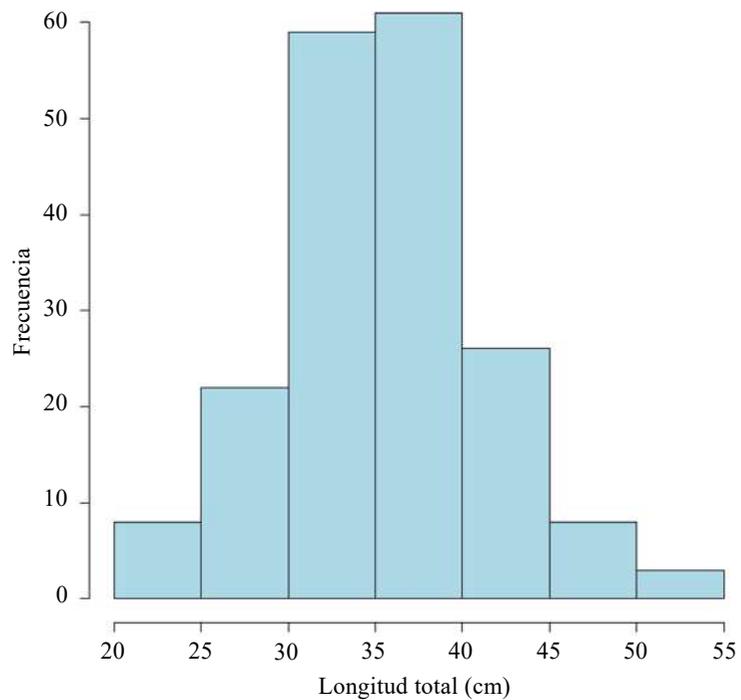


Figura 3. Distribución de frecuencias de tallas de *A. pardalis* en la cuenca media del río Tuira

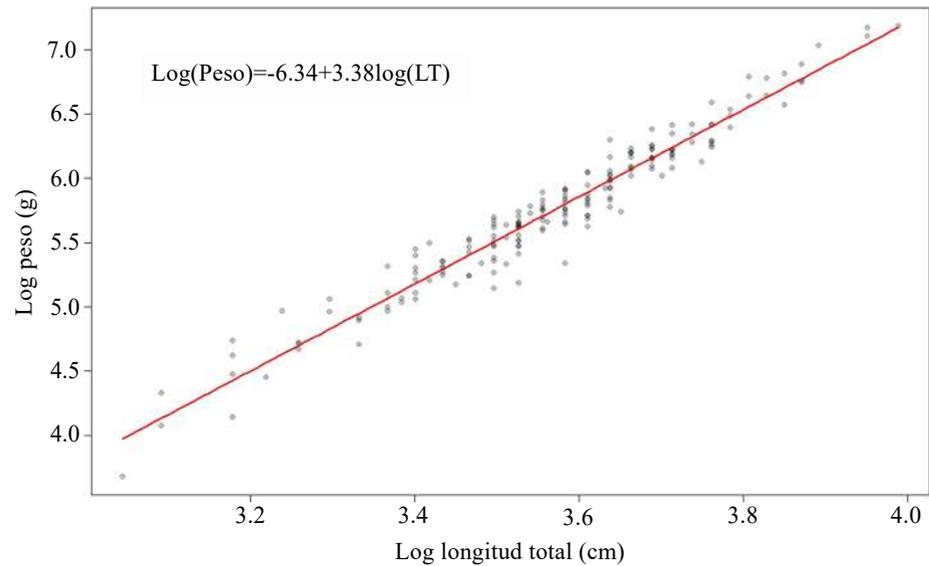


Figura 4. Relación talla-peso de individuos de *A. pardalis* capturados en la cuenca media del río Tuira entre 2022 y 2023 y línea de mejor ajuste en rojo

La ecuación de la línea que mejor se ajustó fue $\text{Log}(\text{peso}) =$ en la escala transformada logarítmicamente (**Figura 4**) y el peso = $0,002 \text{ LT}^{3,38}$ en la escala de los datos originales. Los datos evidenciaron que el coeficiente de crecimiento (b) era de 3,38, lo que confirma que el crecimiento de *A. pardalis* en el río Tuira es alométrico positivo, es decir, el incremento en peso es más rápido que en longitud. El factor de condición presentó un promedio de $0,002 \pm 0,0002$, con un máximo de 0,002 y un mínimo de 0,001.

Discusión

La talla media de captura en nuestro estudio fue inferior a la registrada entre 2000 y 2002 para el río Sinú, donde se registró una talla media de 44,0 cm LT (**Pérez-Nova et al.**, 2006). En esa cuenca se estimó que la talla media de madurez sexual fue de 42 cm de LT para ambos sexos (**Olaya-Nieto et al.**, 2003) y en el río Magdalena fue de 38,8 cm de LT (**Mercado & Palencia**, 2005). En la cuenca media del río Tuira el 75 % de las capturas de *A. pardalis* estarían por debajo de la talla promedio de madurez (40 cm LT) lo que supone un riesgo para la sostenibilidad a largo plazo de las poblaciones.

En Colombia, *A. pardalis* ha presentado disminución en la longitud promedio debido presumiblemente a la sobreexplotación pesquera. Las disminuciones en la longitud promedio y la proporción de individuos desembarcados que están por debajo del tamaño mínimo de captura (35 cm) varían a lo largo del rango de la especie, incluido un 50 % en la cuenca del Magdalena y el 100 % en la cuenca de Ayapel (**Mallinson & Lyons**, 2020). Un estudio de pesquerías en el embalse de Urrá y sus afluentes, determinó que el 81 % de la doncella capturada estuvo por debajo de la talla mínima legal vigente (32 cm LE) y el 51 % por debajo de la talla media de madurez estimada (26,6 cm LE) (**Salas-Guzmán et al.**, 2018).

El peso promedio registrado en nuestro estudio ($369,1 \pm 22,2$ g) fue inferior al promedio de 858,1 g hallado en el río Sinú (**Pérez-Nova et al.**, 2006). El coeficiente de crecimiento ($b=3,4 \pm 0,06$) de *A. pardalis* en el río Tuira fue similar a los obtenidos en el río Sinú (**Pérez-Nova et al.**, 2006) y los registrados para *Ageneiosus sp.* en Puerto Concha, Venezuela (**Urdaneta & de Pasquier**, 2000). Estos datos son consistentes con el crecimiento alométrico positivo mencionado previamente para esta especie.

El factor de condición encontrado en el río Tuira presentó valores similares a los registrados para *A. pardalis* entre el 2000 y el 2002 en el río Sinú, donde se registró un valor promedio de factor de condición de $0,002 \pm 0,10$ (Pérez-Nova *et al.*, 2006). Debido a que el factor de condición varía en función de las condiciones alimentarias recientes (de Souza, 2005), la época del año, el ciclo hidrológico, el sexo y el estado de madurez (Nishikawa & Okamoto, 2021; Ogle, 2018; Pérez-Nova *et al.*, 2006), estos datos deben considerarse con cautela, aunque sí reflejan que durante el periodo de muestreo los peces capturados presentaron condiciones somáticas asociadas a poblaciones en condiciones subóptimas.

Conclusiones

Los datos sobre la población de *A. pardalis* en la cuenca media del río Tuira sugieren un estado de sobreexplotación. El 80 % de las capturas de doncella presentó tallas por debajo de la talla de madurez estimada para esta especie, lo que supone un riesgo para la sobrevivencia a largo plazo de su población en dicha cuenca. Los valores del factor de condición de *A. pardalis* para el curso medio del Tuira en el periodo de estudio, indicaron que la población subsiste en condiciones por debajo de las óptimas. Sin embargo, debe hacerse un muestreo más extensivo en tiempo y espacio para determinar si esta condición es producto de factores ambientales o está relacionada con el ciclo reproductivo. En este sentido, también se requiere determinar el ciclo reproductivo, la talla y la edad de la madurez sexual de *A. pardalis* en el sistema Tuira-Balsas-Chucunaque, con el fin de implementar medidas de manejo que procuren la permanencia de esta especie y los medios de vida de las comunidades que habitan las márgenes del río Tuira.

Agradecimientos

A la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá (SENACYT), proyecto Hidrología, Carbono, Plantas y Peces de Matusagaratí, Darién PFID-FID-2021-114, por el financiamiento brindado.

Contribución de los autores

SVD: recolecta en campo, procesamiento de datos, escritura del borrador del manuscrito; HGB: recolecta en campo, revisión y redacción del borrador y edición de manuscrito final. FB: recolecta en campo y procesamiento en laboratorio. IC: administración del proyecto, recolección en campo y revisión y redacción del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Anene, A. (2005). Condition factor of four cichlid species of a man-made lake in Imo state, southeastern Nigeria. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 5(1), 43-47.
- ARAP. (2003). *Atlas de los recursos marino-costeros de la provincia del Darién*. ARAP-Arden & Price Consulting/University of Miami.
- Atencio-García, V. J., Kerguelén-Durango, E., Dorado, E. C., Cárcamo, R., Vallejo, A., Valderrama, M. (2005). Régimen alimentario de siete especies ícticas en el embalse de la hidroeléctrica Urrá (Córdoba, Colombia). *Revista MVZ Córdoba*, 10(2), 614-622.
- Blackwell, B. G., Brown, M. L., Willis, D. W. (2000). Relative weight (Wr) status and current use in fisheries assessment and management. *Reviews in Fisheries Science*, 8, 1-44.
- Candanedo, I. (2021). *Matusagaratí: el pantanal de Panamá. Resumen para tomadores de decisión*. Universidad Tecnológica de Panamá. Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación.
- Contreras, P., Zapata, B., Rosado, R. (2012). Aspectos preliminares del manejo reproductivo en cautiverio de la doncella (*Ageneiosus pardalis* Lütken, 1874). *Revista MVZ Córdoba*, 17(3), 3147-3153.
- Dahl, G. (1971). *Los peces del norte de Colombia*. Ministerio de Agricultura, Instituto de Desarrollo de los Recursos Renovables (INDERENA).

- Derek, H., Ogle, H., Janson, C., Wheeler, A. P., Dinno, A.** (2023). FSA: Simple Fisheries Stock Assessment Methods. (R package version 0.9.4).
- de Souza, F. M.** (2005). Feeding and condition factor of characidiin fish in Ribeirão Grande system, Southeastern Brazil. *Acta Scientiarum Biological Sciences*, 27(3), 271-276.
- Ferraris, C. J.** (2003). Family Auchenipteridae (Driftwood catfishes). In R. E. Reis, S. O. Kullander y C. J. Ferraris. *Checklist of the freshwater fishes of South and Central América* (pp.470-472). EDIPUCRS.
- Jellyman, P. G., Booker, D. J., Crow, S. K., Jellyman, D. J.** (2013). Does one size fit all? An evaluation of length-weight relationship for New Zealand's freshwater fish species. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 47(4), 450-468.
- Mallinson, J. & Lyons, T. J.** (2020). *Ageneiosus pardalis*. The IUCN Red List of Threatened Species 2020: e.T49830485A85567314. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-2.RLTS.T49830485A85567314.en>.
- Matthews, W. J.** (1998). *Patterns in freshwater fish ecology*. Springer.
- Mercado, A. M. & Palencia, I. M.** (2005). *Contribución al conocimiento de la biología reproductiva de la doncella (Ageneiosus pardalis Lütken, 1874) en río Magdalena a la altura del municipio de Magangue-Bolívar*. Trabajo de grado. Programa de Biología, Facultad de Ciencias Básicas. Universidad del Atlántico.
- Mojica, J. I., Usma, J. S., Álvarez-León, R., Lasso, C. A.** (2012). *Libro rojo de los peces dulceacuícolas de Colombia 2012*. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, WWF Colombia y Universidad de Manizales.
- Nishikawa, T. & Okamoto, S.** (2021). Annual variation in condition factor of sand lance *Ammodytes japonicus* during the estivation period in Harima-Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan. *Regional Studies in Marine Science*, 42, 101644.
- Ogle, D. H.** (2018). *Introductory fisheries analyses with R*. CRC Press.
- Olaya-Nieto, C. W., Segura-Guevara, F. F., Brú-Cordero, S. B., Blanco-Viellar, H. M.** (2003). Biología reproductiva de la doncella (*Ageneiosus pardalis* Lütken, 1874) en el río Sinú, Colombia. In C. W. Olaya-Nieto y V. J. Atencio, *Memorias VII Simposio Colombiano de Ictiología*, (pp. 743749). CIVA
- Pérez-Nova, A., Olaya-Nieto, C., Segura-Guevara, F., Tordecilla-Petro, G., Bru-Cordero, S.** (2006). Relaciones longitud-peso de la doncella *Ageneiosus pardalis* (Pisces: Auchenipteridae) en la cuenca del río Sinú, Colombia. *Dahlia*, 9, 53-61.
- R Core Team.** (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>
- Ribeiro, F. R. V., Rapp Py-Daniel, L. H., Walsh, S. J.** (2017). Taxonomic revision of the South American catfish genus *Ageneiosus* (Siluriformes: Auchenipteridae) with the description of four new species. *Journal of Fish Biology*, 90(4), 1388-1478.
- Salas-Guzmán, F., Valderrama-Barco, M., Barreto-Reyes, C., Atencio-García, V.** (2018). Puntos de referencias biológicos para la ordenación pesquera de *Ageneiosus pardalis* (Auchenipteridae) en el embalse Urrá. *Acta Biológica Colombiana*, 23(2), 163-169.
- Tobías-Arias, A., Olaya-Nieto, C., Segura-Guevara, F., Tordecilla-Petro, G., Brú-Cordero, S.** (2006). Ecología trófica de la doncella (*Ageneiosus pardalis* Lütken, 1874) en la cuenca del río Sinú, Colombia. *Revista MVZ Córdoba*, 1(11), 37-46.
- Urdaneta, R. E. P. & de Pasquier, G. J. A.** (2000). Aspectos biológicos-pesqueros de los bagres paletón (*Sorubim sp.*), malarma (*Platysilurus malarma*) y doncella (*Ageneiosus sp.*) desembarcados en puerto Concha, municipio de Colón, estado Zulia, Venezuela. *Revista Científica*, 10(2), 100-106.

Artículo original

Desarrollo de un modelo dinámico mecanicista para predecir el crecimiento de cuyes (*Cavia porcellus*) machos del genotipo Perú

Development of a mechanistic dynamic model to predict the growth of male Perú genotype guinea pigs (*Cavia porcellus*)

William Armando Tapie^{1,*}, Sandra Lucía Posada-Ochoa²,
Jaime Ricardo Rosero-Noguera², Rafael Muñoz-Tamayo³

¹ Grupo de Investigación en Agronomía y Zootecnia-GIAZ, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia

² Grupo de Investigación en Ciencias Agrarias-GRICA, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

³ Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 91120, Palaiseau, France

Resumen

Los modelos dinámicos sirven para comprender y predecir el crecimiento y la composición corporal de los animales. El objetivo de nuestro estudio fue desarrollar un modelo dinámico mecanicista para predecir el crecimiento y la composición corporal de cuyes alimentados con una dieta granulada. El modelo integró la dinámica de crecimiento diario en términos de ganancia de peso (GPD), peso corporal vacío (PCV), peso vivo (PV), proteína corporal, grasa, agua y cenizas depositadas, así como los requerimientos de energía (EM_m) y proteína para el mantenimiento (PC_m). El modelo se desarrolló en el programa Scilab. Se utilizaron 21 ecuaciones algebraicas derivadas de un estudio de sacrificio comparativo. El modelo se evaluó utilizando la raíz del error cuadrático medio (RECM), el error relativo de predicción (ERP) y el coeficiente de correlación de concordancia (CCC) de los valores observados en 12 cuyes y los predichos por el modelo. Para el PV, el PCV, el agua, las cenizas, los EM_m y la PC_m el modelo mostró una alta concordancia ($CCC > 0,97$) y un ERP menor al 5 %, lo que indicó que las predicciones eran satisfactorias. Las predicciones de la GPD y la proteína depositada tuvieron concordancias sustanciales (CCC de 0,742 y 0,809, respectivamente), con una predicción satisfactoria para la proteína ($ERP < 20$ %). La predicción de la grasa depositada fue menos acertada ($ERE = 54,93$ y $CCC = 0,031$). El modelo representó satisfactoriamente la dinámica de crecimiento de los cuyes, excepto en la predicción de la grasa depositada.

Palabras clave: Peso vivo; Proteína depositada; Grasa depositada; Requerimientos nutricionales; Energía de mantenimiento; Ganancia de peso.

Abstract

Dynamic models are essential for understanding and predicting animal growth and body composition. Here, we developed a dynamic mechanistic model to predict the growth and body composition in guinea pigs fed a pelleted diet. The model integrated daily growth dynamics in terms of weight gain (WG), empty body weight (EBW), live weight (LW), body protein, fat, water, and ash deposition, as well as energy (ME_m) and protein maintenance (CP_m) requirements. The model was developed using the Scilab software. We derived 21 algebraic equations from a comparative slaughter study and we evaluated the model using the root mean square error (RMSE), the relative prediction error (RPE), and the concordance correlation coefficient (CCC) of the values observed in 12 guinea pigs and those predicted by the model. For LW, EBW, water, ash, ME_m , and CP_m , the model showed a high concordance ($CCC > 0.97$) and an RPE below 5%, indicating satisfactory predictions. WG and body protein deposition predictions had substantial concordance (CCC of 0.742 and 0.809, respectively),

Citación: Tapie WA, *et al.* Desarrollo de un modelo dinámico mecanicista para predecir el crecimiento de cuyes (*Cavia porcellus*) machos del genotipo Perú. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(189):859-870, octubre-diciembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2997>

Editor: Martha Patricia Ramírez

***Correspondencia:**

William Armando Tapie;
watapie@unal.edu.co

Recibido: 5 de septiembre de 2024

Aceptado: 6 de noviembre de 2024

Publicado en línea: 29 de noviembre de 2024



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

being satisfactory for the protein (RPE < 20%). Fat deposition prediction was not as satisfactory (RPE = 54.93 and CCC = 0.031). The model adequately represented the growth dynamics of guinea pigs, except for the fat deposition prediction.

Keywords: Live weight; Deposited protein; Deposited fat; Nutritional requirements; Maintenance energy; weight gain.

Introducción

La crianza del cuy es una actividad importante en la economía rural de países como Perú, Ecuador, Colombia y Bolivia, donde está estrechamente vinculada a sus tradiciones y contribuye con la seguridad alimentaria de las comunidades locales (Benavides *et al.*, 2021). En Camerún, República Democrática del Congo, Tanzania y México el cuy también contribuye significativamente a la alimentación y sostenibilidad económica de las poblaciones locales (Ngoula *et al.*, 2017; Ayagirwe *et al.*, 2018; Vargas-Romero *et al.*, 2020).

Con más de 20 millones de cuyes, Perú lidera la producción mundial, con un notable aumento del 20 % en respuesta a la creciente demanda de consumo (MIDAGRI, 2023). Colombia, por su parte, cuenta con una población estimada de aproximadamente 1,5 millones de cuyes (DANE, 2020). La demanda creciente de carne de cuy requiere de animales de mayor tamaño y precocidad, lo cual exige la mejora de los programas de alimentación y cuidado y un mejor conocimiento de los requerimientos y el valor nutricionales de los alimentos (Castro *et al.*, 2022). En los sistemas productivos comerciales se crían animales mejorados genéticamente (tipos Inti, Perú y Andina) para la producción de carne (Avilés *et al.*, 2014), pero se desconocen algunos aspectos relacionados con su crecimiento y nutrición. Entre los requerimientos nutricionales de un animal, las proteínas son el componente fundamental del tejido muscular, además de ciertas hormonas y todas las enzimas (Tapie *et al.*, 2024a), en tanto que la energía se asocia con la ganancia de peso, la madurez sexual, la presencia de estos, la fertilidad y el peso de los gazapos al nacer (Obando, 2013). Son varios los factores que determinan los requerimientos de energía y proteína cruda para mantenimiento; entre los más importantes se puede mencionar el tamaño corporal, que depende de la raza, la edad, el sexo, y la ganancia de peso que está en función de la proporción de grasa y proteína en el tejido depositado y el medio ambiente (Fox & Black, 1984; Xiccato & Trocino, 2020).

Históricamente, los enfoques utilizados para predecir el crecimiento animal se han basado en modelos empíricos y estadísticos que no se fundamentan en principios fisiológicos detallados y que pueden resultar limitados para representar la complejidad de los procesos biológicos involucrados. Frente a esto, en los últimos años ha aumentado considerablemente el interés por aplicar modelos dinámicos mecanicistas en las ciencias animales (Tedeschi, 2022). Estos modelos se basan en principios biológicos y fisiológicos subyacentes y abordan las vías físicas, bioquímicas y metabólicas, entre otras variables, lo que facilita una comprensión más profunda de las interacciones entre los factores internos y externos que influyen en el crecimiento y la composición corporal (Grimm *et al.*, 2016; Anim-Jnr *et al.*, 2020) y constituyen un medio para evaluar el impacto del cambio de dieta en el crecimiento y la composición (Pettigrew, 2016). Además, los modelos híbridos podrían arrojar mejores previsiones e interpretaciones, y permitirían una mayor comprensión de las predicciones, ya que combinan las características conceptuales del modelo mecanicista con el poder predictivo (Tedeschi, 2022). A diferencia de los modelos no lineales empíricos empleados hasta ahora para representar el crecimiento de los cuyes (Noguera *et al.*, 2008; Burgos-Paz *et al.*, 2010; Posada *et al.*, 2015; Vega-Vilca *et al.*, 2023; Tapie *et al.*, 2024b), los modelos dinámicos mecanicistas combinan diferentes técnicas de modelado, como las de los modelos continuos y discretos, para capturar el comportamiento de sistemas complejos. Asimismo, integran elementos deterministas y estocásticos, con el fin de reflejar la naturaleza diversa de un sistema, siendo útiles en campos como la ingeniería, la biología y la economía para representar fenómenos que no

pueden ser descritos por un solo tipo de modelo (**Barton & Lee**, 2002). Así, el desarrollo de un modelo dinámico mecanicista representa un paso adelante en la búsqueda de una aproximación más precisa y holística que prediga el crecimiento y la composición corporal de los cuyes. En este estudio se construyó y se evaluó un modelo dinámico mecanicista específico para cuyes en condiciones de alimentación balanceada, con el objetivo de predecir su crecimiento y la composición corporal.

Metodología

Descripción del modelo

La concepción teórica del modelo requiere las siguientes variables de inicio: peso vivo inicial, consumo de materia seca, contenido de proteína cruda y energía bruta del alimento, las cuales servirán de insumo para calcular el consumo de estos nutrientes. El modelo asume que el peso vivo del animal corresponde a la suma de sus contenidos de proteína, grasa, cenizas y agua. La composición inicial del animal se determinó mediante las ecuaciones propuestas por **Tapie** (2024).

El modelo matemático se basó en el modelo dinámico mecanicista desarrollado para corderos descrito por **Anim-Jnr et al.** (2020). El modelo nos permitió representar la dinámica de crecimiento a través del tiempo en términos de PCV, PV, deposición corporal de proteína, grasa, agua y cenizas, así como los requerimientos de energía y proteína cruda para el mantenimiento.

La descripción de las variables y los valores iniciales utilizados en el desarrollo del modelo se consignan en la **tabla 1**.

Los valores de CMS (g/día) se obtuvieron a lo largo de 84 días de medición en un grupo de 12 animales; el consumo de proteína cruda (CPC, g/día) y el de energía metabolizable (CEM, kcal/día), se calcularon en función del CMS considerando el contenido de proteína cruda (PCa) y la energía metabolizable (EMa) del alimento (Ecuaciones 1 y 2, respectivamente). Estas variables se introdujeron como parámetros de inicio de la simulación. El modelo asume como constantes durante toda la etapa de simulación los coeficientes de eficiencia proteica y energética de una dieta basada en los estándares del National Research Council - NRC (1995) para cuyes de laboratorio, aunque en sistemas comerciales estos factores pueden variar.

$$CPC = CMS_{(g/día)} * PC_{(a)} \quad (1)$$

donde PCa es el contenido de proteína cruda del alimento, que corresponde al 16,36 % en base seca.

$$CEM = CMS * (EBa * EM_a), \quad (2)$$

donde es el EBa es el contenido de energía bruta del alimento, que corresponde a 4515 kcal/kg MS y EMa es la metabolibilidad de la energía, que corresponde a 78 %.

El peso corporal vacío inicial se estimó como el 82,21 % del peso vivo (**Tapie**, 2024) empleando la Ecuación 3

$$PCV = 0,8221 * PV_{i(g)} \quad (3)$$

La proteína corporal inicial (PCi), la grasa corporal inicial (Gi), el agua corporal inicial (Wi), y la ceniza corporal inicial (CZi) se calcularon en función del PCVi. Las ecuaciones 4 a 7 se construyeron con los datos derivados del trabajo de **Tapie** (2024).

$$PCi = 0,2056 * PCVi_{(g)} \quad (4)$$

$$Gi = 0,00784 * PCVi_{(g)} \quad (5)$$

$$Wi = 0,7171 * PCVi_{(g)} \quad (6)$$

$$CZi = 0,054 * PCVi_{(g)} \quad (7)$$

Tabla 1. Variables utilizadas en el desarrollo del modelo

Abreviatura	Unidad	Valor	Definición
MS	g/100 g	0,922	Materia seca del alimento
PCa	g/100 g	0,1635	Proteína cruda contenida en el alimento
CMS	g/día	-	Consumo de materia seca
CPC	g/día	-	Consumo de proteína cruda
CEM	kcal/día	-	Consumo de energía metabolizable
EB	kcal/kg MS	4515	Energía bruta del alimento
EMa	%	78	Metabolicidad de la energía: porción de la energía bruta que se usada como energía metabolizable por el animal
PCVi	g/100 g	0,8221	Peso corporal vacío inicial: peso vivo del animal menos el contenido del tracto digestivo, la vejiga urinaria y la vesícula biliar
PCi	g/100 g	0,2056	Proteína cruda inicial, proporción de proteína contenida en el PCVi
Gi	g/100 g	0,00784	Grasa inicial, proporción de grasa contenida en el PCVi
Wi	g/100 g	0,7171	Agua inicial, proporción de agua contenida en el PCVi
CZi	g/100 g	0,054	Ceniza inicial, proporción de cenizas contenida en el PCVi
EMm	kcal/día	149	Energía metabolizable de mantenimiento por cada kg de PCV metabólico ($PCV^{0,75}$)
PCm	g/día	6,32	Proteína cruda de mantenimiento por cada kg de PCV metabólico ($PCV^{0,75}$)
EMg	kcal/día	-	Energía metabolizable usada para la ganancia de peso por el animal
PCg	g/día	-	Proteína cruda usada para la ganancia de peso por el animal
PCD	-	0,629	Proteína cruda depositada: proporción de la PCg depositada en el cuerpo del animal
EM_PCD	kcal/g	-	EM requerida para el depósito de proteínas
EM_GD	kcal/g	-	EM disponible para el depósito de grasa
GP	g/día	-	Grasa depositada en el cuerpo del animal

Modelación del crecimiento y la composición corporal

La simulación se realizó con las ecuaciones 8 a 21. Los valores de la proteína cruda de mantenimiento (PC_m) y la energía de mantenimiento (EM_m) se calcularon mediante las ecuaciones 8 y 9 (Tapie, 2024). Los requerimientos de EM_m y PC_m en el modelo se calcularon a partir del PCV metabólico.

$$EM_m = 149_{(kcal/día)} * PCV^{0,75} \quad (8)$$

$$PC_m = 6,32_{(g/día)} * PCV^{0,75} \quad (9)$$

La EM y la PC para la ganancia de peso diario (EM_g y PC_g , respectivamente) se calcularon como la diferencia entre el CEM y el CPC y los requerimientos de mantenimiento (Ecuaciones 10 y 11).

$$EM_g = CEM - EM_m \quad (10)$$

$$PC_g = CPC - PC_m \quad (11)$$

Para calcular la deposición diaria de proteína (PCD), se consideró el valor de la eficiencia en el uso de la proteína cruda por parte del animal (0,629) o el valor máximo de 4 g/día de deposición reportado por **Tapie** (2024), tomando siempre el menor de los dos valores (Ecuación 12) para evitar una sobreestimación de la deposición de proteína.

$$PCD = \min [0,629 * PCg_{(g/día)}; PCD_{max}] \quad (12)$$

El cálculo de la EM requerida para el depósito de proteínas (EM_PCD) (**Tapie**, 2024) se realizó con la Ecuación 13.

$$EM_PCD = 13,571 * PCD - 3 * 10^{-13}; R^2 = 0,999, \quad (13)$$

donde PCD corresponde a los gramos de proteína cruda depositada.

La EM disponible para el depósito de grasa (ME_GD) se calculó a partir de la diferencia entre EM_g y EM_PCD, asumiendo que esta depende de la cantidad de energía después de suplir las necesidades de mantenimiento y el crecimiento, utilizando la Ecuación 14.

$$EM_GD = EM_g - EM_PCD \quad (14)$$

La deposición de grasa (GD) se calculó dividiendo la EM_GP por el costo energético de la deposición de grasa (13.478 kcal/g) (**Tapie**, 2024) mediante la Ecuación 15.

$$GD = (EM_GD/13.478) \quad (15)$$

La proteína corporal y la grasa simuladas en los animales en el primer día (PC_1 y G_1) se calcularon sumando la composición inicial y el depósito de estas fracciones en el día simulado (Ecuaciones 16 y 17). Los valores obtenidos representan la composición inicial para la simulación del día siguiente hasta el día 84.

$$PC1 = (PCi + PCD) \quad (16)$$

$$G1 = (Gi + DG) \quad (17)$$

Con base en los datos de la composición corporal de los animales de referencia y los sacrificados al final del estudio reportado por **Tapie** (2024), se crearon ecuaciones para predecir el agua y las cenizas en el cuerpo del cuy en el día uno (W_1 , CZ_1) a partir de la proteína corporal en el día uno (PC_1) (Ecuaciones 18 y 19).

$$W1 = 3.2577 * PC1 + 0,0165; R^2 = 0,851 \quad (18)$$

$$CZ1 = 0,2293 * PC1 + 0,003; R^2 = 0,856 \quad (19)$$

El PCV simulado en el día uno (PCV_1) se calculó como la suma de los componentes químicos del cuerpo en el día uno según la Ecuación 20, en tanto que el PV simulado de los cuyes en el primer día (PV_1) se obtuvo en función del PCV_1 multiplicado por el coeficiente (1,05) obtenido de los animales sacrificados al final ($PCV/PV = 0,95$) (**Tapie**, 2024) según la Ecuación 21.

$$PCV = PC1 + G1 + W1 + CZ1 \quad (20)$$

$$PV = PCV * 1,05 \quad (21)$$

Evaluación del modelo

La evaluación del modelo se llevó a cabo utilizando los datos de 12 cuyes machos del genotipo Perú alimentados *ad libitum* con una dieta granulada. Los parámetros productivos promedio se presentan en la **tabla 2**.

Tabla 2. Promedios y desviación estándar del rendimiento de cuyes del genotipo Perú (n = 12)

Variable	Valor observado
Peso vivo inicial (g)	394 ± 55,0
Peso vivo final (g)	1180 ± 105
Peso corporal vacío final (g)	1121 ± 103
Ganancia de peso (g/día)	9,40 ± 1,60
Proteína depositada (g/día)	2,03 ± 0,33
Grasa depositada (g/día)	2,04 ± 0,57
Energía metabolizable de mantenimiento (kcal/día)	127,1 ± 29
Agua (g)	539,5 ± 141
Cenizas (g)	38,5 ± 10,6
Proteína cruda de mantenimiento (g/día)	5,24 ± 1,2
Consumo de materia seca (g/día)	48,6 ± 6,0
Consumo de proteína cruda (g/día)	8,0 ± 1,0
Consumo de energía metabolizable (kcal/día)	168 ± 19

Análisis estadístico

El modelo se implementó en el programa de acceso abierto Scilab (<https://www.scilab.org/>), en tanto que el análisis estadístico de la información se hizo con el paquete estadístico R, versión 4.1 (**R Core Team**, 2022). El desempeño del modelo se evaluó empleando los siguientes criterios.

Raíz del error cuadrático medio (RMSE): es una métrica que determina la distancia promedio entre los valores predichos por el modelo y los valores reales en el conjunto de datos, por lo tanto, cuanto menor sea su valor, mejor será el ajuste del modelo (**Rosero-Noguera et al.**, 2022)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}, \quad (22)$$

donde n es el número de observaciones, O_i es el i -ésimo valor observado y P_i es el i -ésimo valor predicho por el modelo.

Error relativo de predicción (ERP): se define como el error medio de predicción expresado como porcentaje de la media observada. Un valor de ERP inferior al 10 % es un indicador de predicción satisfactoria y uno superior al 20 % indica una predicción deficiente (**Fuentes-Pila et al.**, 1996)

$$RPE = \left(\frac{RMSE}{\bar{X}} \right) * 100, \quad (23)$$

donde \bar{X} es la media de los valores observados.

Coefficiente de correlación de concordancia (CCC) (Lin, 1989): un valor de CCC de 0,81 a 1,00 indica una predicción casi perfecta, de 0,61 a 0,80 indica una predicción sustancialmente concordante, de 0,41 a 0,60 indica una predicción moderada y valores de 0,21 a 0,40 indican una predicción razonable (**Fuentes-Pila et al.**, 1996; **Visser et al.**, 2012).

$$CCC = \frac{2s_{xy}}{s_x^2 + s_y^2 + (\bar{x} - \bar{y})^2}, \quad (24)$$

donde \bar{x} y \bar{y} corresponden a la media de los valores observados y predichos, respectivamente, s_x^2 y s_y^2 a las varianzas de los valores observados y predichos y s_{xy} a la covarianza, la cual se calcula como:

$$s_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad s_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad s_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}).$$

Resultados

La **figura 1** muestra la comparación entre los valores simulados por el modelo y los observados en un grupo de 12 animales para el PCV, la ganancia de peso y la proteína, la grasa y las cenizas depositadas, así como el contenido de agua. Durante los primeros siete días, el modelo subestimó la ganancia de peso, prediciendo 3,8 g/día en comparación con el valor observado de 10,5 g/día. Además, la dinámica de las tasas diarias de deposición de grasa no fue modelada con precisión; el modelo subestimó los valores desde el primer día hasta el día 20, en tanto que a partir del día 45, los valores de grasa fueron sobrestimados. En contraste, los patrones de deposición de cenizas, proteína, agua y el PCV simulados mostraron una coherencia adecuada con los valores observados.

Crterios estadísticos del desempeño del modelo

En la **tabla 3** se presentan la RMSE, el RPE y el CCC de la evaluación del modelo de crecimiento y composición corporal de cuyes machos del genotipo Perú. Para el PV final, el PCV, el agua, las cenizas, la EMm y la PCm, el modelo presentó un grado de concordancia casi perfecto (CCC superiores a 0,97), en tanto que los valores simulados por el modelo para las variables antes mencionadas, con excepción del agua, presentaron una desviación menor al 5 % (ERP) respecto a los valores reales, lo que indica una predicción satisfactoria.

La concordancia de la predicción de la ganancia de peso y la proteína depositada fue sustancial (CCC de 0,742 y 0,809, respectivamente). Considerando el ERP, la proteína presentó una predicción satisfactoria (RPE < 20 %), en tanto que para la ganancia de peso fue de 24,27 %, es decir, una predicción deficiente (Fuentes-Pila *et al.*, 1996). Por último, a juzgar por los valores de RPE y CCC para la grasa depositada (54,93 y 0,031, respectivamente), el modelo tuvo dificultades para predecir esta variable de manera coherente.

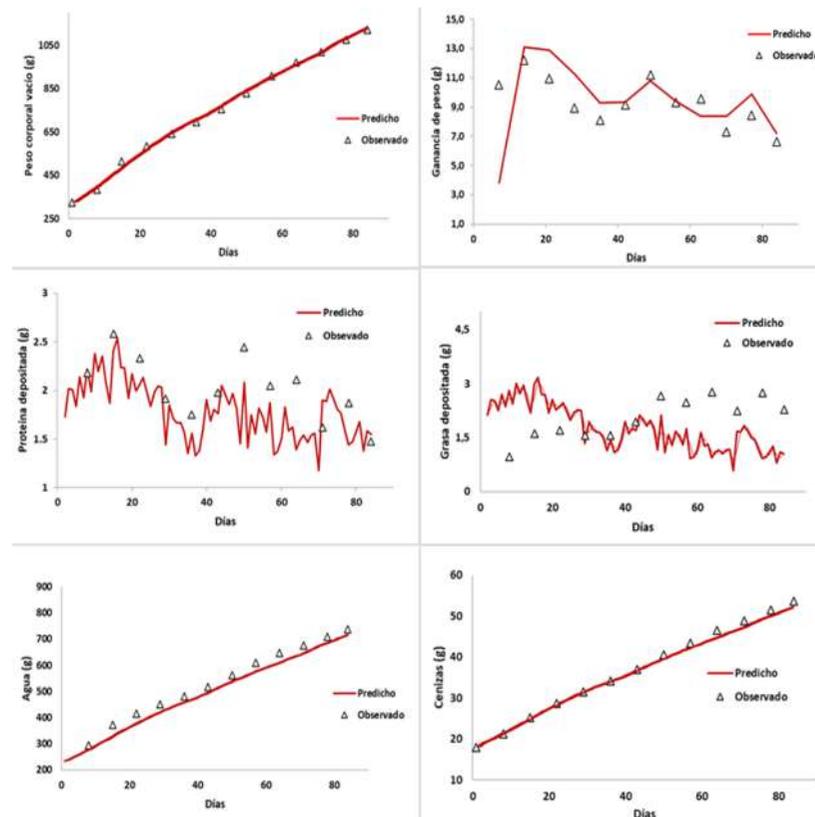


Figura 1. Peso corporal vacío, ganancia de peso, proteína depositada, grasa depositada, cenizas depositadas y contenido de agua en cuyes. Triangulo: valor observado; línea continua: valor predicho

Tabla 3. Indicadores estadísticos del desempeño del modelo para el crecimiento y composición corporal de cuyes machos del genotipo Perú

Variable	Promedio y desviación estándar		Indicadores estadísticos		
	Valor observado	Valor predicho	RMSE	ERP	CCC
Peso vivo final (g)	1180 ± 105	1190,0 ± 0	20,34	2,40	0,996
Peso corporal vacío final (g)	1121 ± 103	1133,4 ± 0	13,68	1,72	0,998
Ganancia de peso (g/día)	9,36 ± 1,6	9,48 ± 2,5	2,172	24,27	0,742
Proteína depositada (g/día)	2,03 ± 0,33	1,8 ± 0,29	0 336	16,62	0,809
Grasa depositada (g/día)	2,04 ± 0,57	1,76 ± 0,62	1 12	54,93	0,031
Energía metabolizable de mantenimiento (kcal/día)	127,1 ± 29	122,2 ± 29,5	2 00	1,57	0,997
Agua (g)	539,5 ± 141	511,5 ± 142	29,10	5,39	0,977
Cenizas (g)	38,5 ± 10,6	37,8 ± 10,02	0,943	2,44	0,998
Proteína cruda de mantenimiento (g/día)	5,24 ± 1,2	5,1 ± 1,22	0,078	1,50	0,997

RMSE: raíz del error cuadrático medio; ERP: error de predicción relativo; CCC: coeficiente de correlación de concordancia

Discusión

Rendimiento general del modelo

El peso de los cuyes en términos de PV y PCV se simuló de manera efectiva como lo indica el alto valor del CCC (>0,99), lo que sugiere que el modelo posee un alto grado de convergencia, ajuste y poder predictivo para estas variables (**Rosero-Noguera et al.**, 2022). El valor de la RMSE demostró que la diferencia media entre los PV y PCV observados y los simulados por el modelo fue de 20,34 y 13,68 g/día, respectivamente. Dichos valores pueden considerarse bajos, ya que según el ERP, que representa la RMSE en términos porcentuales frente al valor medio observado, indican que los valores predichos por el modelo se desviaron de los reales en un 2,40 para el PV y un 1,72 % para el PCV. Según **Fuentes-Pila et al.** (1996), un valor de ERP inferior al 10 % es un indicador de predicción satisfactoria.

El CCC de la GPD fue de 0,742; según **Visser et al.** (2012), este grado de predicción puede interpretarse como sustancial. Para dicho resultado, el valor del ERP indicó una desviación del 24,27 %, valor superior al 20 %, por lo que la predicción del modelo para dicha variable (GPD) se consideraría deficiente (**Fuentes-Pila et al.**, 1996). Cabe aclarar que este resultado podría deberse a que el modelo subestimó la GPD solamente durante los primeros siete días (lo que biológicamente quizás no sea muy relevante), y que a partir de ese momento los valores observados y los predichos fueron coherentes (**Figura 1**), por lo que tales resultados deben interpretarse con precaución. Debe considerarse que factores externos como el ambiente y la genética pueden influir en las predicciones de crecimiento animal. En este estudio nos enfocamos en desarrollar un modelo mecanicista general bajo condiciones controladas. Sin embargo, en futuras aplicaciones el modelo podría adaptarse incorporando parámetros adicionales que reflejen variaciones específicas de genética o manejo en condiciones de campo. Ello permitiría mejorar la precisión y la aplicabilidad del modelo en diversos contextos productivos.

La proteína depositada y la PCm presentaron un CCC de 0,809 y 0,997, respectivamente, es decir, una predicción casi perfecta (**Fuentes-Pila et al.**, 1996). El depósito de proteínas de un animal se considera el factor determinante más importante de la ganancia de peso dado el alto contenido de agua de los tejidos ricos en proteínas (**Tapie**, 2024). Basados en

estos resultados y en el ERP, cuyos valores para las dos fracciones de la proteína simuladas estuvo por debajo del 20 %, puede afirmarse que el modelo presentó una buena capacidad predictiva para estas variables.

Aunque los promedios de deposición de grasa (g/día) observados (2,04) y los predichos (1,76) fueron similares, la dinámica de deposición a través del tiempo no reflejó adecuadamente los patrones biológicos esperados. En estudios previos se encontró que el contenido de músculo fue más bajo y el de grasa más alto en las canales de cuyes de mayor edad que en los más jóvenes (**Sánchez-Macías et al.**, 2018), lo que difiere de las predicciones de nuestro modelo (**Figura 1**). Esta discrepancia podría reducirse si el modelo contara con coeficientes específicos de deposición de grasa para distintas edades, lo cual permitiría simularla con mayor precisión. Sin embargo, debido a la falta de estudios sobre estos coeficientes en cuyes, no fue posible incorporar dicha variabilidad en esta versión del modelo. Actualmente no existen estudios de modelación dinámica en cuyes, pero en otras especies, como los corderos, se ha observado que la simulación de la deposición diaria de grasa también presenta dificultades ($R^2=0,37$; ERP=29,78; CCC=0,34) debido a la inexactitud en la estimación de la composición corporal inicial cuando se utiliza un grupo de sacrificio contemporáneo (**Anim-Jnr et al.**, 2020). Esto se debe en parte a que el tejido graso es altamente sensible a factores como la dieta (**Kouakou et al.**, 2013), la edad y el sexo del animal, los cuales influyen en su variabilidad y dinámica de deposición. Para mejorar la precisión en futuras simulaciones, el modelo podría beneficiarse de ajustes adicionales que contemplen la variabilidad de la composición corporal inicial y parámetros específicos que ajusten las necesidades energéticas y la deposición lipídica en función de la edad y la dieta.

Implicaciones del modelo

Es importante destacar que el modelo puede desviarse de la realidad debido a las simplificaciones inherentes a cualquier modelo de simulación. Estas simplificaciones u omisión de detalles son inevitables e incluso necesarias al modelar un sistema real complejo (**Kobayashi & Salam**, 2000). Por ejemplo, el modelo desarrollado considera la evolución del PCV a través de la deposición de proteína, grasa, agua y cenizas, así como los requerimientos de EMm y PCm y simplifica la estimación de la composición corporal inicial de los animales utilizando las ecuaciones propuestas por **Tapie** (2024), las cuales fueron derivadas de estudios previos. Estas ecuaciones calculan el PCi, la Gi, el Wi y la CZi a partir del PCV estimado, lo que implica que cualquier variabilidad individual no capturada por estas ecuaciones es ignorada.

Además, se asumió que el contenido de PC y EM del alimento era constante durante todo el periodo de simulación, lo cual representa una simplificación significativa en comparación con las posibles fluctuaciones en la calidad del alimento que podrían ocurrir en un entorno real. La eficiencia en el uso de la proteína cruda, fijada en 0,629, se utilizó para calcular la deposición diaria de proteína, lo que implica que tanto la eficiencia como la capacidad de deposición se consideraron constantes, a pesar de que en la realidad pueden variar según la etapa de crecimiento del animal. Asimismo, las ecuaciones que predicen el contenido de agua y cenizas corporales a partir de la proteína corporal se construyeron utilizando relaciones lineales (Ecuaciones 18 y 19), lo que impediría capturar con precisión las interacciones más complejas presentes en la realidad. Por último, el modelo asumió que el PCV era la suma de sus componentes químicos (proteína, grasa, agua y cenizas) y que el PV era una función directa del PCV multiplicado por un coeficiente constante (1,05). Esta simplificación podría no reflejar adecuadamente las fluctuaciones diarias en la composición corporal que pueden ocurrir en condiciones reales. Por lo tanto, la pregunta relevante no es si el modelo es correcto o incorrecto, sino cuánto difiere la salida del modelo de la medición real y por qué. Según **Tedeschi** (2022), el rendimiento del modelo sólo puede discutirse en términos relativos, no absolutos.

No obstante, según **Hurtado et al.** (2021), la modelación matemática del crecimiento y la información sobre el consumo de alimento son los medios principales para desarrollar programas de nutrición de precisión. Desde este punto de vista, los resultados obtenidos

mediante el modelo propuesto resultan relevantes, ya que en Colombia la cría del cuy representa una alternativa económica y social, por lo que conocer el rendimiento productivo de la especie es de gran interés, sobre todo el de los cuyes del tipo Perú, que son los utilizados comúnmente para la producción de carne debido a su precocidad, rápido crecimiento y alto rendimiento (Dalle-Zotte & Cullere, 2019). Como ya se mencionó, el crecimiento animal es uno de los aspectos más importantes al evaluar la productividad en las explotaciones dedicadas a la producción de carne, por lo que el conocimiento de las características asociadas a él con el enfoque que proponemos permitirá orientar los programas de nutrición, alimentación y selección genética, buscando mejorar los índices productivos y el uso eficiente de los recursos alimenticios.

Conclusiones

La simulación del rendimiento con el modelo de crecimiento desarrollado para cuyes se caracterizó por su exactitud. Aunque la simulación de la deposición de grasa fue deficiente, la precisión de las demás variables evaluadas justifica su modelación y aplicación. En general, estos resultados ofrecen evidencia de que un modelo dinámico mecanicista podría usarse para evaluar el crecimiento y la composición en canal de cuyes del genotipo Perú.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2997/4478>

Agradecimientos

A la Fundación CEIBA, a la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Antioquia por el apoyo financiero y a la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Católica de Oriente.

Contribución de los autores

WAT, SLP, RR y RMT: conceptualización, curación de datos, análisis formal, metodología, redacción, revisión y edición; WAT, SLP y RR: adquisición de la financiación; WAT: investigación, administración de proyectos; SLP, RR y RMT: supervisión y validación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Anim-Jnr, S., Morel, P.C.H., Kenyon, P. R., Blair, H. T.** (2020). A mechanistic dynamic simulation model of nutrient utilization, growth and body composition in pre-weaned lambs reared artificially. *Animal Feed Science and Technology*, 261, 114402. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114402>
- Ayagirwe, R.B., Meutchieye, F., Manjeli, Y., Maass, B. L.** (2018). Production systems, phenotypic and genetic diversity, and performance of cavy reared in sub-Saharan Africa: a review. *Livestock Research for Rural Development*, 30(6), 1-12. <http://www.lrrd.org/lrrd30/6/ayagi30105.html>
- Avilés, D., Martínez, A., Landi, V., Delgado, J.** (2014). The guinea pig (*Cavia porcellus*): An Andean resource of interest as an agricultural food source. *Animal Genetic Resources/ Ressources Génétiques Animales/Recursos Genéticos Animales*, 55, 87-91. <https://doi.org/10.1017/S2078633614000368>
- Barton, P.I. & Lee, C.H.** (2002). Modeling, simulation, sensitivity analysis, and optimization of hybrid systems. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*, 12(4), 256-289. <https://doi.org/10.1145/643120.643122>
- Benavides, B., Cisneros-López, H.D., Peláez-Sánchez, R. G.** (2021). Evidencia molecular de *Leptospira interrogans* sensu stricto en *Cavia porcellus* (cuyes) destinados para el consumo humano en el municipio de Pasto, Nariño. *Universidad y Salud*, 24(1), 55-64. <https://doi.org/10.22267/rus.222401.258>

- Burgos-Paz, W., Solarte-Portilla, C., Cerón-Muñoz, M. (2010).** Efecto del tamaño de camada y número de parto en el crecimiento de cuyes (*Cavia porcellus* Rodentia: caviidae). *Revista Lasallista de Investigación*, 7(2), 47-55. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69519014007>
- Castro, B.J., Chirinos, P.D., Quijada-Caro, E. (2022).** Digestible and metabolizable energy prediction models in guinea pig feedstuffs. *Journal of Applied Animal Research*, 50(1), 355-362. <https://doi.org/10.1080/09712119.2022.2079647>
- Departamento Administrativo Nacional De Estadística – DANE. (2020).** *Resultados encuesta nacional agropecuaria – ENA*. <https://www.dane.gov.co/>
- Dalle-Zotte, A. & Cullere, M. (2019).** Carcass Traits and Meat Quality of Rabbit, Hare, Guinea Pig and Capybara. In J. Lorenzo, P. Munekata, F. Barba, F. Toldrá (Eds.) *More than Beef, Pork and Chicken – The Production, Processing, and Quality Traits of Other Sources of Meat for Human Diet*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05484-7_7
- Fox, D.G. & Black, J.R. (1984).** A system for predicting body composition and performance of growing cattle. *Journal of Animal Science*, 58(3), 725-739. <https://doi.org/10.2527/jas1984.583725x>
- Fuentes-Pila, J., DeLorenzo, M.A., Beede, D.K., Staples, C.R., Holter, J.B. (1996).** Evaluation of equations based on animal factors to predict intake of lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 79(9), 1562-1571. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(96\)76518-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(96)76518-9)
- Grimm, K. J., Ram, N., Estabrook, R. (2016).** *Growth modeling: Structural equation and multilevel modeling approaches*. The Guilford Press.
- Hurtado, E. A., Cueva-Navia, T., Barba-Capote, C. (2021).** La modelización del crecimiento de los cerdos bajo un sistema de cama profunda. *Ciencia Unemi*, 14(36), 1-11. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol14iss36.2021pp1-11p>
- Kobayashi, K. & Salam, M. U. (2000).** Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agronomy Journal*, 92(2), 345-352. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.922345x>
- Kouakou, N.D., Grongnet, J.F., Assidjo, N.E., Thys, E., Marnet, P.G., Catheline, D., Legrand, P., Kouba, M. (2013).** Effect of a supplementation of *Euphorbia heterophylla* on nutritional meat quality of Guinea pig (*Cavia porcellus* L.). *Meat Science*, 93(4), 821-826. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.11.036>
- Lin, L.I. (1989).** A Concordance Correlation Coefficient to Evaluate Reproducibility. *Biometrics*, 45(1), 255-268. <https://doi.org/10.2307/2532051>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego-MIDAGRI. (2023).** Plataforma digital única del Estado Peruano. *Razas de cuyes del INIA incrementan en 20 % productividad de la crianza familiar y consumo de su carne*. <https://www.gob.pe/>
- Ngoula, F., Tekam, M.G., Kenfack, A., Tchingo, C.D.A.T., Nouboudem, S., Ngoumtsop, H., Tchoumboue, J. (2017).** Effects of heat stress on some reproductive parameters of male cavie (*Cavia porcellus*) and mitigation strategies using guava (*Psidium guajava*) leaves essential oil. *Journal of Thermal Biology*, 100(64), 67-72. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.01.001>
- Noguera, R., Pereira, R.L., Solarte, C.E. (2008).** Comparación de modelos no lineales para describir curvas de crecimiento en cuyes (*Cavia porcellus*) desde el nacimiento hasta la edad de sacrificio. *Livestock Research for Rural Development*, 20(79), 1-9. <http://www.lrrd.org/lrrd20/5/nogu20079.htm>
- Obando, L. (2013).** Determinación de perfiles metabólicos en fase de levante y cebs de Cuyes (*Cavia porcellus*), bajo diferentes tipos de dietas. [Tesis para optar el título de Magister en ciencias agrarias], Facultad de Ciencias Pecuarias. Universidad de Nariño. <http://biblioteca.udenar.edu.co:8085/atenea/biblio>.
- Pettigrew, J.E. (2016).** Essential role for simulation models in animal research and application. *Animal Production Science*, 58(4), 704-708. <https://doi.org/10.1071/AN15794>
- Posada, S. L., Solarte, C.E., Noguera, R.R. (2015).** Efecto de la línea genética y el sexo sobre el crecimiento en cuyes (*Cavia porcellus*). *Livestock Research for Rural Development*, 27(1). <http://www.lrrd.org/lrrd27/1/posa27001.htm>
- R Core Team. (2022).** *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rosero-Noguera, R., Bedoya-Mazo, S., Posada-Ochoa, S.L. (2022).** Predicción del consumo de materia seca de forraje en vacas lecheras mediante el uso de acelerómetros. *Información Tecnológica*, 33(4), 63-72. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642022000400063>

- Sánchez-Macías, D., Barba-Maggi, L., Morales-delaNuez, A., Palmay-Paredes, J.** (2018). Guinea pig for meat production: a systematic review of factors affecting the production, carcass and meat quality. *Meat Science*, 143, 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.05.004>
- Tapie, W.A.** (2024). Estimación de requerimientos de energía y proteína cruda en cuyes (*Cavia porcellus*) machos enteros de la línea Perú. [Tesis para optar el título de Doctorado en ciencias animales], Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad de Antioquia. <https://hdl.handle.net/10495/40372>
- Tapie, W.A., Posada Ochoa, S.L., Rosero-Noguera, R.** (2024a). A theoretical approach to energy requirements in guinea pigs (*Cavia porcellus*). *Agronomía Mesoamericana*, 35, 57058. <https://doi.org/10.15517/am.2024.57058>
- Tapie, W.A., Giraldo, L., Posada-Ochoa, S., Rosero-Noguera, J.R.** (2024b). Growth curves of male guinea pigs (*Cavia porcellus*) of the Peruvian breed through non-linear models in Colombia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 27(1), 1-10. <https://doi.org/10.56369/tsaes.5179>
- Tedeschi, L.O.** (2022). ASAS-NANP Symposium: Mathematical Modeling in Animal Nutrition: The progression of data analytics and artificial intelligence in support of sustainable development in animal science. *Journal of Animal Science*, 100(6), skac111. <https://doi.org/10.1093/jas/skac111>
- Vargas-Romero, J., Losada-Custardoy, H., Cortés-Zorrilla, J., Alemán-López, V., Vieyra-Durán, J., Luna-Rodríguez, L.** (2020). Propuesta gastronómica con *Cavia porcellus*. *Abanico veterinario*, 10(1), 1-12. <https://doi.org/10.21929/abavet2020.31>
- Vega-Vilca, J.F., Maguiña-Maza, R.M., Cipriano Bautista, J.G., Vega-Cadillo, C.A.** (2023). Modelos no lineales para la descripción del crecimiento de cuyes (*Cavia porcellus*) de saca temprana. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 34(4), e24409. <https://doi.org/10.15381/rivep.v34i4.24409>
- Visser, A., López-Villalobos, N., Morel, P.C.H.** (2012). Validation of a bio-economic dairy production model. In Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production. *New Zealand Society of Animal Production*, 72, 139-143. <http://www.nzsap.org/.../ab12030.pdf>
- Xiccato, G. & Trocino, A.** (2020) Energy and Protein Metabolism and Requirements. In C. De Blas y J. Wisewan. (Ed), Nutrition of the Rabbit. 3rd Edition (41-57). CAB International, Wallingford, UK. <https://www.cabi.org/bookshop/book/9781789241273/>

Artículo original

Escenarios y alternativas de restauración ecológica en paisajes andinos degradados: el caso de la cuenca alta del río Bogotá (Suesca, Cundinamarca)

Scenarios and alternatives for ecological restoration in degraded Andean landscapes: the case of the upper basin of the Bogotá River (Suesca, Cundinamarca)

✉ Esperanza Ruiz-Marín, ✉ Alejandro Peña, ✉ Sabina Alejandra Hernández-Abril,
✉ Lina María Pachón-Blanco, ✉ Orlando Vargas-Ríos, ✉ Nelly Rodríguez-Eraso*

Laboratorio de Restauración ecológica, Departamento de Biología, Universidad Nacional, Bogotá, Colombia

Resumen

La intensificación agrícola y la expansión urbana han provocado la pérdida de hábitat en ecosistemas tropicales, afectando negativamente la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y las condiciones de vida de las personas. En la región andina de Colombia, la dinámica socioecológica y la fragmentación del paisaje hacen necesarios enfoques integrales de restauración ecológica que involucren a la comunidad para mejorar la resiliencia y sostenibilidad del territorio. Este estudio integra una metodología participativa, cuyos resultados se derivaron de encuestas, entrevistas, talleres y recorridos de campo. Se determinaron y tipificaron unidades y estrategias de restauración frente a dos escenarios participativos: la conectividad ecológica y la transición agroecológica, que buscan recuperar la biodiversidad y los procesos ecológicos relacionados con el agua, el suelo, la agricultura y la ganadería (polinización, control natural de plagas, confort térmico) asociando estrategias específicas de restauración y especies vegetales. Concluimos que los escenarios participativos fomentan la gestión comunitaria del territorio en pro de soluciones colaborativas en torno a la restauración ecológica. Consideramos que el estudio puede replicarse en otros paisajes andinos degradados, donde el conocimiento de la comunidad y el acompañamiento de la academia son esenciales para mejorar la efectividad de la restauración.

Palabras clave: Comunidad local; Percepción social; Estrategias de restauración; Sucesión ecológica; Sistema socioecológico.

Abstract

The intensification of agriculture and urban expansion have reduced habitats in tropical ecosystems resulting in the loss of biodiversity and ecosystem services and impacting on the living conditions of people. In the Andean region of Colombia, the socio-ecological dynamics and fragmentation of the landscape underscore the necessity for comprehensive ecological restoration approaches engaging local communities to bolster territories resilience and sustainability. Here we used a participatory methodology to investigate communities' perspectives on the future restoration of their environment. We derived our findings from surveys, interviews, workshops, and field trips. We identified and categorized areas and restoration strategies and we proposed two complementary future scenarios: ecological connectivity and agro-ecological transition aimed at recovering biodiversity and ecological processes associated with water, soil, agriculture, and livestock (pollination, natural pest control, thermal comfort), associating specific restoration strategies and plant species. Our findings indicated that participatory scenarios facilitate community management of territories towards collaborative solutions related to ecological restoration. We believe the study can be replicated in other degraded Andean landscapes where communities' knowledge and academia's support are essential to improve restoration effectiveness.

Keywords: Local communities; Social perceptions; Restoration strategies; Ecological succession; Social-ecological system.

Citación: Ruiz-Marín E, *et al.*
Escenarios y alternativas de restauración ecológica en paisajes andinos degradados: el caso de la cuenca alta del río Bogotá (Suesca, Cundinamarca). Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(189):871-885, octubre-diciembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2671>

Editor: Néstor García

***Correspondencia:**

Nelly Rodríguez Erasos;
nrodriguez@unal.edu.co

Recibido: 17 de junio de 2024

Aceptado: 18 de noviembre de 2024

Publicado en línea: 9 de diciembre de 2024



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

Introducción

Se estima que la intensificación del uso del suelo agrícola ha provocado la pérdida de ecosistemas tropicales (Rodríguez-Echeverry & Leiton, 2021). Cerca del 33 % de los ecosistemas terrestres y al menos un 40 % de las tierras agrícolas a nivel global están degradados (Abhilash, 2021; Leal Pacheco *et al.*, 2018), lo que produce efectos negativos en la biodiversidad y las funciones de los ecosistemas, en el suelo y el agua, así como la pérdida de servicios ecosistémicos (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services-IPBES, 2018; Shimamoto *et al.*, 2018), afectando las condiciones de vida de dos quintas partes de la población mundial en términos sociales y económicos (IPBES, 2018).

En la región andina de Colombia el paisaje actual es el resultado de una larga historia de uso del suelo (Etter & Villa, 2020), que dio paso a la conversión de los bosques para establecer pastos y tierras agrícolas (Rodríguez *et al.*, 2013) y, en las últimas décadas, a la expansión urbana y periurbana (Barrera-Causil & González-Montañez, 2023). Como consecuencia, la pérdida y fragmentación del hábitat han modificado la disponibilidad de recursos y los procesos ecológicos, afectando la resiliencia de los remanentes naturales (Calbi *et al.*, 2020). Los fragmentos, generalmente bosques secundarios, son pequeños (de 3,1 a 3,9 ha) y aislados, ubicados en zonas pendientes y vulnerables (Rubiano *et al.*, 2017; Calbi *et al.*, 2020).

Ante este panorama, los esfuerzos de restauración ecológica han cobrado importancia y se convierten en una estrategia para restablecer procesos ecológicos estructurales y funcionales (Vargas, 2011) que mejoran la presencia de organismos en cerca de 25 %, las reservas de carbono y los atributos del suelo (Benayas *et al.*, 2009; Shimamoto *et al.*, 2028), integrando, además, componentes sociales y económicos (Cecon, 2020). Recientemente, se ha definido la restauración ecológica como “un proceso planificado que tiene como objetivo recuperar la funcionalidad y mejorar el bienestar humano en paisajes degradados” (Schweizer *et al.*, 2021). Su finalidad es mejorar la resiliencia del paisaje y los socioecosistemas, concepto este que reconoce la interdependencia entre las actividades humanas y el medio ambiente en aras de la sostenibilidad (Mansourian, 2021). Sin embargo, la restauración ecológica también presenta nuevos desafíos y paradigmas, e implica una mirada más amplia desde el ámbito social (Cecon *et al.*, 2020; Chazdon *et al.*, 2021). En las dos últimas décadas estos enfoques han incorporado la participación de las personas para legitimar el conocimiento, facilitar la implementación de la restauración ecológica (Cecon, 2013; Fox & Cundill, 2018), fomentar el aprendizaje y la construcción colectiva de la gestión del territorio (Oteros-Rozas *et al.*, 2015) y lograr que las iniciativas de restauración sean más exitosas y sostenibles a largo plazo (Oteros-Rozas *et al.*, 2015; Aguilar & Ramírez, 2021).

Asimismo, la restauración ecológica exitosa debe contemplar diferentes escalas espaciales y temporales y la comprensión del entorno local y regional, por lo que la planificación de los proyectos debe tener en cuenta el contexto del paisaje para definir escenarios, áreas y estrategias de restauración (Tambosi & Metzger, 2013). Las opciones metodológicas deben definirse de acuerdo con los múltiples resultados deseados, considerando la incidencia de la dinámica y complejidad del socioecosistema a la hora de tomar decisiones (Chazdon & Guariguata, 2018). Por último, la sociedad en general tiene la capacidad de planificar a futuro el paisaje, actuando de manera conjunta sobre él y reconociendo los vínculos con la naturaleza y los agroecosistemas como las fuerzas que direccionan la resiliencia ecológica y social frente al cambio global (Biggs *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2018; Viñals *et al.*, 2023).

Este estudio hace parte del proyecto “Manos a la cuenca (MAC): laboratorio social para la gestión integrada del agua y del territorio en Suesca (Cundinamarca)”, una iniciativa local de los habitantes, las ONG, la Junta de Acción Comunal (JAC), las asociaciones de usuarios de agua, las instituciones educativas y la Universidad Nacional de Colombia, cuya primera fase se inició en el periodo 2016-2018 y continuó en una segunda fase en el

periodo 2022-2024. El eje central del trabajo fue el modelo propuesto por Metzger *et al.* (2017) (Figura 1) a partir de un enfoque participativo en los temas relacionados con (1) el agua, (2) la restauración y (3) la agroecología, el cual constituye una herramienta en torno a la solución colaborativa de los problemas de gobernabilidad del paisaje de Suesca y el mejoramiento de la resiliencia del paisaje frente al cambio climático, el agua y la seguridad alimentaria.

Contando con la participación de la comunidad para la recopilación de la información (recorridos de campo, entrevistas, visitas a predios y talleres), se determinaron las preguntas centrales del estudio: ¿Cuáles serían los escenarios de restauración ecológica que las comunidades locales perciben como importantes para estos paisajes andinos altamente transformados?, y para cada escenario específico: ¿Cuáles serían las estrategias de restauración ecológica y las especies más adecuadas para la gestión del territorio? Se espera que el trabajo ayude a determinar puntos en común en paisajes locales y regionales andinos interesados en la restauración ecológica participativa.

Materiales y métodos

Área de estudio

La zona de estudio comprendió las veredas de Santa Rosita, Tenería, Güita y Tausaquirá en el municipio de Suesca (Cundinamarca), las cuales hacen parte de la cuenca alta del río Bogotá (Figura 2), entre los 2.500 y 3.200 m s.n.m. Su precipitación media anual es de 850 mm y la temperatura media anual de 13 °C. Según las características geomorfológicas y climáticas, las cuatro veredas comprenden dos zonas: la zona seca, con alta filtración y compactación del suelo (Güita y Tausaquirá), y la zona húmeda, con buena retención hídrica (Santa Rosita y Tenería), separadas por el curso del río Bogotá y afectadas diferencialmente por vientos. La región ha sido escenario de intensos cambios a nivel ambiental y socioeconómico que se intensificaron en el siglo XIX por las dinámicas de transformación en el uso del suelo y el crecimiento demográfico (Tobón, 2013).

La economía es principalmente de subsistencia, con empresas de carácter familiar. Domina un uso agropecuario de media productividad, con sistemas de agricultura tradicional y semimecanizada, cultivos de papa en rotación y pastos no mejorados para pastoreo intensivo y semintensivo dedicado a la producción de leche (Alcaldía de Suesca, 2023). La floricultura constituye un importante renglón productivo, y tiene un fuerte impacto socioeconómico debido a las altas tasas de generación de empleo (Tobón, 2013); también lo es la expansión urbana.

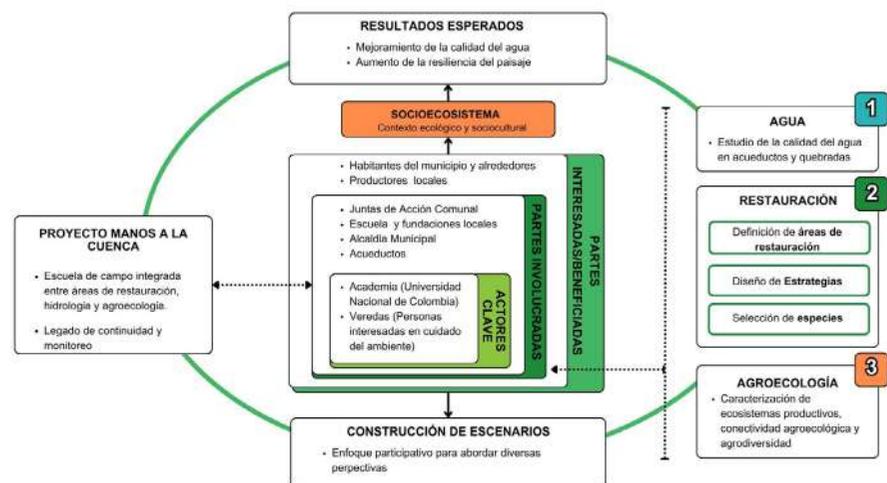


Figura 1. Marco de trabajo del proyecto-modelo de restauración enfocado en la construcción de escenarios participativos (adaptado de Metzger *et al.*, 2017).

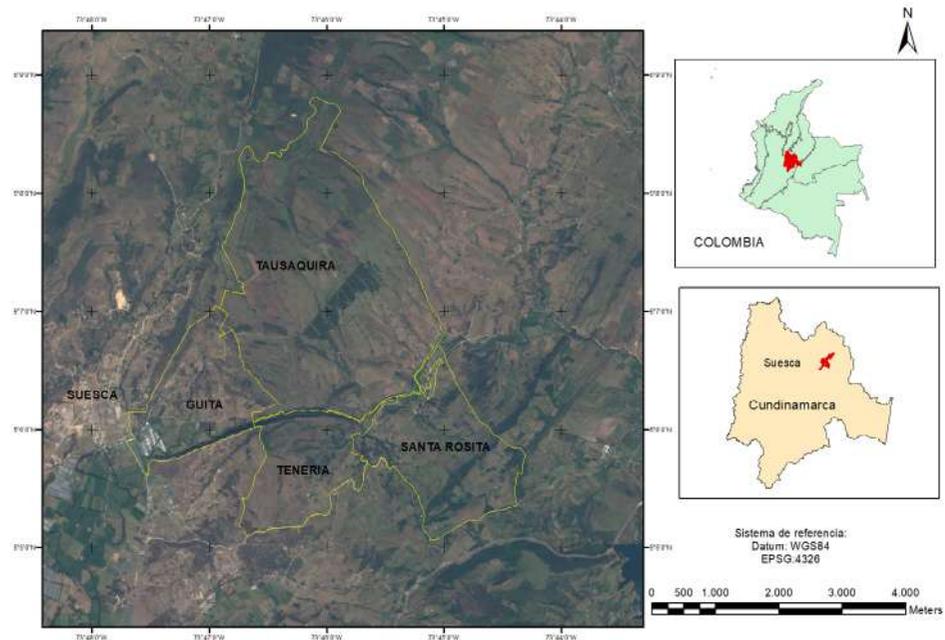


Figura 2. Localización del área de estudio

Fuente: imagen de satélite Landsat 8 (Colección USGS, <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2>. Tier 1 TOA Reflectance, 2020).

La presencia de relictos boscosos andinos es casi inexistente, aunque hay pequeños corredores de especies arbustivas y plantaciones forestales de bajo rendimiento. Se evidencian prácticas antiguas de extracción minera tradicional y el ecoturismo se ha convertido en motor de desarrollo (Tobón, 2013). Dados los niveles de transformación, existe una gran presión sobre el agua y el suelo asociada con la agricultura campesina y ganadera empresarial, la canalización del río Bogotá, los sistemas de riego, el uso de pesticidas y, por último, la floricultura y el cultivo de la papa (Tobón, 2013).

Metodología

La metodología del estudio se resume en la **figura 3**. Se hicieron recorridos de campo, entrevistas y talleres con la comunidad y se establecieron escenarios y estrategias de restauración ecológica de manera participativa.

Intereses y percepción de la comunidad frente a la restauración ecológica

Durante el primer semestre de 2023 se efectuaron visitas y entrevistas en 12 fincas (tres en cada vereda) con personas interesadas en adelantar procesos de restauración para determinar las problemáticas percibidas por la comunidad y los intereses expresados frente a posibles estrategias de manejo asociadas con la restauración ecológica. Entre octubre y noviembre de 2023 realizamos, además, 75 entrevistas presenciales semiestructuradas (18 a 20 por vereda) a grupos de actores previamente identificados en el proyecto MAC: propietarios y arrendatarios rurales de fincas productivas, comunidad escolar, juntas de acción comunal y asociaciones de usuarios del agua (acueductos veredales) y colectivos ciudadanos asociados a organizaciones no gubernamentales del municipio. Toda la información recopilada fue previamente autorizada por escrito mediante consentimiento informado.

Unidades de restauración y especies

Entre febrero y abril de 2023 se efectuaron recorridos en el área para identificar unidades de restauración ecológica basadas en los patrones actuales de cobertura y uso del suelo siguiendo la metodología propuesta por Vargas (2007). A cada unidad se le asociaron

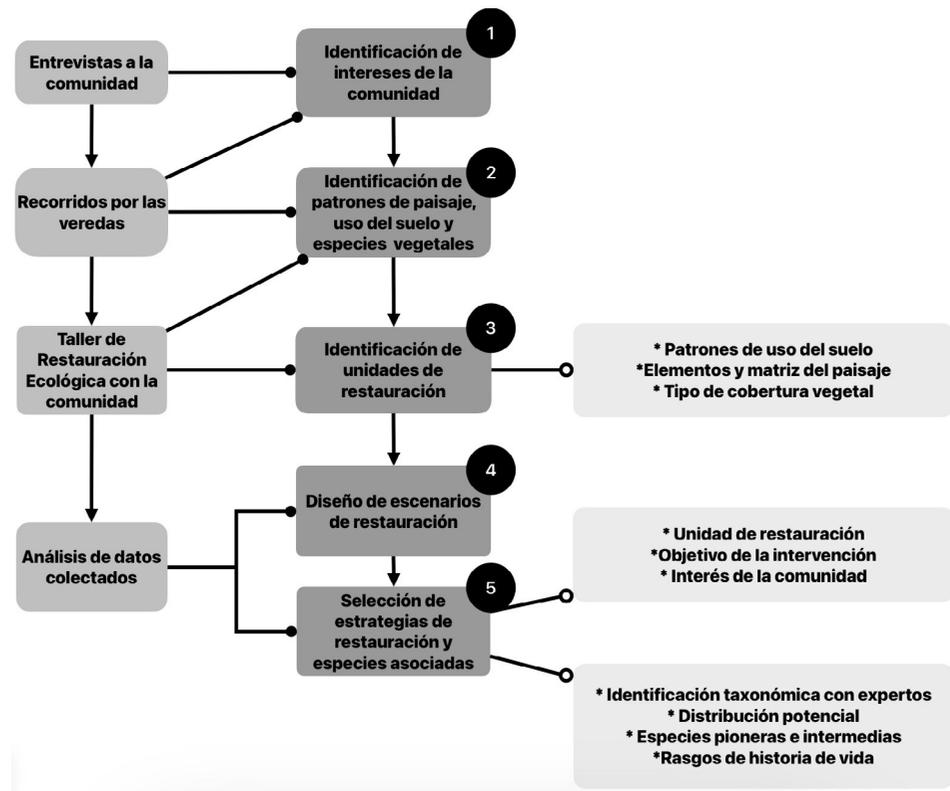


Figura 3. Resumen metodológico del estudio. Los conectores con flecha (↓) denotan procesos secuenciales; los conectores circulares negros (●) denotan productos o resultados de una actividad y los conectores circulares blancos (○) denotan criterios de selección o identificación.

las especies de flora encontradas, su historia de vida y su estado sucesional (temprana, intermedia y tardía). Las especies fueron identificadas en campo con apoyo de diferentes guías taxonómicas (Álvarez *et al.*, 2006; Rivera-Díaz *et al.*, 2012,) y algunas de ellas fueron fotografiadas para compararlas con las del repositorio digital del Herbario Nacional Colombiano (COL) y consultar a expertos en flora andina. El listado de especies se complementó con la revisión de literatura (Instituto Humboldt, 2017; Sierra, 2020) relativa a ecosistemas altoandinos y estudios realizados en Suesca.

Diseño de escenarios

Adoptamos la propuesta de escenarios participativos de Metzger *et al.* (2017) definidos como una herramienta que involucra a las comunidades locales en la planificación y desarrollo de futuros posibles, permitiéndoles influir directamente en las soluciones y estrategias más adecuadas de restauración y conservación de su entorno (Durrant *et al.*, 2023). En el taller participativo en el marco de “Escuela de campo”, se establecieron las alternativas futuras proyectadas al año 2030 (corto plazo) teniendo en cuenta el patrón actual del paisaje y la variedad de estrategias de restauración a implementar.

Selección de estrategias de restauración y especies

Las estrategias de restauración ecológica se basaron en la propuesta de Stanfur *et al.* (2014) y Armenteras & Vargas (2016), que incluyen las condiciones ecológicas, sociales y económicas locales y del entorno (Shimamoto *et al.*, 2018). Estas estrategias se asociaron a la restauración activa, que consiste en una sucesión dirigida o asistida mediante técnicas de restauración que aceleran la recuperación de la vegetación. Se incluyó una amplia gama de estrategias como la regeneración natural asistida, la ampliación de borde,

el enriquecimiento de parches y para ambientes muy perturbados, la nucleación, la cual implica la introducción de pequeños grupos de plantas pioneras (núcleos) que facilitan la sucesión ecológica (Díaz-Triana *et al.*, 2023). Además, se tuvo en cuenta el éxito de algunas estrategias aplicadas en otras experiencias (Aguilar & Ramírez, 2021; Vargas, 2021). Las especies vinculadas a cada estrategia se seleccionaron según los siguientes criterios: flora observada durante los recorridos veredales, dominancia y persistencia en el paisaje, especies capaces de colonizar exitosamente hábitats fragmentados y perturbados, preferencia de la comunidad y disponibilidad de material vegetal en viveros locales.

Taller de restauración ecológica

Como parte de la estrategia pedagógica “Escuela de campo” del MAC, se organizaron talleres que incentivaron el intercambio de conocimientos e impulsaron la participación de la comunidad en la construcción colectiva de soluciones para los desafíos ambientales y en los que pusimos a consideración de los participantes la información previamente obtenida. El taller final de restauración contó con la participación de 21 personas de la comunidad y 10 personas de la Universidad Nacional; después de explicar el objetivo y conformar cinco grupos de trabajo, se realizaron las siguientes actividades: i) reconocimiento del paisaje y de los patrones y tipologías de cobertura y uso; ii) medición de rasgos de las especies de flora presentes en el área “herbario rápido”; iii) determinación de las unidades de paisaje a restaurar y escenarios futuros; iv) propuesta de estrategias de acuerdo a cada escenario y unidad a restaurar, y v) discusión y retroalimentación del taller (S1, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2671/4481>).

Resultados

El 87,5 % de la comunidad valora la cantidad y la calidad del agua como recurso primordial para su bienestar (juntas de acueductos comunales, Alcaldía), así como el mantenimiento del suelo y la agrobiodiversidad (habitantes locales rurales). Solo un 28,8 % de los entrevistados consideró relevantes el mejoramiento de la biodiversidad asociada a las aves, los polinizadores y las especies de flora (habitantes locales neorrurales y ONG interesadas en el ambiente). Se expresó preocupación por la erosión del suelo y la contaminación del agua debidas a prácticas agrícolas intensivas, y un 85,7 % de los entrevistados consideró la participación comunitaria en iniciativas de restauración como un modelo efectivo de gestión del municipio en torno al agua y la seguridad alimentaria.

Los patrones actuales del paisaje permitieron establecer seis unidades de restauración: i) zonas de potreros y laderas erosionadas dominadas por pastos no manejados con procesos de compactación del suelo; ii) matrices heterogéneas de cultivos y pastos; iii) plantaciones forestales de acacia, eucalipto y ciprés; iv) corredor ripario asociado al río Bogotá; v) árboles aislados en una matriz de pastos y vi) parches de bosques (Figura 4).

En la vereda de Güita, donde la humedad es menor, las especies asociadas a parches de vegetación, arbustos aislados y matrices agropecuarias son: *Aloe arborescens*, *Austrocylindropuntia subulata*, *Baccharis latifolia* y *Escallonia paniculata*, de porte bajo y medio, y atrayentes para diversos polinizadores. Se destacan cercas vivas y pequeños núcleos de *Alnus acuminata*, *Acacia decurrens*, *Canna indica*, *Lafoensia acuminata* y *Pleroma urvilleana*, con un crecimiento relativamente vigoroso en condiciones más húmedas. En la vereda de Tausaquirá, con suelos más arenosos e incidencia de vientos fuertes, dominan potreros, laderas erosionadas y algunas plantaciones forestales (*Acacia decurrens*) entremezcladas con matorrales cerca del río Bogotá con especies como *B. latifolia*, *Dahlia imperialis*, *Duranta mutisii*, *Lycianthes lycioides* y *Myrsine guianensis* (cañón de las lechuzas).

En Santa Rosita y Tenería, con mayor retención hídrica y cobertura de vegetación, se observó la regeneración del cordoncillo (*Piper barbatum*); los parches de vegetación conformados por matorrales de poca extensión (< 1-2 ha) contienen especies como *Dodonaea viscosa*, *Baccharis nitida*, *B. latifolia*, *Cotoneaster panosus*, *D. mutisii*, *E. paniculata*, *Juglans neotropica*, *Monnina affinis*, *M. guianensis* y algunas especies invasoras. En los

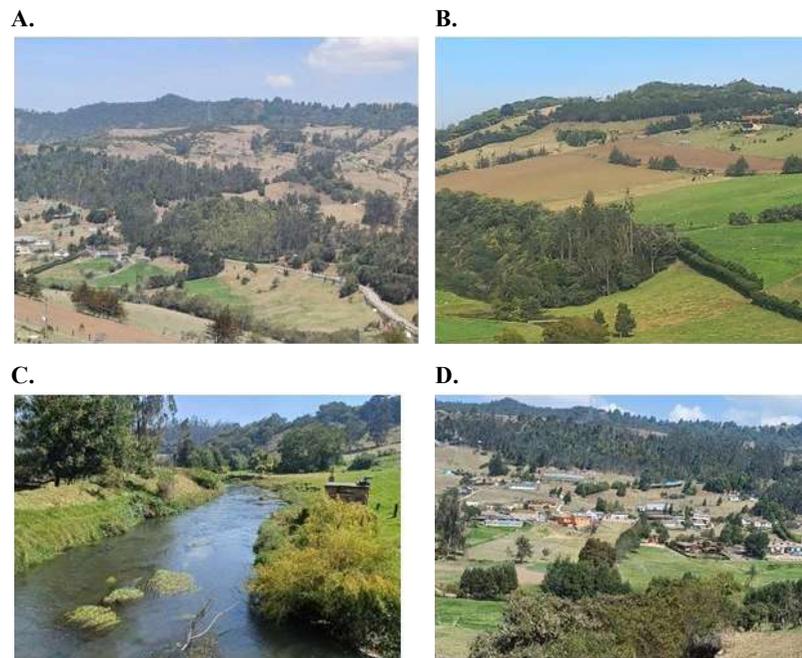


Figura 4. Vista general de los patrones asociados a la restauración ecológica en las veredas de Santa Rosa, Tenería, Tausaquirá y Güita (municipio de Suesca, Cundinamarca). **A.** Dominancia de potreros y laderas erosionadas con plantaciones forestales. **B.** Matrices heterogéneas de cultivos y pastos y, en primer plano, parches de arbustales. **C.** Corredor ripario asociado al río Bogotá. **D.** Árboles aislados y parches de bosques en medio de matrices antrópicas.

huertos familiares se encuentran frutales (curuba, pera, manzano). A una mayor altitud (2.700 m s.n.m.), se presenta una franja de bosque secundario (vereda de Los Alpes) con especies de bosque altoandino y alguna flora de subpáramo como *Cavendishia pubescens*, *Macleania rupestris*, *Oreopanax incisus*, *Vallea stipularis*, *Viburnum tinoides* y *Lepechinia salviifolia*, que puede servir como ecosistema de referencia para la zona de estudio.

Se propusieron dos escenarios bajo las denominaciones de “Conectividad ecológica” (CE) y “Hacia una transición agroecológica” (TA); no se determinaron escenarios a corto y mediano plazo asociados a la conservación. La **tabla 1** y la **figura 5** presentan la síntesis de estos resultados y el **S2**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2671/4481> el listado de las especies propuestas, ilustrando las características que las hacen ideales para cada unidad de restauración y escenario.

En el escenario de “Conectividad ecológica” se propone incrementar la conexión futura de elementos naturales a escala tanto de paisaje como de finca, recuperando y mejorando la biodiversidad, la agrobiodiversidad, el ecoturismo y el flujo de procesos ecológicos asociados al agua y los suelos. Este escenario se desarrollaría en los parches de vegetación, el corredor ripario y algunas zonas de matrices heterogéneas de cultivos, pastos y plantaciones forestales con árboles aislados y se proyecta para el corto y mediano plazo; los actores vinculados serían la Alcaldía, las JAC, la comunidad local, los propietarios de los predios, miembros de las instituciones educativas y las ONG ambientales. El eje del escenario “Hacia una transición agroecológica” es la promoción de la recomposición y recuperación de las funciones ecológicas asociadas a la agricultura y la ganadería (polinización, control natural de plagas, confort térmico) con miras a mejorar su resiliencia; este escenario se plantea a mediano y largo plazo y pretende asociar la restauración ecológica con prácticas agrícolas y ganaderas sostenibles sin necesidad de reducir tales actividades en zonas de potreros y laderas erosionadas, así como a matrices heterogéneas de cultivos y pastos con propietarios o arrendatarios de fincas.

Tabla 1. Escenarios participativos de restauración ecológica relacionados con las estrategias y especies propuestas. Información adaptada de Vargas (2011, 2021), Ceccon (2013) y Diaz et al. (2023)

Escenario	Estrategia	Especies claves	Características	
Conectividad ecológica	Ampliación de borde de bosques y conectividad entre parches	<i>Lepechinia salviifolia</i>	Aumenta el área de los parches de vegetación y mantiene conexiones entre hábitats de vida silvestre	
		<i>Baccharis latifolia</i>		
		<i>Baccharis nitida</i>		
	Nucleación	Simple en pastizal abierto y laderas erosionadas	<i>Baccharis latifolia</i>	Árboles o arbustos aislados dentro del paisaje para servir de percha de aves y murciélagos o cumplir con una función de facilitación para el paso de especies y la dispersión de semillas. A largo plazo, aumento de la conectividad ecológica tanto para fauna como flora
			<i>Baccharis nitida</i>	
			<i>Lupinus bogotensis</i>	
		Con nodriza	<i>Alnus acuminata</i>	
			<i>Baccharis latifolia</i>	
			<i>Viburnum tinoides</i>	
	Corredores riparios	<i>Alnus acuminata</i>		
		<i>Citharexylum subflavescens</i>		
		<i>Montanoa quadrangularis</i>		
Cerca viva alrededor de predios		<i>Baccharis latifolia</i>	Mejora la conectividad entre parches boscosos o de arbustales e incrementa la permeabilidad de la matriz, facilitando los flujos de intercambio entre parches de hábitat natural	
		<i>Baccharis nitida</i>		
		<i>Dodonaea viscosa</i>		
		<i>Duranta mutisii</i>		
Enriquecimiento en plantaciones forestales con especies nativas (incluye aprovechamiento de especies maderables)		<i>Clusia multiflora</i>	Estrategia que aprovecha el microclima de la plantación para la reintroducción de especies nativas que disminuyan los procesos de erosión que en ocasiones causan estas especies	
		<i>Oreopanax incisus</i>		
		<i>Vallea stipularis</i>		
		<i>Monnina aestuans</i>		
Nucleación intensiva: bosques frutales		<i>Acca sewollana</i>	Provee un suministro de especies para usos domésticos y alimentación, mejorando la agrobiodiversidad de las fincas	
		<i>Pyrus communis</i>		
		<i>Psidium guajava</i>		
		<i>Erythrina rubrinervia</i>		
		<i>Duranta mutisii</i>		
Nucleación	Pastos con ganado y laderas erosionadas	<i>Cavendishia bracteata</i>	Consiste en tener árboles o arbustos que sirven para forraje y sombra del ganado y favorecen la acción de organismos descomponedores para la recuperación de suelos	
		<i>Baccharis nitida</i>		
		<i>Lepechinia salviifolia</i>		
	Corredores riparios	<i>Cavendishia bracteata</i>	Busca formar microhábitats (núcleos) que aumenten las interacciones entre organismos, cultivos y el suelo y la aparición de interacciones biológicas (polinizadores y control biológico)	
		<i>Smallantus pyramidalis</i>		
		<i>Sambucus peruviana</i>		
Hacia una transición agroecológica	Cerca viva	Área ganadera	<i>Duranta mutisii</i>	Mejora la permeabilidad de la matriz ganadera y facilita los flujos de intercambio entre el sistema agrícola y la avifauna asociada a especies nativas de árboles o arbustos
			<i>Monnina aestuans</i>	
			<i>Lepechinia salviifolia</i>	
	Huertas caseras y zonas de cultivo	<i>Baccharis nitida</i>		
		<i>Lupinus bogotensis</i>		
		<i>Xylosma spiculifera</i>		
	Reservorios	<i>Alnus acuminata</i>		
		<i>Sambucus peruviana</i>		
		<i>Monnina aestuans</i>		

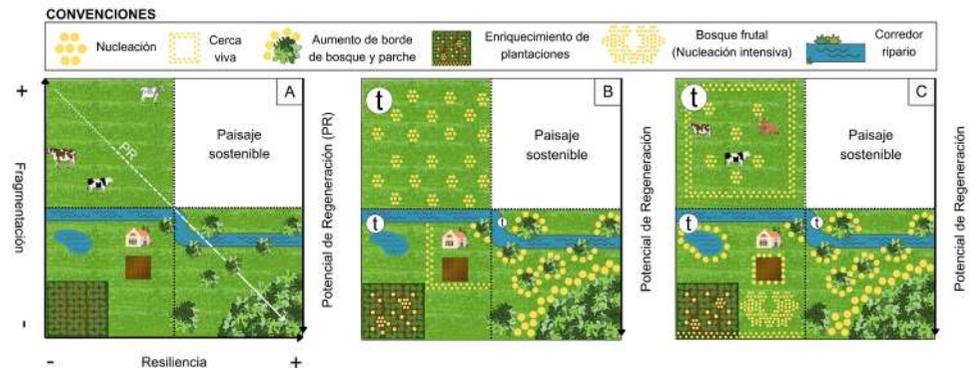


Figura 5. Escenarios propuestos a partir de las características de resiliencia y la fragmentación. **A.** Presente. **B.** Escenario de conectividad ecológica y **C.** Escenario de transición agroecológica. El tiempo para alcanzar cada escenario está representado por la letra "t", cuyo tamaño indica si el proceso se proyecta a corto plazo (tamaño pequeño), mediano (tamaño mediano) o largo (tamaño grande). El potencial de regeneración (PR) se representa con la línea punteada blanca. El paisaje sostenible lo constituyen sistemas escasamente representados que incorporan la multifuncionalidad del paisaje en términos de producción agropecuaria y mantenimiento de funciones ecológicas, maximizando beneficios para la población y el ambiente. Fuente: Elaboración propia

La **figura 5A** presenta el escenario actual con las unidades de restauración que se identificaron, las cuales corresponden a actividades ganaderas con alto grado de perturbación, mayor fragmentación y menor resiliencia (esquina superior izquierda). Las zonas de menor fragmentación y resiliencia (esquina inferior izquierda) corresponden a laderas y plantaciones forestales, con un grado de perturbación intermedio que puede afectarse con la agricultura semimecanizada. La unidad de restauración más optimista (esquina inferior derecha) se encuentra asociada con parches de bosque con un grado de perturbación menor donde el potencial de regeneración aumenta en tanto la resiliencia es mayor y la fragmentación menor.

En la **figura 5B** se señalan las estrategias encaminadas a aumentar la conectividad ecológica: en el caso de mayor perturbación, dominado por pastizales (esquina superior izquierda), la nucleación puede facilitar el paso de especies de fauna y aumentar la dispersión de semillas, asegurando la conectividad ecológica a largo plazo; en las laderas y las unidades de plantaciones y agricultura local (esquina inferior izquierda), las cercas vivas alrededor de los predios pueden aumentar la diversidad, mejorar la conectividad y prevenir la pérdida de integridad del suelo, en tanto que la nucleación con nodrizas o niñeras en la unidad de árboles aislados favorece el establecimiento de las especies nativas a introducir y, junto con la nucleación simple y el enriquecimiento de especies nativas en plantaciones, ayuda a recuperar la flora nativa o frutal y la diversidad funcional con miras a la soberanía alimenticia. Por último, en la unidad de parches de vegetación se propusieron las estrategias de ampliación de borde de los parches boscosos para aumentar el área del parche de vegetación.

Las estrategias para incentivar la transición agroecológica (**Figura 5C**) en las unidades de mayor perturbación (pastizales, esquina superior izquierda) son las cercas vivas y la nucleación simple con especies de forraje y sombra para el ganado; en las laderas y las unidades de plantaciones y agricultura local (esquina inferior izquierda), se propusieron estrategias de cercas vivas alrededor de los linderos del predio, cultivos y reservorios de agua, nucleación con nodrizas en unidades de árboles aislados, nucleación simple, aprovechamiento maderable con enriquecimiento de especies nativas y frutales en plantaciones y nucleación intensiva para la creación de bosques frutales. Finalmente, en la unidad de parches de vegetación (esquina inferior derecha), se aplicarían estrategias similares a las de la **figura 5B**. El paisaje donde la resiliencia y la fragmentación son altas

(esquina superior derecha en **figura 5 A, B y C**) es poco representativo en la actualidad y correspondería a predios agrícolas que han adelantado procesos agroecológicos bajo principios de sostenibilidad, con mejoras en la estructura y conectividad ecológicas.

Discusión

Los patrones encontrados en el municipio de Suesca, donde los hábitats originales se han perdido casi en un 90 %, indican que tanto la conectividad como la resiliencia del paisaje son críticas. La permanencia de una cobertura de pastizales y zonas agrícolas homogéneas estables en los últimos 20 años, según información de la comunidad, indica que la zona no muestra una tendencia hacia la recuperación de bosques o matorrales como lo reportaron **Rubiano *et al.* (2017)** y **Calbi *et al.* (2020)** en el altiplano de Bogotá en zonas de cultivo abandonadas. Por otra parte, los escenarios propuestos de manera participativa están en línea con lo encontrado en la zona andina colombiana, donde la cuenca es prioritaria para el mejoramiento de la calidad del agua y la conservación de suelos (**Hagger *et al.*, 2017**; **Barrera-Causil & González-Montañez, 2023**). A diferencia de otros estudios que evidencian sinergias entre biodiversidad, recursos hídricos y suelos (**Hagger *et al.*, 2017**), en el nuestro no se percibió la mejora de la biodiversidad como la principal motivación para la restauración ecológica, posiblemente porque los bosques son el componente más fragmentado y aislado del paisaje, lo que coincide con los patrones de algunos municipios cercanos a Suesca (**Rubiano *et al.*, 2017**).

La degradación del paisaje conlleva una baja resiliencia por la presencia de barreras a la restauración que impiden, limitan o desvían la sucesión natural (**Vargas, 2011**). Es el caso de escenarios con alta fragmentación y baja resiliencia, donde la intensidad del uso del suelo, los incendios recurrentes y los efectos de borde y aislamiento de parches de vegetación son acentuados. Esto incide en la ausencia de procesos sucesionales, al limitarse los mecanismos de regeneración y colonización de especies (dispersión de propágulos, establecimiento de plántulas y persistencia de individuos y poblaciones de plantas) (**Leal *et al.*, 2014**; **Arroyo-Rodríguez *et al.*, 2017**; **Aguilar *et al.*, 2024**), y alterarse las dinámicas ecohidrológicas, la disponibilidad de agua y la recarga de acuíferos (**García-Leoz *et al.*, 2018**). A ello se suma que las barreras sociales, económicas y políticas limitan la resiliencia y afectan la seguridad alimentaria e hídrica de la región ante cambios globales (**Córdoba *et al.*, 2029**).

Los escenarios propuestos pueden considerarse una estrategia para mejorar la composición del paisaje y la calidad de la matriz integrando corredores riparios, parches de bosque, y cercas vivas en predios productivos, entre otros. Algunos autores indicaron que en paisajes altamente transformados la matriz es una prioridad para su sostenibilidad a largo plazo, y las estrategias establecidas en este trabajo van en consonancia con propuestas de diseño de escenarios de paisaje amigables con la biodiversidad (**Arroyo-Rodríguez *et al.*, 2017, 2020**). Al mejorar el tamaño y disminuir el aislamiento de los fragmentos, el escenario de conectividad ecológica garantiza, a mediano plazo, el movimiento de especies y flujos de materia y energía en el paisaje, como lo han evidenciado **Calbi *et al.* (2020)** en el altiplano. A nivel de los predios, este escenario puede ser valioso para proveer servicios imprescindibles para la agricultura y soportar la transición agroecológica incidiendo en la abundancia y riqueza de especies relacionadas con los procesos de dispersión o competencia (**Acevedo-Osorio *et al.*, 2024**).

También se ha demostrado que la estructura del paisaje alrededor de los huertos incide en la polinización y el control de plagas (**Miñarro *et al.*, 2023**) y en los servicios relacionados con el suelo (**Acevedo-Osorio *et al.*, 2024**). A nivel de finca, el establecimiento de cercas vivas o nucleación con nodrizas disminuye la distancia a los parches de bosques y mejora las interacciones entre cultivo y especie (**Grass *et al.*, 2019**). **Acevedo-Osorio *et al.* (2024)** señalan que la agroecología como enfoque busca conservar las funciones ecológicas y permite los procesos de transición agroecológica; en este caso, apunta a rediseñar los sistemas productivos (parcela, finca y paisaje) a través de la configuración del paisaje (**Marasas *et al.*, 2014**), y es acá donde la restauración juega un papel importante en ausencia de fuentes de diversidad.

En cuanto al potencial de regeneración de las especies (conjunto de especies nativas y sus trayectorias sucesionales en un paisaje; Vargas, 2011), las especies más importantes en el escenario actual son las especies pioneras, primeras en colonizar áreas perturbadas, debido a su rápida tasa de crecimiento y su capacidad de dispersión, siendo las únicas que impulsan trayectorias sucesionales en áreas muy alteradas (Sierra *et al.*, 2020; Ruiz-Marín *et al.*, 2021; Vargas, 2021). Por otra parte, la selección de especies para cada estrategia estuvo ligada a un gradiente adquisitivo-conservador en el uso de recursos en las plantas, en el cual las especies adquisitivas crecen rápido y utilizan recursos rápidamente, en tanto que las conservadoras crecen lentamente y almacenan recursos (Díaz *et al.*, 2004).

En áreas degradadas con condiciones de sequía como Suesca, las especies pioneras arbustivas (estrategia adquisitiva) toleran potenciales hídricos negativos, lo que las hace tolerantes a la sequía (*B. nitida*, *Dodonea viscosa*, *L. salviifolia*, *Miconia squamulosa*, *Ageratina tinifolia*, *D. mutisii*, entre otras; S2, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2671/4481>). Además, tienen tejidos de vida corta y tienden a aumentar las tasas de descomposición y la abundancia de macrofauna, ayudando a la recuperación del suelo (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2000) y desarrollando sistemas de raíces más profundos y almacenamiento de agua en el tallo. Estas especies preparan el suelo y el microambiente para el establecimiento de las especies intermedias y tardías (estrategia conservativa), muy escasas en el área de estudio y cuya estrategia se basa en la explotación lenta de los recursos para generar tejidos de gran capacidad de almacenamiento como lo son maderas densas, hojas gruesas, mayor tamaño y longevidad (*Weinmannia tomentosa*, *Clusia multiflora*, *Clethra fagifolia*, entre otras). Como lo indica Vargas (2021), las especies intermedias y tardías se introducirían en el mediano y largo plazo, cuando esté consolidado el proyecto de restauración y las especies pioneras estén establecidas y de suficiente tamaño para proveer un ambiente propicio a nuevas plantas dentro de las diferentes estrategias de restauración.

Llama la atención que la comunidad no percibe la recuperación de áreas como prioritaria, posiblemente debido a la ausencia de ecosistemas de referencia en buen estado y la presencia de una sucesión muy lenta y detenida con bajo potencial de brindar servicios ecosistémicos. Solo se observa una tendencia hacia la recuperación de la biodiversidad y la cobertura vegetal en zonas dedicadas a la restauración y asociadas al turismo de la naturaleza como parte de iniciativas privadas, lo que coincide con lo encontrado por Calbi *et al.* (2020), quienes señalan que la creación de áreas protegidas en la región puede impulsar la recuperación de parches de bosque. Aunque la sostenibilidad de las estrategias propuestas depende del compromiso comunitario a largo plazo y los cambios en las prioridades o recursos pueden afectar la continuidad de las acciones de restauración, los esfuerzos por mantener una gobernanza del paisaje en Suesca empiezan a dar sus frutos como lo demuestran diferentes acciones de las comunidades en torno a la restauración y la transición hacia la agroecología.

Conclusiones

Ante los patrones actuales de paisajes altamente transformados, la opción futura consiste en aumentar la resiliencia y los servicios ecosistémicos a través de la restauración ecológica y la agroecología orientadas al restablecimiento y mantenimiento de la diversidad biológica. La restauración ecológica permite recuperar diversas funciones ecológicas como la regulación hídrica y la protección del suelo que son de gran interés en nuestro estudio. La agroecología permite maximizar los beneficios a nivel local (finca) y regional (paisaje) creando sistemas con mayor diversidad y heterogeneidad y, por ende, más resilientes.

La concordancia de los diferentes actores en los escenarios propuestos valida el proceso en busca de mejores opciones para la zona. Sin embargo, es necesario captar la participación representativa y sistemática de otras partes interesadas, entre ellas, las autoridades ambientales y los sectores productivos para respaldar la validez y

efectividad de los escenarios participativos propuestos y monitorear su incorporación en la planificación del paisaje. Recomendamos vincular los rasgos funcionales de las diferentes especies de plantas relacionadas con la estrategia adquisitiva para optimizar las estrategias de restauración, así como su resistencia frente a la sequía y eventos extremos como el fuego.

Dado que las iniciativas locales y regionales son fundamentales en los procesos participativos, las redes de colaboración, como La Red Colombiana de Restauración Ecológica (REDCRE), y los marcos regulatorios y las políticas públicas, pueden facilitar la cooperación entre diversos actores y garantizar el éxito de la restauración (Aguilar *et al.*, 2015; Aguilar & Ramírez, 2021), incorporando y fomentando los escenarios participativos. Replicar esta metodología en otros paisajes altamente transformados y deteriorados no solo en la región andina, sino en zonas de posconflicto, convierte la restauración ecológica en una estrategia crucial para la recuperación del capital natural y social, tal como lo plantea Aguilar *et al.* (2015), fomentando el interés de la comunidad en la gestión de su territorio y asumiendo un rol activo en la selección del escenario futuro que mejor se adapte a sus necesidades y contextos socioecológicos.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2671/4481>

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá, por la financiación del Proyecto “Manos a la cuenca, Laboratorio social para la gestión integrada del agua y el territorio en Suesca - Fase 2” (Convocatoria Nacional de Extensión Solidaria 2022). A los profesores Martha Cristina Bustos y Álvaro Acevedo por compartir sus conocimientos para lograr un trabajo en equipo efectivo y ameno. Nuestro reconocimiento especial a Leyla Johanna Cárdenas y Carolina Tobón, siempre en busca de mejorar el entorno y el bienestar de la comunidad. Al experto botánico Orlando Rivera, asociado al Herbario Nacional, por el gran apoyo en la identificación de flora. A todas las personas y organizaciones de las veredas Santa Rosita, Tenería, Güita y Tausaquirá, por brindarnos la oportunidad de compartir sus espacios, percepciones y expectativas y participar de manera entusiasta en todo el proceso. A Greunal, quien ha sido inspiración para trabajar en la restauración participativa y a los estudiantes del curso en Biodiversidad y servicios ecosistémicos II-2023. El Proyecto obtuvo la aprobación del Comité de ética de la Universidad Nacional de Colombia y la autorización previa de los participantes para el tratamiento de los datos mediante consentimiento informado.

Contribución de los autores

ER, OV y NR: conceptualización, diseño del estudio y participación en la discusión de los resultados, redacción y revisión final del manuscrito. ER y AP: caracterización de fincas y entrevistas a los diferentes actores. AP: muestreo y determinación de las especies de flora. ER, SAH, LMP y AP: diseño y realización del taller de restauración ecológica. Los autores revisaron, corrigieron y aceptaron la versión final del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan no tener conflicto de intereses asociados con el presente artículo.

Referencias

Abhilash, P. C. (2021). Restoring the unrestored: Strategies for restoring global land during the un decade on ecosystem restoration (un-der). *Land*, 10(2), 1-17. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/land10020201>

- Acevedo-Osorio, Á., Cárdenas, J.S., Martín-Pérez, A.M.** (2024). Agroecological planning of productive systems with functional connectivity to the ecological landscape matrix: two Colombian case studies. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1257540. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1257540>
- Aguilar, M., Sierra, J., Ramírez, W., Vargas, O., Calle, Z., Vargas, W., Calle, Z., Vargas, W., Murcia, C., Aronson, J., Barrera-Cataño, J. I.** (2015). Toward a post-conflict Colombia: restoring to the future. *Restoration Ecology*, 23(1), 4-6. <https://doi.org/10.1111/rec.12172>
- Aguilar-Garavito M., Ramírez W.** (Eds.) (2021). *Evaluación y seguimiento de la restauración ecológica en el páramo andino. 1 edición.* Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Aguilar, M., Sesquillé, E., Cortina-Segarra, J., Leguizamo, Á., Ruiz-Santacruz, J. S.** (2024). Producción y germinación de bellotas del roble andino *Quercus humboldtii* (Fagaceae) afectado por incendios recurrentes. *Revista de Biología Tropical*, 72, e53407.
- Alcaldía de Suesca.** (2023). *Esquema de Ordenamiento Territorial EOT.* Municipio de Suesca.
- Álvaro, W., Díaz, M., Zabala J.** (2006). *Florula de la reserva protectora El Malmo, Tunja, Boyacá.* Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Armenteras, D. & Vargas, O.** (2016). Patrones del paisaje y escenarios de restauración: acercando escalas. *Acta Biológica Colombiana*, 21(1), 229-239.
- Arroyo-Rodríguez, V., Melo, F.P.L., Martínez-Ramos, M., Bongers, F., Chazdon, R.L., Meave, J.A., Norden, N., Santos, B.A., Leal, I.R., Tabarelli, M.** (2017). Multiple successional pathways in human-modified tropical landscapes: new insights from forest succession, forest fragmentation and landscape ecology research. *Biological Reviews* 92, 326-340. <https://doi.org/10.1111/brv.12231>
- Arroyo-Rodríguez, V., Fahrig, L., Tabarelli, M., Watling, J.I., Tischendorf, L., Benchimol, M., Cazetta, E., Faria, D., Leal, I.R., Melo, F.P.L., Morante-Filho, J. C., Santos, B.A., Arasa-Gisbert, R., Arce-Peña, N., Martín J. Cervantes-López, M.J., Cudney-Valenzuela, S., Galán-Acedo, C., San-José, M., Vieira, I.C., Slik, J.W., Nowakowski, A.J., Tschardt, T.** (2020). Designing optimal human-modified landscapes for forest biodiversity conservation. *Ecology letters* 23, 1404–1420. <https://doi.org/10.1111/ele.13535>
- Barrera-Causil, C. & González-Montañez, J.** (2023). Harmonization Approach to Spatial and Social Techniques to Define Landscape Restoration Areas in a Colombian Andes Complex Landscape. *Forests*, 14, 1913. <https://doi.org/10.3390/f14091913>
- Benayas, J.M., Newton, A.C., Diaz, A., Bullock, J.M.** (2009). Meta-Analysis Services by Ecological Restoration: An Enhancement. *Science* 325, 1121. <https://doi.org/10.1126/science.1172460>
- Biggs, R., Schlüter, M., Schoon, I.** (2015). *Principles for Building Resilience. Sustaining Ecosystem Services in Social-Ecological Systems.* Cambridge University Press.
- Calbi, M., Clerici, N., Borsch, T., Brokamp, G.** (2020). Reconstructing Long Term High Andean Forest Dynamics Using Historical Aerial Imagery: A Case Study in Colombia. *Forests*. 11(8), 788. <https://doi.org/10.3390/f11080788>
- Ceccon, E.** (2013). *Restauración En Bosques Tropicales: Fundamentos Ecológicos, Prácticos y Sociales.* Díaz dos Santos.
- Ceccon, E., Méndez-Toribio, M., Martínez-Garza, C.** (2020). *Social Participation in Forest Restoration Projects : Insights from a National Assessment in Mexico.* Human Ecology.
- Córdoba-Vargas, C. A., Hortúa-Romero, S., León-Sicard, T.** (2019). Resilience to climate variability: the role of perceptions and traditional knowledge in the Colombian Andes. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 44(4), 419-445. <https://doi.org/10.1080/021683565.2019.1649782>
- Chazdon, R. L., Wilson, S. J., Brondizio, E., Guariguata, M. R., Herbohn, J.** (2021). Key challenges for governing forest and landscape restoration across different contexts. *Land Use Policy*, 104, 104854. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104854>
- Chazdon, R. & Guariguata, M.** (2018). *Herramientas de apoyo a decisiones para la restauración del paisaje forestal: Estado actual y futuro.* CIFOR. <https://doi.org/10.17528/cifor/007002>
- Díaz, S., Hodgson, J. G., Thompson, K., Cabido, M., Cornelissen, J. H. C., Jalili, A., Montserrat-Martí, G., Grime, J. P., Zarrinkamar, F., Asri, Y., Band, S. R., Basconcelo, S., Castro-Díez, P., Funes, G., Hamzehee, B., Khoshnevi, M., Pérez-Harguindeguy, N., Pérez-Rontomé, M. C., Shirvany, F. A., Zak, M. R.** (2004). The plant traits that drive ecosystems: Evidence from three continents. *Journal of Vegetation Science*, 15(3), 295-304. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2004.tb02266.x>

- Díaz-Triana, J. E., Vargas-Ríos, O., Rodríguez-Eraso, N.** (2023). La nucleación: Una alternativa para la restauración ecológica de bosques neotropicales. *Ecología Austral*, 33(3), 867-886. <https://doi.org/10.25260/EA.23.33.3.0.2134>
- Durrant, E., Howson, P., Puttick, B., Potts, S., Shennan-Farpón, Y., Sari, N., Allen, N., Jo, Y., Grainger, M., Arn Teh, Y., Pfeifer, M.** (2023). Existing evidence on the use of participatory scenarios in ecological restoration: a systematic map. *Environmental Evidence*, 12, 27. <https://doi.org/10.1186/s13750-023-00314-1>
- Etter, A. & Villa, L.A.** (2020). Andean forests and farming systems in part of the Eastern Cordillera (Colombia). *Mountain Research and Development*, 20(3), 236-246. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2000\)020\[0236:AFAFSI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2000)020[0236:AFAFSI]2.0.CO;2)
- Fox, H. & Cundill, G.** (2018). Towards Increased Community-Engaged Ecological Restoration: A Review of Current Practice and Future Directions. *Ecological Restoration*, 36(3), 208-218. <https://doi.org/10.3368/er.36.3.208>
- García-Leoz, V., Villegas, J.C., Suescún, D., Flórez, C.P., Merino-Martín, L., Betancur, T., León, J.D.** (2018). Land cover effects on water balance partitioning in the Colombian Andes: improved water availability in early stages of natural vegetation recovery. *Regional Environmental Change*, 18, 1117-1129. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1249-7>
- Grass, L., Loos, J., Baensch, S., Batáry, P., Librán-Embid, F., Ficiciyan, A., Klaus, F., Riechers, M., Rosa, J., Tiede, J., Udy, K., Westphal, C.** (2019). Land-sharing/-sparing connectivity landscapes for ecosystem services and biodiversity conservation. *People and Nature*, 1, 262-272. <https://doi.org/10.1002/pan3.21>
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt** (2017). *Composición florística de tres fragmentos de bosque altoandino en los alrededores de la Sabana de Bogotá*. 4510 registros, aportados por: Norden, N. (Contacto del recurso), Muñoz, J.C. (Creador del recurso, Autor), Hurtado, A.B. (Autor), Hernández, M. (Autor). Versión 1.0. http://i2d.humboldt.org.co/ceiba/resource.do?r=rrbb_bogota_plantae_2017
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services-IPBES** (2018). *Resumen para los responsables de la formulación de políticas del informe sobre la evaluación temática de la degradación y la restauración de la tierra de la Plataforma Intergubernamental Científico-normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas*. R. Scholes, L. Montanarella, A. Brainich, N. Barger, B. ten Brink, M. Cantele, B. Erasmus, J. Fisher, T. Gardner, T. G. Holland, F. Kohler, J. S. Kotiaho, G. Von Maltitz, G. Nangendo, R. Pandit, J. Parrotta, M. D. Potts, S. Prince, M. Sankaran y L. Willems (eds.). Secretaría de la IPBES.
- Leal-Pacheco, F.A., Sanches, L.F., Farias, R., Valera, C.A., Tarlé, T.C.** (2018). Land degradation: Multiple environmental consequences and routes to neutrality. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.07.002>
- Mansourian, S.** (2021). Disciplines, sectors, motivations and power relations in forest landscape. *Ecological Restoration*, 39(1&2), 16-26. <https://www.muse.jhu.edu/article/793656>
- Marasas, M., Blandi, M. L., Dubrovsky, D., Fernández, V.** (2014). Transición Agroecológica: de sistemas convencionales de producción a sistemas de producción de base ecológica. Características, criterios y estrategias. En *Agroecología: bases científicas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables*. S. Sarandón and C. Flores (Eds.) Universidad de La Plata.
- Metzger, J. P., Esler, K., Krug, C., Arias, M., Tambosi, L., Crouzeilles, R., André, L.A., Brancalion, P., D'Albertas, F., Teixeira, G., Couto, L., Grytnes, J. A., Hagen, D., Fleuri, A. V., Kamiyama, C., Latawiec, A.E., Ribeiro, R., Ruggiero, P., Sparovek, G., Strassburg, B., Saraiva, A.M., Joly, C.** (2017). Best practice for the use of scenarios for restoration planning. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 29, 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.10.004>
- Miñarro, M., García, D., Rosa-García, R.** (2023). Pollination of exotic fruit crops depends more on extant pollinators and landscape structure than on local management of domestic bees. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 347, 108387. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108387>
- Oteros-Rozas, E., Martín-López, B., Daw, T. M., Bohensky, E. L., Butler, J. R. A., Hill, R., Martín-Ortega, J., Quinlan, A., Ravera, F., Ruiz-Mallén, I., Thyresson, M., Mistry, J., Palomo, I., Peterson, G. D., Plieninger, T., Waylen, K. A., Beach, D. M., Bohnet, I. C., Hamann, M., ... Vilardey, S. P.** (2015). Participatory scenario planning in place-based social-ecological research: Insights and experiences from 23 case studies. *Ecology and Society*, 20(4), Art. 32. <https://doi.org/10.5751/ES-07985-200432>

- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Cornelissen, J. H., Vendramini, F., Cabido, M., Castellanos, A.** (2000). Chemistry and toughness predict leaf litter decomposition rates over a wide spectrum of functional types and taxa in Central Argentina. *Plant and Soil*, 218(1-2), 21-30.
- Quintero-Urbe, L., Navarro, L.M., Pereira, H.M., Fernández, N.** (2022). Participatory scenarios for restoring European landscapes show a plurality of nature values. *Ecography* 4, e06292. <https://doi.org/10.1111/ecog.06292>
- Rivera-Díaz, O. Parra-O, C., A. V. Rojas-Rojas.** (2012). *Guía de Campo de las plantas con flores de la Granja Ecológica el Porvenir, región del Tequendama (Cundinamarca, Colombia)*. Serie de guías de campo del Instituto de Ciencias Naturales No 10. Universidad Nacional de Colombia.
- Rodríguez-Echeverry, J. & Leiton, M.** (2021). State of the landscape and dynamics of loss and fragmentation of forest critically endangered in the tropical Andes hotspot: implications for conservation planning. *Journal of Landscape Ecology*, 14(1), 73. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2021-0005>
- Rodríguez-Eraso, N., Armenteras-Pascual, D., Alumbrosos, J.R.** (2013). Land use and land cover change in the Colombian Andes: Dynamics and future scenarios. *Journal of Land Use Science*, 8, 154-174.
- Rubiano, K., Clerici, N., Norden, N., Etter A.** (2017). Secondary Forest and Shrubland Dynamics in a Highly Transformed Landscape in the Northern Andes of Colombia (1985–2015). *Forests*, 8(6), 216. <https://doi.org/10.3390/f8060216>
- Ruiz-Marín, E., Benavides-Tocarruncho J. P., Mongui-Vallejo, M. F.** (Eds.). (2021) *Cápsulas de Restauración Ecológica: El cerro San Marcos de Villa de Leyva*. Universidad Nacional de Colombia.
- Schweizer, D., van Kuijk, M., Ghazoul, J.** (2021). Perceptions from non-governmental actors on forest and landscape restoration, challenges and strategies for successful implementation across Asia, Africa and Latin America. *Journal of Environmental Management*, 286(15), 112251. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112251>
- Shimamoto, C. Y., Padial, A. A., da Rosa, C. M., Marques, M. C. M.** (2018). Restoration of ecosystem services in tropical forests: A global meta-analysis. *PLOS ONE*, 13(12), e0208523. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208523>
- Sierra, J. A., Marín, D., Salazar, D., Garcés, M., Quijano-Abril, M.** (2020). Especies Pioneras, Persistentes y Ensayos De Germinación En Bosques Montanos De La Cordillera Central, Colombia. *Ciencia en Desarrollo*, 11. <https://doi.org/10.19053/01217488.v11.n2.2020.10645>
- Stanturf, J.A., Palik, B.J., Dumroese, R.K.** (2014). Contemporary forest restoration: A review emphasizing function. *Forest Ecology and Management*, 331, 292-323. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.029>
- Tambosi, L. R., Metzger, J. P.** (2013). A framework for setting local restoration priorities based on landscape context. *Natureza a Conservação*, 11, 152-157. <https://doi.org/10.4322/natcon.2013.024>
- Tobón, C.** (2013). *Metabolismo social para el manejo sostenible de los recursos naturales. El agua en la Cuenca Alta del Río Bogotá*. Tesis de Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia.
- Vargas, O.** (2011). Restauración ecológica: Biodiversidad y conservación. *Acta Biológica Colombiana*, 16(2), 221-246.
- Vargas-Ríos O.** (Ed.). (2021). Bases ecológicas y sociales para la restauración de los páramos. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.
- Viñals, S., Maneja, R., Martí, R., Martí, M., Puy, N.** (2023). Reviewing social-ecological resilience for agroforestry systems under climate change conditions. *Science of the Total Environment*, 869, 161763. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161763>
- Wang, S.W., Lee, W.K., Kim, J.G.** (2018). Understanding the relationships in nature-human systems to improve social-ecological resilience in the Hindu-Kush Himalayas. *Asian Journal of Conservation Biology*, 7(1), 17-27.

Artículo original

Análisis multitemporal de la frecuencia de observación de *Phimosus infuscatus* (Threskiornithidae) en Colombia

Multi-temporal analysis in observation frequency of *Phimosus infuscatus* (Threskiornithidae) in Colombia

Valentina Ramos-Mosquera^{1,*}, Edwin O. López-Delgado²

¹Programa de Biología Ambiental, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Universidad de Ibagué, Tolima, Colombia

²Grupo de Estudios en Biodiversidad (GEBIO), Universidad Industrial de Santander, Santander, Colombia

Resumen

La expansión humana ha transformado el paisaje y con ello ha alterado la distribución de numerosas especies, especialmente de aves, reduciendo su riqueza y abundancia. Sin embargo, algunas aves se han adaptado a las áreas urbanas gracias a la disponibilidad de alimentos y recursos. Un ejemplo de esta habituación es la del ibis afeitado (*Phimosus infuscatus*), cuya expansión y colonización en Colombia se han estudiado poco. Evaluamos aquí si la frecuencia de observación de *P. infuscatus* se incrementó en zonas rurales y urbanas de Colombia entre 1977 y 2023 mediante un muestreo no estandarizado, proyectos de ciencia ciudadana y el monitoreo de la observación de aves. Los resultados mostraron un aumento progresivo en la frecuencia de observación de la especie a lo largo del tiempo, siendo el periodo comprendido entre 2010 y 2023 el de mayor número de observaciones. Entre 1977 y 2009 se observó mayor frecuencia en las zonas rurales, pero a partir de 2010 esta aumentó en las áreas urbanas del país, lo que evidenció la habituación exitosa de *P. infuscatus* a los entornos urbanos en varias ciudades de Colombia. Asimismo, se observó un incremento en el rango de elevación de la especie con el tiempo, lo que sugiere que su desplazamiento hacia otras elevaciones puede estar influenciado por las perturbaciones en su hábitat. Sin embargo, el aumento en la frecuencia de observación en los últimos años también podría responder a la creciente popularidad de la plataforma eBird en Colombia.

Palabras clave: Distribución geográfica; Urbanización; Aves; Colonización; Threskiornithidae.

Abstract

Human expansion has altered landscapes, affecting species distribution, especially that of bird communities. These alterations often result in reduced species richness and abundance. However, certain bird species demonstrate a remarkable adaptability to urban environments, probably due to food availability and resources. For instance, the bare-faced ibis (*Phimosus infuscatus*) has adapted to urban areas. Nevertheless, there is a significant knowledge gap concerning its colonization process in Colombia. Our study aimed to assess changes in the observation frequency of *P. infuscatus* in rural and urban areas of Colombia between 1977 and 2023. The data comprises non-standardized sampling, birdwatchers' observations, and citizen-science projects. The analysis revealed a consistent increase in observation frequency over time, peaking between 2010 and 2023. Initially prevalent in rural areas from 1977 to 2009, the observation frequency of *P. infuscatus* notably increased in urban areas of Colombia starting in 2010. We found compelling evidence indicating the successful adaptation of *P. infuscatus* in urban areas across Colombia. There has also been an observable expansion in its elevation over time, suggesting that elevation displacement might be influenced by habitat disturbances, although such an increase may have also been influenced by the growing popularity of eBird in Colombia in recent years.

Keywords: Geographical distribution; Urbanization; Birds; Colonization; Threskiornithidae.

Citación: Ramos-Mosquera V. & López-Delgado E.O. Análisis multitemporal de la frecuencia de observación de *Phimosus infuscatus* (Threskiornithidae) en Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(189):886-896, octubre-diciembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2641>

Editor: Natalia Ocampo Peñuela

***Correspondencia:**

Valentina Ramos-Mosquera;
valentina.ramosm27@gmail.com

Recibido: 3 de mayo de 2024

Aceptado: 19 de noviembre de 2024

Publicado en línea: 9 de diciembre de 2024



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

Introducción

El crecimiento demográfico ha provocado cambios significativos en la estructura y composición de los paisajes debido a los procesos de urbanización (Schütz & Schulze, 2015). Este fenómeno ha impactado los entornos naturales al modificar las condiciones abióticas y alterar las dinámicas ecológicas y los patrones de biodiversidad (Liker *et al.*, 2008). En particular, la expansión urbana ha generado una disminución considerable de la cobertura vegetal, lo que ha alterado la conectividad entre los hábitats naturales e incrementado los niveles de contaminación lumínica y acústica (Korányi *et al.*, 2021; Ordóñez-Delgado *et al.*, 2022). En el contexto global, América Latina se destaca como una de las regiones más urbanizadas, con cerca de un 81 % de su población asentada en áreas urbanas (Aldana-Domínguez *et al.*, 2019; Dobbs *et al.*, 2019).

En el caso específico de Colombia, la urbanización ha sido uno de los principales responsables de la deforestación y la fragmentación de los bosques (Delgado & Correa, 2013). En ese contexto, el valle del Magdalena Medio ha experimentado una acusada transformación del paisaje (Valencia *et al.*, 2018) y los hábitats naturales en áreas urbanizadas, con un impacto directo en la biodiversidad (Martínez-Núñez *et al.*, 2023). En el caso de las comunidades de aves, se ha observado que en los ambientes altamente urbanizados la diversidad de especies tiende a disminuir mientras se incrementa la presencia de especies generalistas (Pena *et al.*, 2023).

La habituación de las especies de aves a la urbanización está condicionada en gran medida por sus características morfológicas y de historia de vida, como el tamaño corporal, la dieta y las estrategias de búsqueda de alimento (Croci *et al.*, 2008). Además, esta habituación difiere según el rango de distribución de cada especie (Pena *et al.*, 2023), siendo más vulnerables aquellas que habitan en el interior de los bosques (Fahrig, 2003; Uezu *et al.*, 2005). A pesar de la fragmentación urbana, aún existen nichos ecológicos que algunas especies de aves pueden explotar. Esta capacidad de habituación a los entornos urbanos refleja su plasticidad para sobrevivir y prosperar en ambientes marcadamente fragmentados (Pagaldai *et al.*, 2021).

Aunque el número de estudios centrados en los impactos de la urbanización sobre la diversidad de aves ha aumentado (Pagaldai *et al.*, 2021; Pena *et al.*, 2023), la comprensión de la colonización de las especies de aves en ciudades del Neotrópico sigue siendo limitada (Aguilar *et al.*, 2016; Stiles *et al.*, 2017). Entre los casos documentados se destaca el de la garcita del ganado (*Bubulcus ibis*), que ha colonizado tanto áreas rurales como urbanas (Parra-Hernández *et al.*, 2015), y el chango llanero (*Quiscalus lugubris*), cuya presencia se ha extendido hacia la costa caribe de Colombia desde los departamentos de Magdalena y La Guajira (Strewe *et al.*, 2006).

Otro caso relevante es el del ibis afeitado (*Phimosus infuscatus*), una especie nativa de Suramérica perteneciente a la familia Threskiornithidae, cuya distribución solía abarcar la región caribeña, los llanos orientales y los valles interandinos del río Magdalena, regularmente a elevaciones de 1.000 m s.n.m. (Hilty *et al.*, 1986; Scheer *et al.*, 2019). Sin embargo, recientemente se ha avistado en varios centros urbanos del país, pero su proceso de expansión a lo largo del tiempo no se ha estudiado ampliamente (Gómez-Londoño & Pulgarín-R, 2020). En ese contexto, nos propusimos evaluar si se ha incrementado la frecuencia de observación de *P. infuscatus* en zonas rurales y urbanas de Colombia durante las últimas décadas, utilizando como fuente de información registros disponibles en la plataforma eBird (2023).

Materiales y métodos

Obtención de la información

Los registros de observación de *P. infuscatus* en Colombia se obtuvieron en la plataforma eBird (2023). Los datos recopilados comprenden los registros de presencia de la especie en los diferentes departamentos del país e incluyen la fecha del avistamiento y las coordenadas geográficas del lugar. El periodo de estudio incluyó observaciones desde 1977 hasta 2023.

Los datos obtenidos corresponden a un muestreo no estandarizado y hacen parte de actividades de ciencia participativa y censos realizados por diversos investigadores para determinar si se había incrementado la frecuencia de observación de *P. infuscatus* en zonas rurales y urbanas de Colombia durante las últimas décadas. Antes de los análisis se hizo una curaduría de los datos para verificar su precisión, incluida la eliminación de listas duplicadas y vacías y la verificación de la información completa, así como la validación de las coordenadas geográficas para garantizar la exactitud del registro.

Análisis de datos

Se calculó la frecuencia de observación de *P. infuscatus* en los diferentes departamentos de Colombia dividiendo el número de avistamientos de la especie por el total de observaciones registradas en cada departamento (D'Angelo *et al.*, 1998). Para analizar las variaciones temporales en la frecuencia de observación, los datos se organizaron en cuatro intervalos de tiempo: 1977-1987; 1988-1998; 1999-2009, y 2010-2023. Estos intervalos se seleccionaron con el fin de realizar una comparación equitativa y observar variaciones en la frecuencia de avistamientos a lo largo del tiempo.

Para separar las observaciones de las áreas urbanas de las rurales, se utilizó el programa ArcGIS 10.8. La delimitación espacial de las áreas de registro de la especie se hizo empleando un *shapefile* de cascos urbanos de Colombia del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2021) a una escala de 1:25.000. Posteriormente, se clasificaron los datos según su ubicación en áreas urbanas o rurales utilizando la herramienta '*select by location*' de ArcGIS 10.8.

Para analizar cambios en la frecuencia de observación entre áreas y durante los intervalos de tiempo establecidos, se emplearon gráficos de barras de las librerías '*ggplot2*', '*gridExtra*' y '*ggpubr*' del programa R, versión 4.0 (R Core Team, 2023). Para detectar diferencias estadísticamente significativas en la frecuencia de observación entre áreas urbanas y rurales y en los intervalos de tiempo definidos (1977-1987, 1988-1998, 1999-2009 y 2010-2013), se hizo un análisis de covarianza (ANCOVA) de dos vías utilizando como covariable el número de listados reportados por diferentes observadores en cada área durante los períodos de tiempo. Además, se llevó a cabo un análisis *post hoc* utilizando la prueba de Bonferroni para identificar diferencias específicas entre los grupos. Se consideraron significativos los valores de $p < 0,05$. Estos análisis se hicieron utilizando la librería '*rstatix*' del programa R.

Se determinó la elevación de cada registro utilizando la herramienta '*Add Surface Information*' en ArcGIS. Se establecieron siete rangos de elevación, de manera que hubiera una separación uniforme de los distintos grupos que facilitara la interpretación de los resultados. Dichos intervalos se establecieron de 0 a 400, 500 a 1000, 1100 a 1600, 1700 a 2200, 2300 a 2900, 3000 a 3500 y 3600 a 4000 m s.n.m. Los datos se representaron gráficamente mediante diagramas de barras utilizando las librerías '*gridExtra*' y '*ggpubr*' en el programa R. Asimismo, para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas en la frecuencia de observación entre los diferentes rangos de elevación e intervalos de tiempo, se recurrió a un ANCOVA de dos vías en el programa R, utilizando el número de listados como covariable.

Por último, para analizar las variaciones espaciales y temporales en las observaciones de *P. infuscatus*, se diseñaron diferentes mapas con el programa ArcGIS 10.8. Se agruparon los datos en intervalos de una década a excepción del periodo entre 2010 y 2023, que se agrupó en intervalos más cortos (2010-2013, 2014-2017 y 2018-2023), para observar con mayor precisión el incremento en las observaciones de *P. infuscatus* durante estos últimos años. Por último, se empleó un ANCOVA de una vía utilizando como covariable los listados reportados y una prueba de Bonferroni para determinar los lapsos de tiempo significativamente diferentes. Para estos análisis se usó la librería '*rstatix*' del programa R, versión 4.0.

Resultados

Se recopilaron 875.918 registros de *P. infuscatus* en Colombia, lo que evidenció un incremento de las observaciones a lo largo del tiempo. Entre 1977 y 1987 las observaciones aumentaron un 0,07 % en comparación con 1988-1998. Este incremento llegó al 0,92 % entre 1999 y 2009 (**Figura 1**). Durante el periodo 2010-2023, subdividido en 2010-2013, 2014-2017 y 2018-2023, los incrementos fueron del 0,23 %, 8,36 % y 78,51 %, respectivamente. Las diferencias en las observaciones a lo largo del tiempo fueron estadísticamente significativas ($p=2e-16$) (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2641/4434>), destacándose el periodo 2018-2023 ($p=1,18e-11$).

En cuanto a las áreas urbanas y rurales, entre 1977 y 2009 la frecuencia de avistamientos fue significativamente mayor en zonas rurales. A partir de la década del 2000, se observó un incremento del 13 % en áreas urbanas, siendo el periodo 2010-2023 el de mayor frecuencia de observaciones (**Figura 2**). A nivel de áreas, *P. infuscatus* se avistó principalmente en zonas rurales de Colombia (**Figura 2**), con diferencias significativas en las observaciones entre áreas urbanas y rurales ($p=3,92e-04$) (**Tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2641/4434>), destacándose el periodo 2010-2023 como el de más registros.

En cuanto a la elevación, aunque no se registraron diferencias estadísticamente significativas entre los distintos rangos de elevación a lo largo del tiempo ($p=0,906$) (**Tabla 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2641/4434>), la mayoría de las observaciones de la especie se concentraron entre los 400 y 1.600 m s.n.m. (**Figura 3**). Entre los 1.700 y los 2.200 m s.n.m., la frecuencia de observación disminuyó, pero aumentó nuevamente entre los 2.300 y 2.900 m s.n.m. Las menores frecuencias de avistamientos se registraron entre los 3.000 y los 4.000 m s.n.m. A lo largo del tiempo se observó un incremento en la frecuencia de observación entre los 0 y los 2.900 m s.n.m. (**Figura 3**).

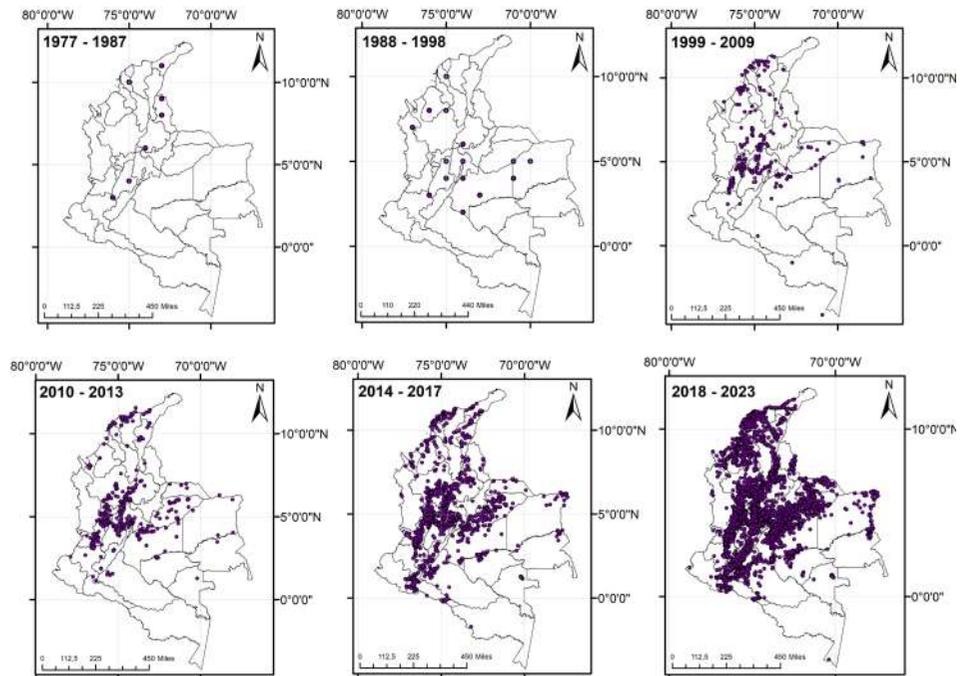


Figura 1. Incremento de las observaciones de *P. infuscatus* a lo largo de los años evaluados.

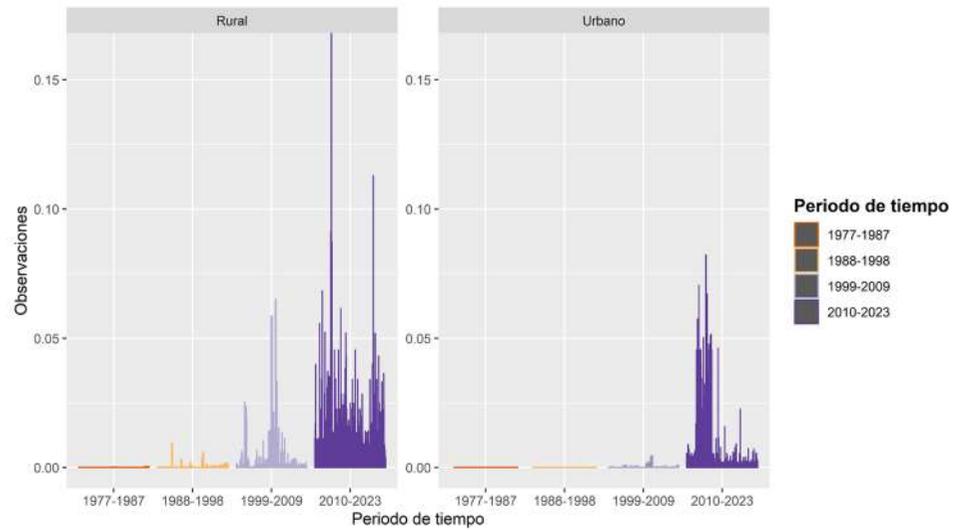


Figura 2. Comparación de la frecuencia de observación de *P. infuscatus* en zonas rurales y urbanas de Colombia.

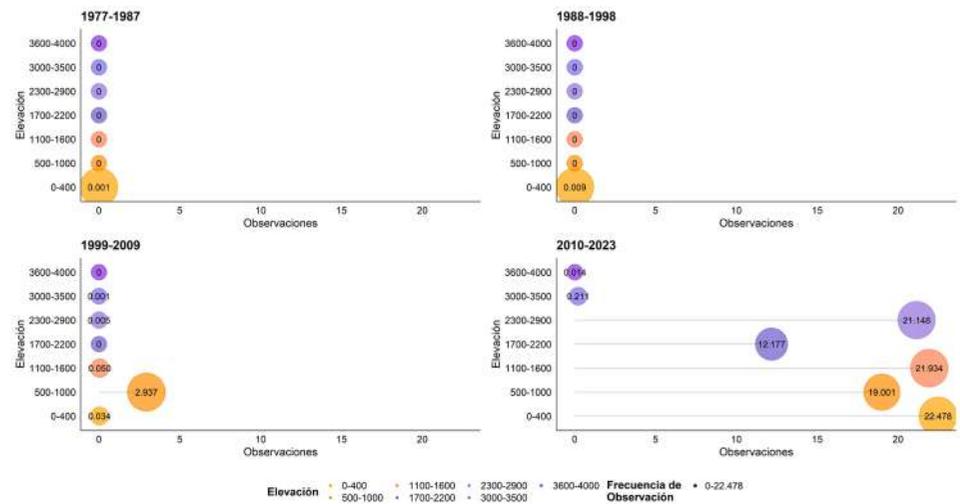


Figura 3. Variación de la frecuencia de observación de *P. infuscatus* en distintos rangos de elevación.

Discusión

El proceso de colonización de *P. infuscatus* en Colombia ha sido bastante dinámico, con un aumento significativo en la frecuencia de observación en áreas rurales y urbanas del país. Aunque la especie habitaba principalmente en zonas rurales, en los últimos años ha habido un incremento considerable en la frecuencia de observación en entornos urbanos, lo que demuestra su habituación exitosa a entornos altamente modificados por la actividad humana. En varios estudios realizados en el Valle de Aburrá en Antioquia, la Sabana de Bogotá y el Valle del Cauca se ha documentado esta tendencia creciente en la abundancia de la especie a lo largo del tiempo (Gómez-Londoño & Pulgarin-R, 2020; Ramírez-Urrea *et al.*, 2014; Stiles *et al.*, 2021).

Las aves se han caracterizado por ser un grupo muy sensible a las perturbaciones y los cambios en el paisaje, especialmente por el proceso de urbanización, el cual conlleva modificaciones en el uso del suelo, variaciones microclimáticas y pérdida de biodiversidad

(Rodrigues *et al.*, 2018). Sin embargo, a pesar de estos desafíos, diversas especies de aves han logrado colonizar y prosperar en entornos urbanos (Sol *et al.*, 2014). La amplia disponibilidad de alimento en las ciudades proporciona una mayor cantidad de recursos, lo que les permite colonizar estos entornos con éxito (Diquelou *et al.*, 2015; Stofberg *et al.*, 2019). Esto es especialmente evidente para especies que pueden explotar recursos antropogénicos como los alimentos procesados (Møller, 2009).

En las ciudades los alimentos suelen ser más abundantes, predecibles en el tiempo y espacio, y menos propensos a fluctuaciones estacionales en comparación con los recursos naturales (Stofberg *et al.*, 2019). Esta abundancia y previsibilidad de alimentos antropogénicos permiten que las especies dediquen menos tiempo y esfuerzo a la búsqueda de alimento (Stofberg *et al.*, 2019). Además, la urbanización tiende a favorecer a las aves insectívoras al proporcionar un suministro continuo de alimentos en las áreas de recolección de desechos en las ciudades, las cuales ofrecen una fuente adicional de comida, permitiendo a las aves aprovechar los recursos sobrantes generados por las actividades humanas (Chace & Walsh, 2006; Shochat, 2004). Un ejemplo de esta habituación es el de la especie *P. infuscatus*, cuya frecuencia de observación en entornos urbanos ha aumentado notablemente en los últimos años.

Las actividades de forrajeo de esta especie suelen desarrollarse en zonas verdes cerca de cuerpos de agua, como quebradas o ríos, donde pueden encontrar fácilmente recursos alimenticios. Es común observar a la especie forrajeando en la zona ribereña, especialmente cuando el caudal del río es bajo (Gómez-Londoño & Pulgarín-R, 2020). Además, las aves de mayor tamaño corporal tienden a adaptarse con más facilidad a estos entornos, pues utilizan las capas superiores de la vegetación para anidar y alimentarse (Del Barco-Trillo, 2018; Pena *et al.*, 2023). Estas especies también parecen mostrar una menor aversión a la presencia humana, lo que les permite desplazarse con más facilidad y a cortas distancias en busca de alimento (Pena *et al.*, 2023).

El proceso de colonización y habituación de *P. infuscatus* a entornos urbanos ha sido documentado en diferentes estudios. En la ciudad de Cali, a finales de los años 90, la especie era considerada como visitante ocasional. Pero ya para el 2012 la especie se había establecido exitosamente en las áreas urbanas de la ciudad (Muñoz *et al.*, 2007; Hernández-C *et al.*, 2015). Asimismo, en la zona periurbana de Bogotá no se había avistado la especie hasta el 2001 (Rosselli *et al.*, 2017), pero para el 2014, se había establecido con éxito en las áreas urbanas (Stiles *et al.*, 2017). Según estudios realizados en Ibagué, la presencia de la especie se registró por primera vez en el municipio entre el 2004 y el 2006 (Parra-Hernández *et al.*, 2007) y, con el paso de los años, se observó un incremento en su frecuencia de observación en la zona urbana, con un aumento del 16 % en los registros hasta el 2023.

La especie se avistó principalmente en zonas bajas, a elevaciones de alrededor de los 400 m s.n.m. Cabe destacar que debido a sus características climáticas y ambientales estas zonas son adecuadas para los cultivos de arroz, los cuales ofrecerían un entorno favorable para la especie, ya que las aves aprovechan la aparición esporádica de insectos en estos campos para alimentarse (Rivillas & Zaque, 2020). La alta frecuencia de observación de *P. infuscatus* en estas zonas podría estar relacionada con la presencia de dichos cultivos. En el estudio de Sanabria-Mejía *et al.* (2007) se encontró que *P. infuscatus* fue la especie más abundante en este tipo de hábitat, con un total de 1.135 registros.

En cuanto a la elevación, *P. infuscatus* se avistó con una frecuencia del 21 % entre los 2.300 y los 2.900 m s.n.m., lo que coincide con los hallazgos de Ramírez-Urrea *et al.* (2014) referidos a la estructura y composición de las comunidades de aves en el río La Vieja en los departamentos de Valle del Cauca, Quindío y Risaralda entre el 2001 y el 2013. Los autores encontraron que la especie fue avistada principalmente en localidades por encima de los 2.000 m s.n.m., lo que resalta la capacidad de la especie para establecerse en diferentes elevaciones en su proceso de colonización en Colombia. Este desplazamiento hacia otras elevaciones podría estar relacionado con las perturbaciones en los ecosistemas (Gómez-Londoño & Pulgarín-R, 2020).

Entre los 3.000 y los 4.000 m s.n.m. la frecuencia de observación fue baja, disminución que podría atribuirse a varios factores ambientales. Por ejemplo, con el aumento de la elevación la temperatura tiende a disminuir, lo que puede crear un entorno menos favorable para la especie (**Balasubramaniam & Rotenberry**, 2016). Además, la disponibilidad de insectos, que constituyen una fuente importante de alimento para *P. infuscatus*, también disminuye a mayores altitudes debido a las temperaturas más frías (**Ghimire et al.**, 2021).

El proceso de desplazamiento de esta especie hacia áreas urbanas de Colombia también se ha observado en otros países de Suramérica como Argentina, donde se encontró una relación entre los registros de la especie en entornos urbanos con temporadas de escasez hídrica, lo que sugiere que la variabilidad climática puede ser un factor que ocasiona el desplazamiento de la especie hacia ambientes urbanos en busca de recursos (**Acosta & Dadon**, 2013). En Brasil también se determinó que la rápida colonización de la especie en la región de Santa Catarina podría ser el resultado de la transformación del paisaje debido a las actividades agrícolas (**Piacentini et al.**, 2009).

Por otro lado, este proceso de habituación a entornos urbanos se ha encontrado en otras especies de la familia Threskiornithidae. Un caso muy estudiado es el de *Threskiornis molucca* en Australia donde esta especie logró colonizar las áreas urbanas de manera exitosa. Se cree que en este caso el cambio en la distribución fue impulsado por las actividades antropogénicas en los humedales del este de Australia, los cuales se han visto degradados principalmente debido a las prácticas agrícolas, la expansión humana y la construcción de represas (**Martin et al.**, 2010; **McKiernan & Instone**, 2016).

En Colombia los humedales de los Andes orientales, que albergan una gran diversidad de aves y donde se observa frecuentemente a *P. infuscatus*, se localizan en las zonas más pobladas y productivas del país. Este cambio ha provocado la pérdida de más del 97 % de su área original y la extinción de especies endémicas como el zambullidor andino (*Podiceps andinus*) (**Rosselli & Stiles**, 2012). Esta reducción del hábitat podría estar contribuyendo a la disminución de las poblaciones de otras aves acuáticas (**van der Hammen et al.**, 2008). Los humedales de la Sabana de Bogotá en particular están siendo fragmentados y enfrentan elevados niveles de contaminación debido a la industrialización, el desbordamiento de rellenos sanitarios y la contaminación con aguas residuales (**Rosselli & Stiles**, 2012; **van der Hammen et al.**, 2008; **Vásquez et al.**, 2006).

El incremento en la frecuencia de observación de *P. infuscatus* observado a lo largo de los años, especialmente entre el 2014 y el 2023 (86,87 %), podría estar relacionado, en cierto modo, con el creciente uso de la plataforma eBird por parte de una amplia comunidad de observadores de aves en el país (**Gómez-Londoño & Pulgarín-R**, 2020). En ese lapso de tiempo la plataforma eBird presentó un aumento significativo en el número de personas interesadas en realizar avistamientos de aves en Colombia. Los registros recopilados a través de esta plataforma representan una valiosa herramienta para el monitoreo participativo de comunidades de aves (**Sullivan et al.**, 2009), convirtiéndola en una plataforma integral para la investigación, la conservación y la educación sobre las aves y sus hábitats (**Gómez-Londoño & Pulgarín-R**, 2020; **La Sorte & Somveille**, 2019).

El crecimiento en la participación ciudadana en la observación y registro de aves destaca el potencial de eBird como una herramienta colaborativa que contribuye con la divulgación científica y la conservación de la avifauna en Colombia. No obstante, es esencial reconocer las limitaciones de este tipo de datos, pues a menudo presentan errores, suposiciones y sesgos debido a la falta de estandarización en el proceso de recolección (**Johnston et al.**, 2021). En el caso específico de *P. infuscatus*, una especie gregaria, esto puede llevar a una sobreestimación de su abundancia (**Vallecillo et al.**, 2022), especialmente cuando se observa el vuelo de las aves en grandes bandadas (**Matamala et al.**, 2020). El aumento en el número de observadores y el uso recurrente de eBird pueden haber contribuido al aumento aparente en la frecuencia de observación de la especie en las últimas décadas, sesgo que puede influir en la interpretación de los resultados. Es fundamental, por lo tanto, tener en cuenta estos factores al realizar futuras investigaciones.

En nuestro estudio no se consideraron las diferencias en el tamaño y las características de las áreas urbanas en los diferentes departamentos de Colombia, lo que constituiría una variable que podría influir significativamente en las poblaciones de *P. infuscatus*. La falta de distinción entre áreas urbanas de diferentes tamaños y características limita la comprensión de cómo tales variaciones afectan la frecuencia de observación y distribución de la especie. Por lo tanto, en futuros estudios es importante incorporar esta variable para obtener una comprensión más completa de cómo la urbanización influye en las poblaciones de esta especie.

Conclusiones

Phimosus infuscatus ha experimentado cambios significativos en su distribución a lo largo de los años en Colombia. Aunque la especie se ha avistado principalmente en zonas rurales, a partir del 2000 se observó un incremento en la frecuencia de observación en áreas urbanas, posiblemente debido a la amplia disponibilidad de alimento en las ciudades. Esta especie parece beneficiarse de la urbanización y tiene poca aversión a la presencia humana cuando se desplaza a cortas distancias en busca de alimento. Además, el aumento en la frecuencia de observación de la especie a lo largo del tiempo también puede atribuirse al incremento en el uso de la plataforma eBird por parte de una amplia comunidad de observadores de aves. Debe reconocerse el potencial de la plataforma para desarrollar estudios sobre la avifauna colombiana, pues es una valiosa herramienta para el monitoreo participativo de comunidades de aves y la conservación de especies.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2641/4434>

Agradecimientos

A la plataforma eBird por facilitar la información requerida para el presente estudio.

Contribución de los autores

V.R.M y E.O.L.D: solicitud de información, análisis de datos y redacción del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Acosta, T. H. & Dadon, J. R. (2013). Ambientes urbanos como refugios del Cuervillo cara pelada (*Phimosus infuscatus*) ante el déficit hídrico transitorio. *Nótulas Faunísticas*, 126, 1-5.
- Aguilar, J. M., Freile, J. F., Tinoco, B. A. (2016). Rapid colonization of Ecuador by the tropical mockingbird (*Mimus gilvus*). *Ornitología Neotropical*, 27, 155-162. <https://doi.org/10.58843/ornneo.v27i0.51>
- Aldana-Domínguez, J., Palomo, I., Gutiérrez-Angonese, J., Arnaiz-Schmitz, C., Carlos, M., Francisco, N. (2019). Assessing the effects of past and future land cover changes in ecosystem services, disservices and biodiversity: A case study in Barranquilla Metropolitan Area (BMA), Colombia. *Ecosystem Services*, 37, 100915. <https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2019.100915>
- Balasubramaniam, P. & Rotenberry, J. T. (2016). Elevation and latitude interact to drive life-history variation in precocial birds: a comparative analysis using galliformes. *Journal of Animal Ecology*, 85(6), 1528-1539. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12570>
- Chace, J. F. & Walsh, J. J. (2006). Urban effects on native avifauna: A review. *Landscape and Urban Planning*, 74(1), 46-69. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.08.007>
- Croci, S., Butet, A., Clergeau, P. (2008). Does urbanization filter birds on the basis of their biological traits? *The Condor*, 110(2), 223-240. <https://doi.org/10.1525/cond.2008.8409>
- D'Angelo, S., Venturin, N., Oliveira, A., Friero, F. (1998). Avifauna de quatro fisionomias florestais de pequeno tamanho (5-8 ha) no campus da UFLA. *Revista Brasileira de Biologia*, 58(3), 463-472. <https://doi.org/10.1590/s0034-71081998000300011>

- Del Barco-Trillo, J.** (2018). Shyer and larger bird species show more reduced fear of humans when living in urban environments. *Biology Letters*, 14(4). <https://doi.org/10.1098/rsbl.2017.0730>
- Delgado, C. A. & Correa, J. C.** (2013). Estudios ornitológicos urbanos en Colombia: revisión de literatura. *Ingeniería y Ciencia*, 9(18), 215-236.
- Diquelou, M.C., Griffin, A., Sol, D.** (2016). The role of motor diversity in foraging innovations: a cross-species comparison in urban birds. *Behavioral Ecology*, 27, 584-591. <https://doi.org/10.1093/beheco/arv190>
- Dobbs, C., Escobedo, F. J., Clerici, N., de la Barrera, F., Eleuterio, A. A., MacGregor-Fors, I., Reyes-Paecke, S., Vásquez, A., Zea Camaño, J. D., Hernández, H. J.** (2019). Urban ecosystem Services in Latin America: mismatch between global concepts and regional realities? *Urban Ecosystems*, 22(1), 173-187. <https://doi.org/10.1007/s11252-018-0805-3>
- eBird.** (2023). eBird: An online database of bird distribution and abundance [web application]. <https://www.ebird.org>.
- Fahrig, L.** (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34, 487-515. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>
- Ghimire, A., Rokaya, M. B., Timsina, B., Bilá, K., Shrestha, U. B., Chalish, M. K., Kindlmann, P.** (2021). Diversity of birds recorded at different altitudes in central Nepal Himalayas. *Ecological Indicators*, 127, 107730. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.107730>
- Gómez, C., Cadena, C. D., Sierra-Ricaurte, A., Soto-Patiño, J., Cuervo, A. M., Díaz-Cardenas, J., Ocampo-Peñuela, N., Ocampo, D., Seeholzer, G.** (2022). Reexpedición Colombia: Entender el pasado para empoderar acciones que fortalezcan el conocimiento y conservación de las aves. *Biota Colombiana*, 23(1), e984. <https://doi.org/10.21068/2539200X.984>
- Gómez-Londoño, D. M. & Pulgarín-R, P. C.** (2020). Colonización, patrones de distribución y uso de hábitat del Ibis Negro (*Phimosus infuscatus*) en la zona urbana del Valle de Aburrá, Colombia. [Tesis de pregrado, Universidad CES]. <https://repository.ces.edu.co/handle/10946/4735>
- Hernández-C, O., Cardona-B, V., Montoya-V, P.** (2015). Riqueza de especies de aves en el campus de la Universidad del Valle, once años después. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 7(1), 25-34. <https://doi.org/10.24188/recia.v7.n1.2015.419>
- Hilty, S. & Brown, W.** (1986). *A Guide to the Birds of Colombia*. (Vol. 1). Princeton University Press.
- Johnston, A., Hochachka, W. M., Strimas-Mackey, M. E., Ruiz Gutiérrez, V., Robinson, O. J., Miller, E. T., Auer, T., Kelling, S. T., Fink, D.** (2021). Analytical guidelines to increase the value of community science data: An example using eBird data to estimate species distributions. *Diversity and Distributions*, 27(7), 1265-1277. <https://doi.org/10.1111/ddi.13271>
- Korányi, D., Gallé, R., Donkó, B., Chamberlain, D. E., Batáry, P.** (2021). Urbanization does not affect green space bird species richness in a mid-sized city. *Urban Ecosystems*, 24, 789-800. <https://doi.org/10.1007/s11252-020-01083-2/Published>
- La Sorte, F. A. & Somveille, M.** (2019). Survey completeness of a global citizen-science database of bird occurrence. *Ecography*, 42, 1-10. <https://doi.org/10.1111/ecog.04632>
- Liker, A., Papp, Z., Bókony, V., Lendvai, Á. Z.** (2008). Lean birds in the city: Body size and condition of house sparrows along the urbanization gradient. *Journal of Animal Ecology*, 77(4), 789-795. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2008.01402.x>
- Martin, J., French, K., Major, R.** (2010). Population and breeding trends of an urban coloniser: the Australian white ibis. *Wildlife Research*, 37, 230-239. <https://doi.org/10.1071/WR10047>
- Martínez-Núñez, C., Martínez-Prentice, R., García-Navas, V.** (2023). Land-use diversity predicts regional bird taxonomic and functional richness worldwide. *Nature Communications*, 14(1), 1320. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37027-5>
- Matamala, M., A. Echeverri, I. Medina, E. N. Salazar-Gómez, V. Alarcón, Cadena, C. D.** (2020). Bare-faced Ibis (*Phimosus infuscatus*), version 1.0. *Birds of the World* (T. S. Schulenberg, Editor). Cornell Lab of Ornithology. <https://doi.org/10.2173/bow.bafibi1.01>
- McKiernan, S. & Instone, L.** (2016). From pest to partner: rethinking the Australian White Ibis in the more-than-human city. *Cultural Geographies*, 23(3), 1-20. <https://doi.org/10.1177/1474474015609159>
- Møller, A.P.** (2009). Successful city dwellers: a comparative study of the ecological characteristics of urban birds in the Western Palearctic. *Oecologia*, 159, 849-858. <https://doi.org/10.1007/s00442-008-1259-8>
- Muñoz, M. C., Fierro-Calderón, K., Rivera-Gutiérrez, H. F.** (2007). Las aves del campus de la Universidad del Valle, una isla verde urbana en Cali, Colombia. *Ornitología Colombiana*, 5(5), 5-20. <https://doi.org/10.59517/oc.e492>

- Ordóñez-Delgado, L., Iñiguez-Armijos, C., Díaz, M., Escudero, A., Gosselin, E., Waits, L. P., Espinosa, C. I.** (2022). The Good, the Bad, and the Ugly of Urbanization: Response of a Bird Community in the Neotropical Andes. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 844944. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.844944>
- Pagaldai, N., Arizaga, J., Jiménez-Franco, M. V., Zuberogoitia, I.** (2021). Colonization of urban habitats: Tawny owl abundance is conditioned by urbanization structure. *Animals*, 11(10), 2954. <https://doi.org/10.3390/ani11102954>
- Parra-Hernández, R., Carantón-Ayala, D., Sanabria-Mejía, J., Barrera-Rodríguez, L., Sierra-Sierra, A., Moreno-Palacios, M., Yate-Molina, W., Figueroa-Martínez, W., Díaz-Jaramillo, C., Florez-Delgado, V., Certuche-Cubillos, J., Loaiza-Hernández, H., Florido-Cuellar, B.** (2007). Aves del municipio de Ibagué - Tolima, Colombia. *Biota Colombiana*, 8(2), 199-220.
- Parra-Hernández, R., Tolosa, W., Figueroa, W.** (2015). Nuevos registros y estado actual de las especies introducidas en el municipio de Ibagué. *Revista Tumbaga*, 1(10), 58-75.
- Pena, J. C., Ovaskainen, O., MacGregor-Fors, I., Teixeira, C. P., Ribeiro, M. C.** (2023). The relationships between urbanization and bird functional traits across the streetscape. *Landscape and Urban Planning*, 232, 104685. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104685>
- Piacentini, V., Ghizoni-Jr, L., Guimarães, M., Carrano, E., Borchardt-Jr, C., Amorim, J., Grose, A.** (2009). Ocorrência, expansão e distribuição do maçarico-de-cara-pelada *Phimosus infuscatus* (Lichtenstein, 1823) (Ciconiiformes: Threskiornithidae) no Estado de Santa Catarina, sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ornitologia*, 17, 107-112.
- R Core Team.** (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ramírez-Urrea, L., Arbeláez-Cortés, E., Marín-Gómez, O., Duque-Montoya, D.** (2014). Patrones de la composición de aves acuáticas en el río la vieja, valle geográfico del Río Cauca, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 19(1), 155-166.
- Rivillas, A. M. & Zaque, W. B.** (2020). Rice Growing Environment of the Ibagué Belt, Colombia: An Ecological Study at the Geotope Scale. *The Geographical Bulletin*, 61(1), 5-17.
- Rodrigues, A. G., Borges-Martins, M., Zilio, F.** (2018). Bird diversity in an urban ecosystem: The role of local habitats in understanding the effects of urbanization. *Iheringia - Serie Zoologia*, 108, e2018017. <https://doi.org/10.1590/1678-4766e2018017>
- Rosselli, L., De la Zerda, S., Candil, J.** (2017). Cambios en la avifauna de un relicto de bosque en la franja periurbana de Bogotá a lo largo de catorce años. *Acta Biológica Colombiana*, 22(2), 181-190. <https://doi.org/10.15446/abc.v22n2.60688>
- Rosselli, L. & Stiles, F. G.** (2012). Wetland habitats of the Sabana de Bogotá Andean Highland Plateau and their birds. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 22(3), 303-317. <https://doi.org/10.1002/aqc.2234>
- Sanabria-Mejía, J., Moreno-Palacios, M., Lugo-Camacho, A., Florido-Cuellar, B., Díaz-Jaramillo, C., Certuche-Cubillos, K.** (2007). *Arroceras Como Hábitat Potencial Para Aves Acuáticas: Una evaluación rápida a través del Censo Neotropical de Aves Acuáticas en el municipio de Ibagué, Colombia.* (Nro. 003) Grupo de Observadores de Aves del Tolima <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3876.0481>
- Scheer, S., Mascarenhas, C. S., Macedo, M. R. P., Muller, G.** (2019). Helminths Assemblage of the bare-faced ibis, *Phimosus infuscatus* (Lichtenstein, 1823) (Pelecaniformes: Threskiornithidae), in southern Brazil. *Revista Brasileira de Parasitologia Veterinaria*, 28(1), 40-46. <https://doi.org/10.1590/s1984-29612019001>
- Schütz, C. & Schulze, C. H.** (2015). Functional diversity of urban bird communities: Effects of landscape composition, green space area and vegetation cover. *Ecology and Evolution*, 5(22), 5230-5239. <https://doi.org/10.1002/ece3.1778>
- Shochat, E.** (2004). Credit or debit? Resource input changes population dynamics of city-slicker birds. *Oikos*, 106(3), 622-626. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2004.13159.x>
- Sol, D., González-Lagos, C., Moreira, D., Maspons, J., Lapiedra, O.** (2014). Urbanisation tolerance and the loss of avian diversity. *Ecology Letters*, 17(8), 942-950. <https://doi.org/10.1111/ele.12297>
- Stiles, G., Rosselli, L., De La Zerda, S.** (2017). Changes over 26 years in the avifauna of the Bogotá region, Colombia: Has climate change become important? *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5, 58. <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00058>
- Stiles, G., Rosselli, L., De La Zerda, S.** (2021). Una avifauna en cambio: 26 años de conteos navideños en la Sabana de Bogotá, Colombia. *Ornitología Colombiana*, 19, 1-50. <http://asociacioncolombianadeornitologia.org/>

- Stofberg, M., Cunningham, S. J., Sumasgutner, P., Amar, A.** (2019). Juggling a “junk-food” diet: responses of an urban bird to fluctuating anthropogenic-food availability. *Urban Ecosystems*, 22(6), 1019-1026. <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00885-3>
- Strewe, R., Villa-De León, C., Lobatón, G., Morales, A., Ayerbe, F.** (2006). Ampliación del rango de distribución del Chango llanero *Quiscalus lugubris* (Icteridae) en Colombia. *Revista Intropica*, 3(1), 109-112.
- Sullivan, B. L., Wood, C. L., Iliff, M. J., Bonney, R. E., Fink, D., Kelling, S.** (2009). eBird: A citizen-based bird observation network in the biological sciences. *Biological Conservation*, 142(10), 2282-2292.
- Uezu, A., Metzger, J. P., Vielliard, J.** (2005). Effects of structural and functional connectivity and patch size on the abundance of seven Atlantic Forest bird species. *Biological Conservation*, 123(4), 507-519. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.01.001>
- Valencia, A. L. M., Hincapié, C. F. Á., Giraldo, C. E., Soto, S. U.** (2018). Análisis multitemporal del paisaje en el Magdalena Medio en el periodo 1985-2011: una ventana de interpretación de cambios históricos e implicaciones en la conectividad estructural de los bosques. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 27(1), 10-26. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v27n1.55783>
- Vallecillo, D., Guillemain, M., Authier, M., Bouchard, C., Cohez, D., Vialet, E., Massez, G., Vandewalle, P., Champagnon, J.** (2022). Accounting for detection probability with overestimation by integrating double monitoring programs over 40 years. *PLoS ONE*, 17(3), e0265730. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265730>
- van der Hammen, T., Stiles, F.G., Rosselli, L., Chisacá, M.L., Camargo, G., Guillot, G., Useche, Y., Rivera, D.** (2008). *Protocolo de recuperación y rehabilitación ecológica de humedales en centros urbanos*. Secretaría Distrital de Ambiente –SDA, Alcaldía Mayor de Bogotá, Bogotá.
- Vásquez, C., Ariza, A., Pinilla, G.** (2006). Descripción del estado trófico de diez humedales del altiplano cundiboyacense. *Universitas Scientiarum*, 11(2), 61-75.

Artículo original

Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XII. Nuevas especies de *Matisia* de Colombia y Panamá

Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XII. New species of *Matisia* from Colombia and Panamá

✉ José Luis Fernández-Alonso^{1,*}, ✉ Ernesto Campos-Pineda²

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

² Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, Balboa, Ancon, Panamá

Resumen

Como parte de los trabajos de revisión que se adelantan en el género neotropical de árboles *Matisia* (Malvaceae), más concretamente en relación con las secciones *Calyculatae* y *Longipedes*, se describen en este trabajo seis especies nuevas. Cuatro de ellas se adscriben a la sección *Longipedes* (*M. genesiana*, *M. petaquillae*, *M. mutataka* y *M. changuinolana*) y las otras dos a la sección *Calyculatae* (*M. rufula* y *M. aquilarum*). De ellas, tres se conocen únicamente en territorio panameño y las otras tres en Colombia.

Palabras clave: Centroamérica; Especies nuevas; Matisieae; Sudamérica, taxonomía.

Abstract

As part of the ongoing revision of the neotropical tree genus *Matisia* (Malvaceae), specifically of its sections *Calyculatae* and *Longipedes*, we describe six new species here. Four belong to the section *Longipedes* (*M. genesiana*, *M. petaquillae*, *M. mutataka*, and *M. changuinolana*) and the other two to the section *Calyculatae* (*M. rufula* and *M. aquilarum*). Three are known only from Panama and the other three are from Colombia.

Keywords: Central America; New species; Matisieae; South America, taxonomy.

Introducción

El género neotropical *Matisia* (Matisieae Benth.) se distribuye desde Nicaragua hasta Brasil. Tiene más de 50 taxones conocidos (Alverson, 1989; Fernández-Alonso, 1996; 2001a; 2011) y al menos otras 20 especies en proceso de descripción (Fernández-Alonso, en prep.). En un trabajo reciente se evidenciaron 14 especies de *Matisia* en Panamá, incluidas *M. gentryi* Fern.Alonso y *M. tinamastiana* A. Estrada & Cascante, las cuales se registraban por primera vez en ese territorio (Fernández-Alonso & Campos-Pineda, 2023) y, asimismo, se mencionaba la existencia de una especie nueva en proceso de descripción. Los materiales panameños de la sección *Calyculatae*, tratados tentativamente como *M. lomensis* s.l. y *M. idroboi* s.l., así como una colección asignable a la sección *Longipedes*, se revisaron debidamente y originaron la presente propuesta de las tres especies nuevas de Panamá.

Los trabajos de revisión del género *Matisia* Benth., adelantados en las últimas dos décadas por el primer autor (JLF) del presente artículo, se apoyaron en el estudio de material de diferentes herbarios, principalmente de Costa Rica, Colombia, Ecuador, Estados Unidos y Panamá (CR, COL, HUA, FMB, MA, MEDEL, MO, PMA, SCZ), y en diferentes trabajos de campo que fueron posibles en el marco de los proyectos llevados a cabo con el Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, la Asociación Colombiana de Herbarios (curso de capacitación en Bombacáceas, ACH), COLCIENCIAS, la Agencia

Citación: Fernández-Alonso JL & Campos-Pineda E. Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XII. Nuevas especies de *Matisia* de Colombia y Panamá. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(189):897-921, octubre-diciembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.3072>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

José Luis Fernández-Alonso;
jlfernandez@rjb.csic.es

Recibido: 5 de septiembre de 2024

Aceptado: 28 de noviembre de 2024

Publicado en línea: 11 de diciembre de 2024



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

Española de Cooperación (AECID), el Real Jardín Botánico de Madrid (RJB-CSIC) y el Herbario de la Universidad de Panamá (PMA) (Fernández-Alonso, 1992, 2001a, Ibáñez *et al.*, 2005). La expedición de recolección de diciembre de 1990 en el departamento de Chocó, realizada con el apoyo de la AECID y la colaboración del Herbario de la U. Tecnológica del Chocó (CHOCO), fue fundamental para el despegue del proyecto de revisión de *Matisia*. Una de estas colecciones, llevada a cabo con los colegas M. Velayos (MA), E. Rico (SALA) y F. García (CHOCO), correspondía a una especie nueva, estudiada y dibujada hace ya muchos años, que hoy se da a conocer en este trabajo con el nombre *M. genesiana*. Posteriormente, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y el Ministerio de Ciencia e Innovación permitieron la continuidad del estudio de *Matisia* entre el 2010 y el 2012 a través del proyecto de revisión de las secciones *Calyculatae* y *Longipedes* y otros proyectos desarrollados en los últimos quince años.

Materiales y métodos

Como parte de la revisión que viene adelantando el primer autor en las secciones *Calyculatae* y *Longipedes* del género *Matisia*, se estudiaron en un primer momento 210 colecciones del género *Matisia* depositadas en los herbarios CAUP, CHOCO, COL, FAUC, FMB, HUA, JAUM, MA, MEDEL, MO, PMA y SCZ (acrónimos según Thiers, 2024). Más recientemente los autores revisaron nuevas colecciones de diferentes herbarios de Panamá, incluidas las del herbario de la Universidad Autónoma de Chiriquí (UCH) y las colecciones de referencia del Centro de Ciencias Forestales del Trópico (CTFS[ForestGeo]). Además, en campo se examinó nuevo material de las especies en estudio y en el caso de *Matisia petaquillae* se recolectaron en la región del Distrito de Donoso (ECP) especímenes que fueron preservados y depositados en los herbarios PMA y SCZ. En el estudio morfológico se siguió la metodología ya referida en contribuciones anteriores (Fernández-Alonso, 1996, 2001a; Fernández-Alonso & Campos-Pineda, 2023) y en la terminología descriptiva, además de la referida en las contribuciones mencionadas, se siguió a Font i Quer (1985), Harris & Harris (2001) y Ellis *et al.* (2009).

Se tomaron algunas fotografías de acercamiento (tricomas y detalles de estructuras florales) con lupa binocular Nikon SMZ645 y lente de 100x acoplada a una cámara Canon PowerShot SX260HS. Para capturar otras imágenes se utilizó una cámara Nikon D3100 con un lente macro y un estereoscopio Leica S8APO equipado con una cámara Leica MC 170 HD utilizando el programa Leica Application Suite Version 4.13.0. Para el montaje de las láminas ilustrativas se utilizó Adobe Photoshop 2022. Las coordenadas se tomaron de la información sobre los especímenes y, en caso de no tenerlas, se estimaron de acuerdo con la localidad descrita, en tanto que en los mapas de distribución geográfica se utilizó ArcGIS Pro v. 3.3.1.

Para calcular los valores de las áreas de ocupación (AOO) y las de presencia (EOO) se utilizó GeoCAT (Bachmann *et al.*, 2011) y para determinar el estado de conservación se utilizaron las categorías y criterios de la Lista Roja de la UICN (2012, 2022).

Resultados

En el marco de la revisión que se viene adelantando en las secciones *Calyculatae* y *Longipedes* del género *Matisia* (Fernández-Alonso, 2001a, 2011) se describen aquí cuatro especies de la sección *Longipedes*, en cierto modo afines a *M. sclerophylla* Cuatrec. y *M. anchicayana* Fern.Alonso, y dos de la sección *Calyculatae*, del grupo de especies que presentan cáliz 10-alado. Tres de estas especies se han registrado solo en territorio panameño y las otras tres en Colombia.

Por otra parte, se actualizó la clave para las especies de *Matisia* de Panamá incluida en la revisión mencionada, la cual hoy cuenta con 15 especies incluyendo tres nuevos taxones aquí descritos. Las especies de *Matisia* de Panamá se asignan a cuatro de las cinco secciones reconocidas en el género (Fernández-Alonso, 2001a): cinco especies a la sección *Calyculatae*, tres a la sección *Castano* Fern. Alonso, dos a la sección *Longipedes* y cinco a la sección *Matisia* (Tabla 1).

Tabla 1. Secciones de *Matisia* representadas en Panamá con sus respectivas especies

Sección	Especies
<i>Calyculatae</i>	<i>M. aquilarum</i> sp. nov.
	<i>M. exalata</i> W.S. Alverson
	<i>M. jefensis</i> (A. Robyns & S. Nilsson) W.S. Alverson
	<i>M. pacifica</i> Fern. Alonso
	<i>M. sanblasensis</i> (A. Robyns) Cuatrec.
<i>Castano</i>	<i>M. dolychopoda</i> (A. Robyns) Cuatrec.
	<i>M. dolychosiphon</i> (A. Robyns & S. Nilsson) W.S. Alverson
	<i>M. ochrocalyx</i> K. Schum.
<i>Longipedes</i>	<i>M. changuinolana</i> sp. nov.
	<i>M. petaquillae</i> sp. nov.
<i>Matisia</i>	<i>M. arteagensis</i> Cuatrec.
	<i>M. cordata</i> Bonpl.
	<i>M. gentryi</i> Fern. Alonso
	<i>M. obliquifolia</i> Standl.
	<i>M. tinamastiana</i> A. Estrada & Cascante

1. *Matisia genesiana* Fern. Alonso, sp. nov. (Figuras 1-2)

TIPO: COLOMBIA. **Chocó.** Municipio de Istmina, corregimiento de Pepé, salida de Istmina a Pie de Pepé en la vía Peradó-Pepé, cerca del río Peradó, 150 m, bosque pluvial tropical muy aclarado cerca de la carretera, árbol de 15-17 m (fl, fr), 5 dic 1990, J.L. Fernández-A. 8506 & F. García, E. Rico, M. Velayos (holotipo CHOCO 9758; isotipos BR 926963, COL 510168, L 3736534, MA 524854, MA 534693).

Diagnosis. A species that belongs to Section *Longipedes* Fern. Alonso, related to *Matisia sclerophylla* Cuatrec., from which it differs by its terminal buds, floral pedicel and calyx with brown, rigid, tuberculate-fasciculate or short equinate-fasciculate indumentum (vs. terminal buds, floral pedicel and calyx (**Figura 1G**) with fine stellate-tomentose or slightly stellate-equinate indumentum); leaves with broadly obovate blades with inequilateral base, very rough and lacking luster on upper side, with 5-6 basal veins (vs. narrowly oblong or oblong-elliptic blades with equilateral base, not rough, lustrous on upper face, with 3(4) basal veins); fruiting peduncle 50-65 mm long (vs. fruiting peduncle 85-110 mm long), fruiting calyx 16 × 21 mm (vs. fruiting calyx 15 × 10-12 mm), and fruit ovoid-fusiform 25 × 18-20 mm (vs. fruit ellipsoid-fusiform 23-25 × 13-15 mm).

Árboles de 15-17 m de alto, troncos de 20-30 cm DAP; corteza externa del tronco y ramas principales, grisáceo-blanquecina, estriada y rugoso-tuberculada, corteza interna blanco-amarillenta que se oxida rápidamente a marrón-rojiza (**Figura 2A**); copa alta de apariencia rala y reducida. **Ramas** reclinadas tipo pagoda, las jóvenes de aspecto articulado. **Yemas** terminales cónicas, cortas, compactas, de 4-5 × 4 mm (**Figura 1B**), ápice de ramas y yemas densamente ferrugíneas, con indumento tuberculado-fasciculado corto, densamente dispuesto. **Hojas** organizadas de modo dístico y péndulo en las ramas; **estípulas** prontamente caducas, triangulares, de 3-4 mm de longitud, flocoso-ferrugíneas; **peciolos** de 15-20(25) mm de longitud con pulvínulo distal notorio, cilíndrico, de 6-8 × 3 mm; **láminas** verde intenso por la haz y verde oliva por el envés, muy coriáceas, ampliamente obovadas y de semilimbos moderadamente asimétricos, de 14-31(-35) × 10-21 cm, base ligeramente cordada, seno basal hasta de 1,5 cm, ápice acuminado, acumen de ca. 1-1,5 cm; margen entero, uniforme, haz de aspecto liso; con 5-6 **venas** basales;

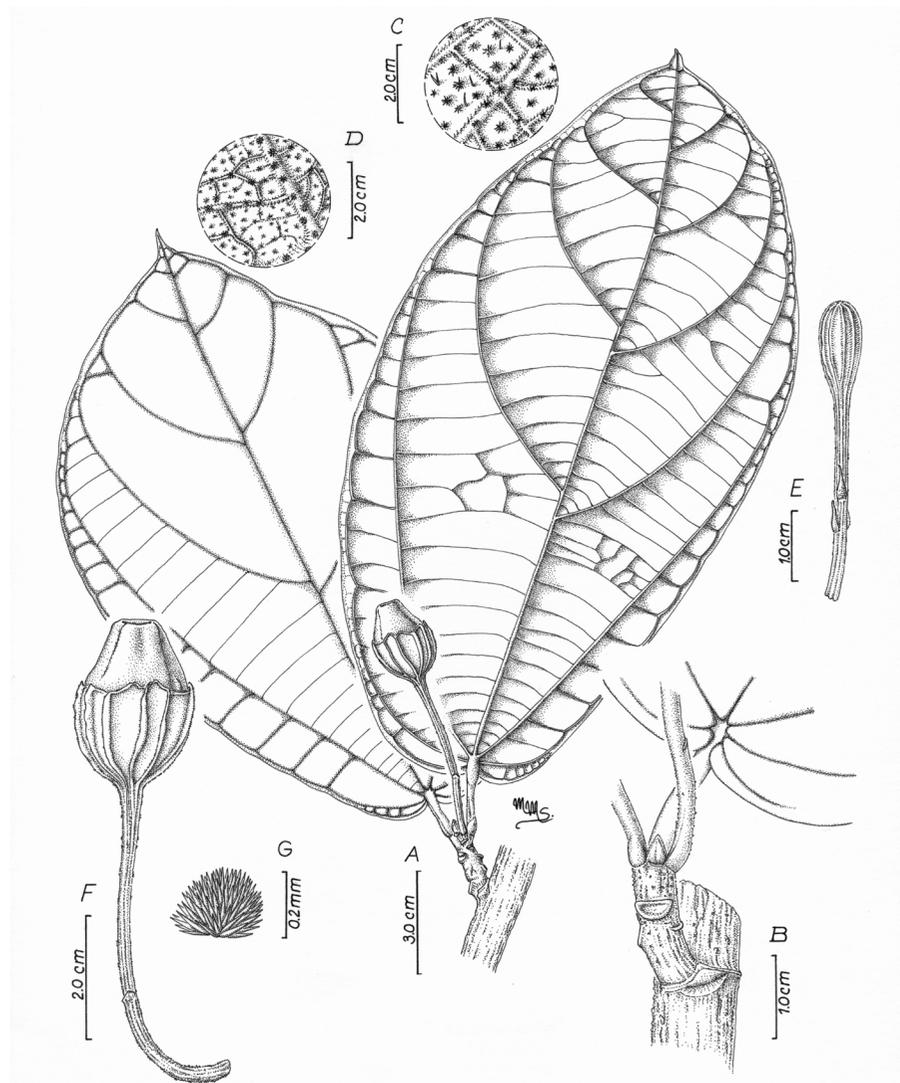


Figura 1. *Matisia genesiana* Fern.Alonso. **A.** Rama corta terminal. **B.** Yema terminal acompañada de peciolo y pedúnculo fructífero. **C., D.** Indumento tuberculado-fasciculado de la lámina en envés y haz, respectivamente. **E.** Botón floral y pedicelo con las bractéolas en la mitad inferior. **F.** Fruto. **G.** Detalle de un tricoma equinado-fasciculado. A.-F. [del holotipo, J.L. Fernández-Alonso & al. 8506]

la vena media y las 2 venas basales laterales de largo recorrido, cerrándose antes de la margen y con otras 2-3 venas basales adicionales, submarginales, más cortas, que se cierran (broquidódromas) con las venas terciarias que llegan a los márgenes; con 2-3(4) pares de venas secundarias que parten de la vena media, erecto-patentes, en la mitad distal de la lámina; con venas de tercer orden típicamente perpendiculares a las venas principales y paralelas entre sí; venas de cuarto y quinto orden, reticulado-poligonal, resaltadas en el envés e imperceptibles en la haz, con indumento tuberculado-fasciculado, en la haz y principalmente el envés, muy ásperas al tacto. **Flores** opuestas a las hojas, dispuestas en ramas cortas terminales; cuando están en **botón** floral, erectas en las ramas (**Figura 2C**), con **pedicelo** de 3-5 cm de longitud, con 3 bractéolas estrechamente triangulares entre la mitad y el tercio basal del pedicelo, de 3-7 × ca. 3 mm, con indumento corto, ferrugíneo oscuro, equinado-fasciculado; cáliz fusiforme en el botón floral de 11-13 × 5-6 mm, marrón ferrugíneo, con 10 alas o aristas longitudinales rectas, muy notorias. Flores en antesis no vistas. Fruto péndulo en las ramas. **Pedúnculo fructífero** de 50 a 65 mm

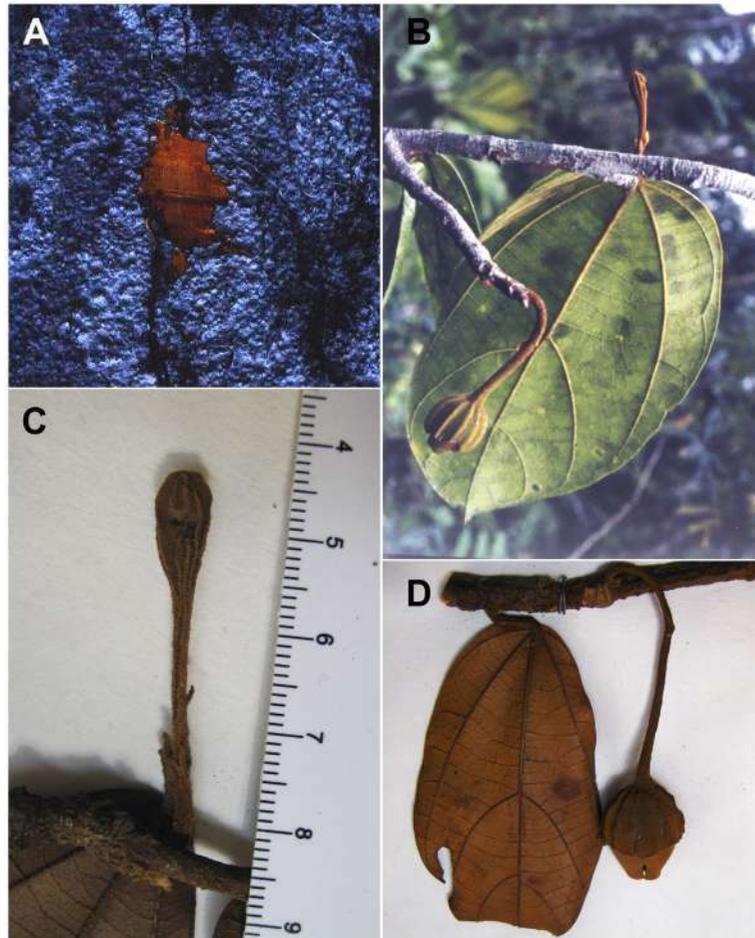


Figura 2. *Matisia genesiana* Fern.Alonso. Fotografías de la colección tipo J.L. Fernández & al. 8506. **A.** Detalle del tronco, con la corteza externa y la corteza interna que se oxida rápidamente y adquiere un color rojizo. **B.** Rama lateral en la que se observa la posición de los botones florales erectos y de las láminas y frutos péndulos. **C.** Detalle de un botón floral con bractéolas en la zona media del pedicelo. **D.** Rama con fruto péndulo. A.-D. [del holotipo, J.L. Fernández & al. 8506]

de longitud, de 2 mm de grosor en su zona media y ligeramente engrosado (3 mm) por debajo del cáliz, con indumento más o menos denso ferrugíneo, equinado-fasciculado. **Cáliz fructífero** cupuliforme de 16 × 21 mm, con 10 alas rectas muy notorias de ca. 2 mm de alto y margen distal irregularmente lobado (**Figura 2B**). **Fruto** propiamente dicho ovoide-fusiforame, truncado depresso en la parte distal, de 25 mm de longitud y 18-20 mm de anchura en su zona media y de 6 mm en el ápice, recubierto por el cáliz hasta su zona media; **exocarpo** con indumento marrón oscuro, denso, estrellado-lepidoto, muy brillante; en la madurez con mesocarpo carnososo, pulposo; **pirenos** y semillas no vistas.

Etimología. El nombre de la especie conmemora al botánico y colega Ginés A. López González (1950-2024), investigador del Real Jardín Botánico-CSIC, quien trabajó en taxonomía de plantas vasculares principalmente de la región mediterránea; además, fue uno de los promotores y editores de la Flora Ibérica y uno de sus autores más relevantes (RJB, 2024; Morales & Devesa, 2024).

Distribución, hábitat y estado de conservación (IUCN). Solo conocida por la colección tipo, proveniente de zonas bajas del departamento del Chocó (**Figura 3**), donde crece en el bosque pluvial tropical, no inundable, sobre suelos rojos. Aparentemente crece asociada a ambientes iluminados de borde de bosque en zonas bajas del Chocó central.



Figura 3. Mapa de distribución de las tres nuevas especies de *Matisia* descritas en Colombia (*M. genesiana*, *M. mutata* y *M. rufula*)

No se cuenta con información precisa sobre posibles amenazas a las que se halla expuesta esta especie en su única localidad conocida desde 1990, cuando fue recolectada. Pudiera evaluarse de forma preliminar bajo datos insuficientes (DD).

Fenología. Ha sido recolectada tanto con botones florales como con frutos maduros en diciembre.

Notas taxonómicas. Dentro de la Sección *Longipedes* Fern.Alonso, a la que se adscribe esta especie, consideramos a *Matisia genesiana* como especie afín a *M. sclerophylla*, de la que difiere principalmente por los caracteres del indumento, la forma, venación y textura de las láminas, la longitud del pedúnculo fructífero, la anchura del cáliz fructífero y la forma y tamaño del fruto indicados en la diagnosis. En menor medida, se asemeja también a *M. victoriana* Fern.Alonso, especie de mayor porte (25-35 m) que presenta hojas con láminas cartáceas o subcoriáceas con 7-9 venas basales y calices fructíferos con solo 3-4 venas longitudinales poco marcadas.

2. *Matisia petaquillae* Fern.Alonso & Camp.-Pineda, **sp. nov.** (Figuras 4-6)

TIPO: PANAMÁ. Provincia de Coclé. Distrito de La Pintada; límites entre el Distrito de La Pintada (Coclé) y el Distrito de Donoso (Colón), después de la antigua planta de procesamiento de la mina Petaquilla Gold, al oeste del río Molejones, terreno arcilloso en pendientes de 50-60 %, 8°49'N 80°39'O, 162 m, árbol ca. 30 m, (fr), 5 jun 2024, E. Campos-Pineda 1458 & J. Sumich, J. Valdés, B. Fuentes (holotipo PMA, isotipos SCZ 20301/cb:20267, MA).

Diagnosis. Similar to *Matisia anchicayana* Fern.Alonso, but it can be well differentiated from *M. anchicayana* because the species described here have yellow-orange inner bark (vs. pinkish inner bark in *M.anchicayana*); terminal buds with light brown (Figura 4B), equinate-fasciculate indumentum (vs. blackish, stellate-fasciculate indumentum); laminae membranous-chartaceous, oblanceolate to obovate, with 5 basal veins (vs. leaves cartaceous or subcoriaceous, obovate to narrowly obovate, with 6-8 basal

veins), veins on the underside of leaf blade with fasciculate-floccose indumentum (**Figura 4D**), (vs. stellate-fasciculate indumentum); floral pedicel 6-7 cm long (vs. 7-11 cm long); calyx with 7-10 longitudinal wings, sinuous and very prominent in the distal zone, 4-5 mm high (vs. calyx with 10 acute, non-sinuous wings ca. 1,5 mm high); fruiting calyx covering only half of the fruit, (vs. calyx covering the basal 2/3 of the fruit).

Árboles hasta de 12-20(-30) m, con troncos más o menos cilíndricos y sin contrafuertes basales apreciables; ramificación de aspecto verticilado. **Tronco** y ramas principales con corteza externa rugosa, blanco-grisácea, moteada y corteza interna amarillo-anaranjado (**Figuras 6A, B**); ramas terminales cilíndricas, marrón claro (en vivo); en seco, marrón-rojizas, estriadas longitudinalmente y con lenticelas discoides blanquecinas, muy conspicuas; en las zonas distales de las ramas con indumento equinado-fasciculado, fino. **Yemas** terminales anchamente cónicas u ovoide-cónicas, compactas, de 4-7 × 4-5 mm, similares en achura al diámetro de las ramas, y acompañadas de las cicatrices estipulares, con catafilos adpresos, con indumento fino de marrón claro a ferrugíneo, igualmente finamente equinado-fasciculado. **Hojas** dísticas en las ramas, con estipulas inconspicuas, ferrugíneas, prontamente caducas; **pecíolos** de 15-20(-25) mm × (1-)1,5-2 mm; en hojas jóvenes hasta

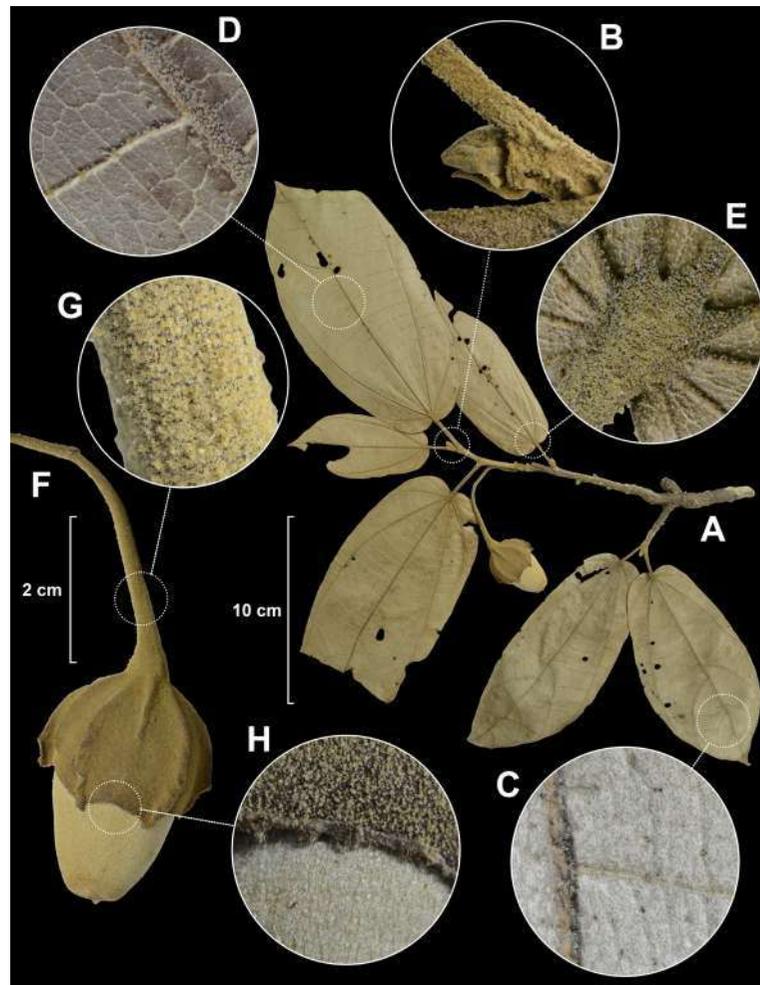


Figura 4. *Matisia petaquillae* Fern.Alonso & Camp.-Pineda. **A.** Rama con fruto. **B.** Ápice de una rama con la yema terminal. **C.** Detalle del indumento disperso por la haz. **D.** Detalle del indumento disperso por el envés. **E.** Detalle del indumento disperso en la base de la lámina por el envés. **F.** Detalle del fruto. **G.** Indumento del pedúnculo fructífero. **H.** Indumento de la cara externa del cáliz fructífero y del exocarpo. A.-H. [del holotipo *E. Campos-Pineda 1458* (PMA)]

de 25-35 mm × 2-2,5 mm; con indumento equinado-fasciculado poco conspicuo; con dos pulvínulos, en vivo muy turgentes, el proximal poco visible, de 4-5 × 3-4 mm, el distal cilíndrico, muy conspicuo, de 6-8 × 3 mm, ubicado en la parte del peciolo que rebasa la base del limbo; **láminas** discoloras, verde oscuro y lustrosas por la haz y verde pálido y sin brillo por el envés, en seco marrón verdoso por el envés; gruesa y levemente bulladas, ligeramente ásperas en la haz, cartáceas o subcoriáceas en la madurez, oblanceoladas u obovadas, de 10-18(-24) × 5-7,5(-8,5) cm, en hojas de plantas jóvenes hasta 32-40 × 15-18 cm (*Campos-Pineda 1459*); base simétrica, cordado-auriculada, con senos basales de 7-10 mm de longitud; en hojas jóvenes con senos más marcados, de 9-15 mm de longitud, que se solapan ligeramente entre ellos sobre el pulvínulo del peciolo; ápice agudo o a veces acuminado, con acumen de 10 × 7 mm, margen entero y no recurvado; **venas** primarias, generalmente 5, y 2 más submarginales de corto recorrido; en hojas jóvenes hasta 5-8 venas basales y dos más submarginales, excavado-impresas por la haz y resaltadas por el envés; con 3-4 venas secundarias a cada lado de la vena media, ubicadas solo en el tercio distal; venación de tercer orden paralela y perpendicular a las venas primarias y

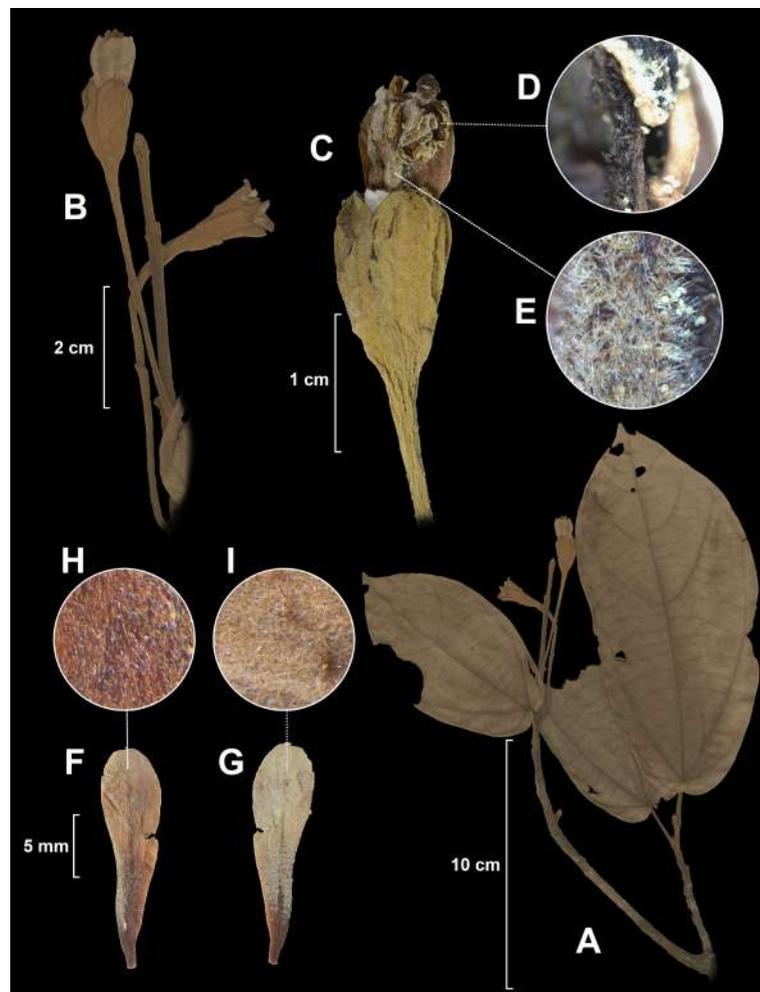


Figura 5. *Matisia petaquillae* Fern.Alonso & Camp.-Pineda. **A.** Rama con flores. **B.** Detalle de las flores. **C.** Detalle de la parte superior de la flor con los pétalos removidos en que se ve la disposición del androceo. **D.** Detalle de la parte superior de una rama estaminal con algunas anteras. **E.** Detalle de los tricomas de la columna estaminal. **F.** Superficie interna del pétalo. **G.** Superficie externa del pétalo. **H.** Indumento de la cara interna del pétalo. **I.** Indumento de la cara externa del pétalo. A.-I. [*Araúz 1835* (PMA)]

secundarias; venas de cuarto, quinto y sexto orden reticuladas, bien resaltadas también por el envés; haz glabrescente, ligeramente áspero, con indumento disperso oscuro, de aspecto moteado, estrellado-fasciculado (**Figura 4C**); envés con indumento blanquecino equinado-fasciculado corto y disperso sobre la lámina y las venas e indumento fasciculado-floccoso, amarillo azufrado, disperso sobre lámina y venas. Zonas floríferas localizadas al final de las ramas. **Flores** erectas, **pedicelo** de 5,9-7 cm de longitud x 2 mm de grosor y hasta 2,5 mm de grosor en la zona distal; con bractéolas o sus cicatrices de abscisión ubicadas en la mitad distal, prontamente caducas (no vistas); con indumento ferrugíneo estrellado-fasciculado; **cáliz** floral verde en fresco, estrechamente ovoide-acampanado, de 15 x 7-8 mm, con 4-6 lóbulos distales, triangulares, de 2,5-3 x 3 mm, con costillas (7-10) o aristas longitudinales, poco resaltadas (**Figura 5C**), con indumento marrón amarillento, estrellado-fasciculado en la cara externa e indumento blanquecino, corto, seríceo, adpreso en la cara interna; **corola** con pétalos blancos, anchamente espatulados, obtusos, erectos al inicio de la antesis, de 20-24 mm x 4-6 mm en la parte distal, externamente con indumento denso, blanquecino estrellado (**Figura 5G**), internamente glabrescente, con

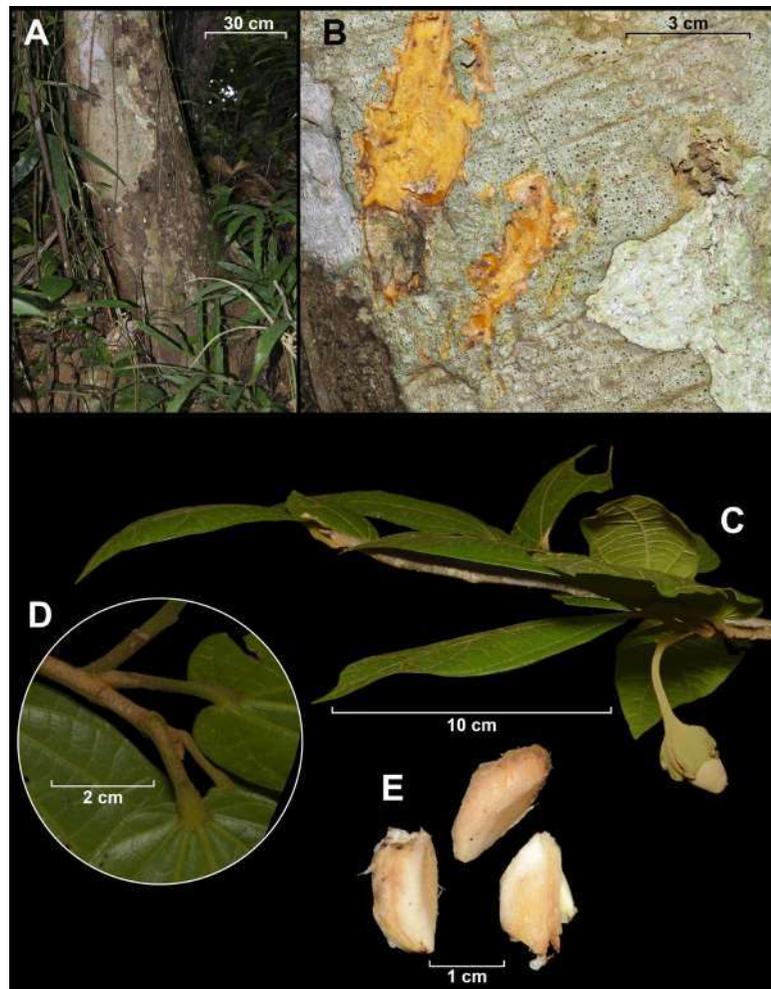


Figura 6. *Matisia petaquillae* Fern. Alonso & Camp.-Pineda Fotos en campo. **A.** Base del tronco sin contrafuertes. **B.** Detalle de la corteza externa y de la corteza interna originalmente blanca, que se oxida y adquiere un color naranja. **C.** Rama terminal en que se ve la disposición dística de las hojas y los frutos péndulos. **D.** Rama distal con la yema terminal, cicatrices estipulares y los pulvínulos proximal y distal de los pecíolos vistos desde el envés. **E.** Pirenos acompañados del mesocarpo pulposo-mucilaginoso. A.-E. [De la colección tipo *E. Campos-Pineda 1458*]

pelos esparcidos simples, muy finos; **androceo** con columna estaminal blanquecina de ca. 14 mm × 1 mm, con indumento estrellado blanquecino, densamente dispuesto (**Figura 5E**) y ramas estaminales suberectas o erecto-patentes, glabrescentes, con escasos pelos glandulares gruesos, con 25-30 tecas repartidas en las cinco ramas estaminales; **gineceo** con estilo blanquecino de ca. 21-23 mm de largo y estigma subcapitado. **Pedúnculo fructífero** arqueado, péndulo (**Figura 6C**), de 5,9-7,0 cm × 1-2,5 mm, alcanzado los 4-5 mm en la parte distal; con cicatrices de las bractéolas en posición media a 2,8-3,3 cm de la base, con indumento fasciculado-flocoso muy fino. **Cáliz fructífero** verde, acrescente, estrechamente cupular, de 25 × 30-32 mm, recubriendo más o menos la mitad del fruto; margen distal sinuoso y con 5-7 apículos de ca. 1-2 mm; con 6-9 alas longitudinales, cinco más desarrolladas y elevadas que las otras 1-3, sinuosas y hasta de 4-5 mm de alto en la mitad o el tercio distal; con indumento externo uniforme y muy fino, equinado-fasciculado. **Fruto** crema pálido, liso, estrechamente ovoide a elipsoide, de 30-32 × 16-22 mm, plano achatado distalmente con un pequeño mucrón de 1 mm, con indumento muy fino lepidoto o equinado-lepidoto, **pirenos** fusiformes (**Figura 6E**), redondeados en la parte inferior y agudos distalmente, ligeramente comprimidos lateralmente, de 1,6-1,8 × 0,7-0,8 cm, con la cara interna lustrosa marrón. **Semilla** no observada.

Etimología. El nombre hace referencia al topónimo de la región donde fueron recolectadas las muestras, que corresponde a la mina Petaquilla, en límites entre las provincias panameñas de Coclé y Colón.

Distribución, hábitat y estado de conservación (UICN). Solo conocida en la localidad tipo en la concesión minera de Petaquilla (**Figura 7**), en la zona limítrofe de los distritos de Donoso (Colón) y La Pintada (Coclé). Esta especie propia del bosque húmedo de zonas bajas, ubicado en pendientes pronunciadas, sobre suelos arcillosos, entre los 150 y 250 m de altitud. Según la información recabada recientemente, *M. petaquillae* solo se conoce en la pequeña población de la localidad tipo. Debido a que presenta una extensión

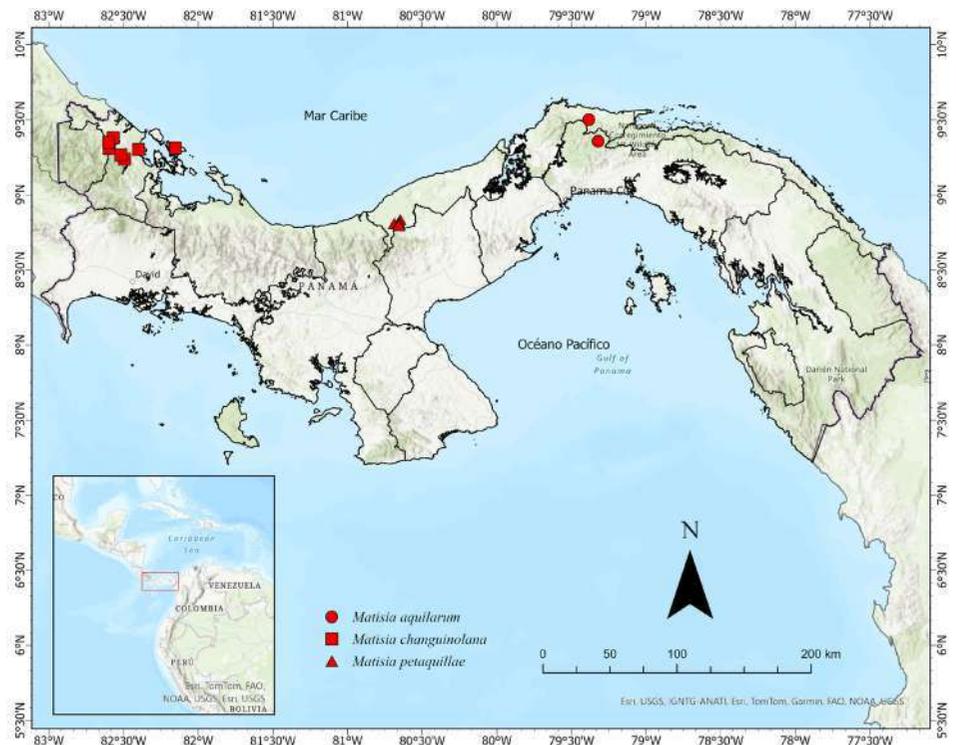


Figura 7. Mapa de distribución de las tres nuevas especies de *Matisia* descritas en Panamá (*M. aquilarum*, *M. changuinolana* y *M. petaquillae*)

de presencia (EOO) de 8,2 km² y un área de ocupación (AOO) de 16 km² y que, además, esta zona está intervenida y explotada para minería, esta especie puede ser evaluada como en peligro crítico CR B1ab(i,ii,iii,iv)+2ab(i,ii,iii,iv).

Fenología. Los registros conocidos con flor o con fruto corresponden todos al mes de junio.

Notas taxonómicas. Aparte de las diferencias con *M. anchicayana* ya comentadas en la diagnosis, presenta alguna similitud con *M. sclerophylla*, en algunos caracteres foliares y del pedicelo floral, pero a diferencia de la que se describe, *M. sclerophylla* presenta pecíolos más cortos y gruesos (9-17 × 3 mm), láminas llamativamente coriáceas con solo 5 venas basales, siendo 2 de ellas submarginales; cáliz floral mayor (20-25 mm de longitud), con 10 alas longitudinales uniformes poco elevadas y columna estaminal más larga (45-50 mm de longitud). *M. petaquillae* también presenta algunas semejanzas con *M. tinamastiana*, pero se diferencia bien de la que se describe porque es un árbol con pecíolos foliares más largos (20-35 mm), láminas foliares de estrecha a anchamente obovadas, pedicelos florales más cortos (24-30 mm) y frutos globosos, achatados, libres de cáliz, el cual se desprende totalmente.

Especímenes adicionales examinados (paratipos). PANAMÁ. **Provincia de Colón.** Distrito de Donoso, área del proyecto minero Petaquilla, Valle Grande, UTM E 534422, N 974318; árbol 12 m, (fl), 4 jun 2009, *B. Araúz & al. 1835* (PMA 79389/cb:78146); Distrito de Donoso, límites con el Distrito La Pintada (Coclé); después de la antigua planta de procesamiento de la mina Petaquilla Gold, al oeste del río Molejones, 8°48'N 80°39'O, 194 m, arbolito de 4,5 m, estéril, 5 jun 2024, *E. Campos-Pineda & al. 1459* (PMA); *ibidem*, Distrito de Donoso, proyecto minero concesión Petaquilla, Plot C003, 8°50'N 80°38'W, 184 m, árbol estéril, 18 sep 2007, *G.D. McPherson 19661* (MO 6284721/cb:2202053, PMA 67069/cb:65999); *ibidem*, Distrito de Donoso, límites con el Distrito La Pintada (Coclé); después de la antigua planta de procesamiento de la mina Petaquilla Gold, al oeste del río Molejones, 8°48'N 80°39'O, 188 m, suelos arcillosos, pendiente de 45-60 %, árbol 15 m con (fr), 5 jun 2024, *J. Sumich & al. 217* (PMA). **Provincia de Coclé.** Distrito de La Pintada. Límites entre el Distrito de La Pintada (Coclé) y el Distrito de Donoso (Colón); después de la antigua planta de procesamiento de la mina Petaquilla Gold, al oeste del río Molejones, terreno arcilloso en pendientes de 50-60 %, 8°49'N 80°39'O, 156 m, árbol ca. 15 m, estéril, 5 jun 2024, *E. Campos-Pineda & al. 1460* (MA, PMA, UCH); *ibidem*, 8°48'N 80°39'O, 142 m, árbol ca. 12 m, estéril, 5 jun 2024, *E. Campos-Pineda & al. 1461* (PMA, UCH).

3. *Matisia mutata* Fern.Alonso, sp. nov. (Figura 8)

TIPO: COLOMBIA. **Antioquia.** Municipio de Mutatá, río Bedó, margen izquierda antes de la confluencia con la vía Panamericana, 75 m, arbusto de 5 m, (fr), 8 nov 2009, *A. López A 7053 & L.T. Gaviria* (holotipo JAUM 50903(1/2), 50967(2/2); isotipo MA 964086-1, 964086-2).

Diagnosis. Species similar to *Matisia anchicayana* Fern.Alonso and to *M. changuinolana* Fern.Alonso & Camp.-Pineda -in this same work-, but it differs well because it has the following combination of characters: small trees of ca. 5 m, chartaceous leaves with broadly obovate blades, with 4-5 basal veins (**Figura 8D**) and floccose indumentum on the underside (**Figura 8F**); rigid, straight fruiting peduncle; fruiting calyx with 10 sinuous longitudinal wings, and covering the basal 2/3 of the fruit.

Arbusto o arbolito de 5 m. **Ramas** jóvenes terminales cilíndricas o subcilíndricas, marrón-grisáceas, de aspecto articulado, con entrenudos de 3,5-7 cm de longitud. **Yemas** terminales de las ramas cortas, lobulado globosas de 4-8 × 4-6 mm (**Figura 8C**), con catáfilos foliares y estipulares más estrechos, con indumento densamente tomentoso-floccoso. **Hojas** con **estípulas** lanceolado-apiculadas, de 8-10 × 3-4 mm (ancho en su base), prontamente caducas; **pecíolo** de 25-40 × 3-4 mm, con pulvínulo distal poco diferenciado, **láminas** obovado oblongas, de semilimbos desiguales, de 28-35(-40) × 14-17(-23) cm; base redonda o ligeramente cordada, con senos de 2 a 6 mm de longitud (profundidad),

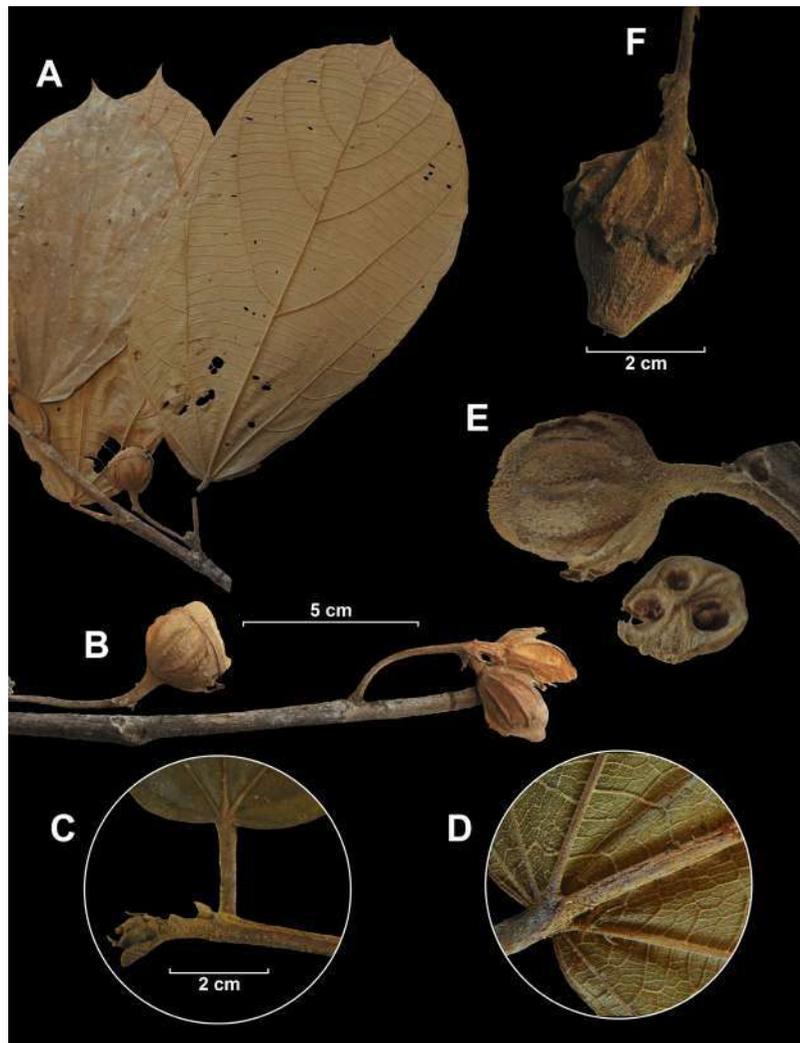


Figura 8. *Matisia mutata* Fern.Alonso **A.** Rama con frutos. **B.** Detalles de los frutos. **C.** Indumento de la yema terminal y del pecíolo. **D.** Indumento de la base de la lámina en el envés. **E.** Indumento del cáliz fructífero y fruto maduro en que se ven 3 pirenos desarrollados y dos abortados. **F.** Pedúnculo fructífero con las brácteolas persistentes, cáliz y fruto maduro. A.-F. [*N. López 7053*(JAUM, MA)]

ápice de contorno redondeado obtuso pero bruscamente rematado en un apículo de 15-20 de longitud \times 8-12 mm de ancho en su base, margen entero o muy levemente ondulado en la mitad distal, con 3 venas primarias basales y 2 más submarginales, impresas en la haz y en el envés muy resaltadas; vena media gruesa de ca. 2-3 mm en su base, con 4-5 venas secundarias a cada lado, ascendentes, ubicadas en la mitad superior de la lámina, resaltadas en el envés, venación de tercer orden perpendicular a las primarias y secundarias y distribuidas de forma paralela entre sí, visible por el envés, venación de cuarto y quinto orden estrechamente poligonal reticulada, solo marcada por el envés. Haz áspero de aspecto glabrescente, envés con indumento más o menos denso, finamente fasciculado-estrellado o equinado, más densamente dispuesto en las venas, pero también presente en la lámina. **Flores** no vistas. **Pedúnculo fructífero** opuesto a la hoja, de 5,3-6,5 cm de longitud, más o menos rígido y de 2-3 mm de grosor, con tres brácteolas persistentes ubicadas a distinto nivel en el tercio distal del pedicelo, separadas de la base del cáliz, dos de estas triangulares o estrechamente triangulares de 6-8 \times 2,5-3 mm y una tercera más larga, linear de 10-11 \times 2,5 mm; con indumento estrellado-fasciculado, marrón claro, de aspecto ferrugíneo.

Cáliz fructífero verde oliva (en vivo), cupular de 16-20 × 24-28 mm, recubriendo unos 2/3 del fruto, con 10 alas longitudinales finas y altas de ca. 3 mm de alto, generalmente sinuoso-rizadas, más pronunciadas en la parte distal a modo de dientes agudos, margen distal del cáliz irregularmente lobado-rasgado densamente cubierto de indumento marrón, fasciculado y finamente tuberculado. **Fruto** marrón claro (en vivo), ovoide, ligeramente pentagonal (en seco), apiculado-rostrado, de 28-30 × 21-23 mm truncado apicalmente, rostro cilíndrico de 4-5 × 4-5 mm, generalmente con un mucrón o aguja central de 2-3 mm, con exocarpo brillante, densamente estrellado-lepidoto, mesocarpo fibroso consistente, con cinco pirenos estrechamente ovoide-fusiformes (**Figura 8E**), de 22-24 × 10 mm, de sección anchamente obovada, con endocarpo de ca. 1 mm de grosor.

Etimología. El nombre de la especie hace referencia al municipio antioqueño de Mutatá, la localidad del tipo, en Colombia.

Distribución, hábitat y estado de conservación (UICN). Solo conocida en la localidad tipo en la subregion del Urabá antioqueño que limita con las estribaciones montañosas del Parque Nacional Natural Paramillo (**Figura 3**). No cuenta con datos de campo recientes ni con información sobre amenazas plausibles, por lo que es evaluada de forma preliminar como DD (datos insuficientes).

Fenología. Sólo conocida con frutos en noviembre.

Notas taxonómicas. Especie asignable a la sección *Longipedes* que presenta alguna afinidad con *M. anchicayana* Fern.Alonso del Bajo Calima (Valle) y con *M. changuinolana*, del noreste de Panamá (Bocas de Toro), descrita en este mismo trabajo, especies con las que se compara en la diagnosis. Podemos caracterizar bien a esta especie porque se trata de arbolitos de escaso porte (ca. 5 m), con yemas terminales tomentoso-flocosas, hojas cartáceas, anchamente obovadas, con 4-5 venas basales, con indumento finamente fasciculado-estrellado o equinado en el envés, pedúnculo fructífero rígido y cáliz fructífero con 10 alas longitudinales sinuosas.

4. *Matisia changuinolana* Fern.Alonso & Camp.-Pineda, sp. nov. (**Figura 9**)

TIPO: PANAMÁ. **Bocas de Toro.** Camino a la quebrada Bonyic, antes de llegar a quebrada Carbón, 629 m, arbolito aprox 10 m, (fr), 17 mar 1994, D. Santamaría 1066 & B. Lara (holotipo PMA 43157/cb:11170); isotipos MA 594679-1, MA 594679-2.)

Diagnosis. Species belonging to section *Longipedes*, it resembles *Matisia mutataka* Fern.Alonso, but it can be well differentiated because the species described here are generally larger trees, 10-18 m (vs. 5 m in *M. mutataka*), with membranous, oblong or oblanceolate leaves, with three basal veins (**Figura 9B**) and glabrous on the underside (vs. leaves chartaceous, broadly obovate, with 4-5 basal veins and floccose indumentum on the underside); fruiting peduncle 30-35 mm long, arcuate-pendulous (**Figura 9A**), (vs. fruiting peduncle 50-65 mm long, straight and rigid); fruits with dark brown epicarp, covered by calyx 1/3 to 1/2 of its length (vs. fruits with greenish epicarp, covered by calyx 2/3 of its length).

Árboles de (8-)10-18 m, y de 20-35 cm DAP. **Ramas** terminales cilíndricas, rojizas o marrón-rojizas, con abundantes lenticelas. **Yemas** terminales estrechamente cónicas, a veces poco diferenciadas, hasta de 4-9 × 3-5 mm, o con algunos primordios foliares y estipulares estrechamente lanceolados o falcados (**Figura 9B**), densamente recubiertos de indumento fasciculado-tuberculado, muy corto, verde-amarillento. **Hojas** con **pecíolo** de 14-20 (-22) mm × 2 mm, con indumento fasciculado-equinado; con dos pulvínulos, el proximal poco diferenciado y el distal más visible (oscuro), cilíndrico, de 5-8 × 2 mm; **láminas** membranáceas, oblongas u oblanceoladas o anchamente obovadas, de 15-25(-30) × (7-)9-13 cm; base rara vez cuneada, más frecuentemente redonda o ligeramente cordada, con senos de 3-5 mm de longitud, ápice agudo o acuminado con acumen de 1 × 1 cm; con 3 venas basales prominentes por el envés y frecuentemente 2 más, muy poco conspicuas submarginales, con 3-4 venas de segundo orden a ambos lados de la vena media; venas de tercer orden paralelas y perpendiculares a las venas de primer y

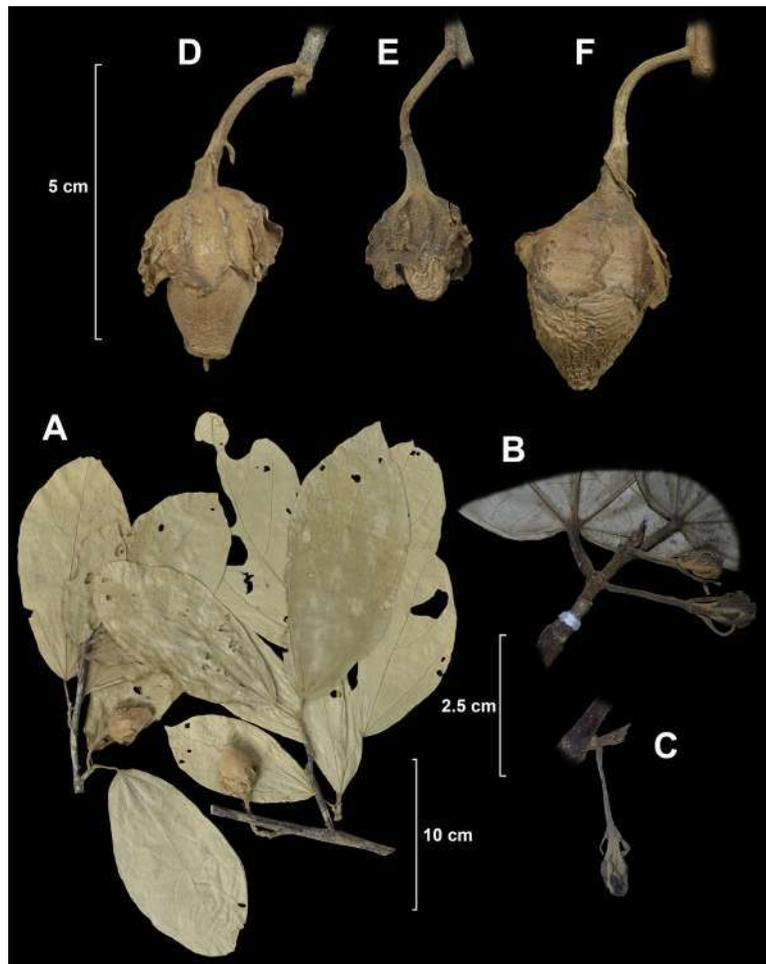


Figura 9. *Matisia changuinolana* Fern.Alonso & Camp.-Pineda **A.** Ramas cortas terminales con frutos péndulos. **B.** Ápice de la rama mostrando la yema terminal estrechamente cónica, la inserción y base de las láminas y las flores en botón opuestas a las hojas. **C.** Botón floral en que se ven bractéolas linear subuladas y las alas longitudinales sinuosas. **D.** Pedúnculo fructífero con bractéolas persistentes en el tercio distal, cáliz fructífero acrescente y fruto inmaduro. **E.** Fruto joven y cáliz acrescente cupulado con 10 alas longitudinales. **F.** Fruto maduro ovoide-fusiforme, truncado apicalmente. A., D. [*Santamaria 1066* (PMA)]; B., C. [*Martinez 1814* (PMA)]; E., [*De Sedas 1562* (PMA)]; F., [*De Sedas 1510* (PMA)]

segundo orden; haz glabrescente, con escasos pelos fasciculados en las venas principales; envés glabrescente, pero con indumento fasciculado-equinado conspicuo en las venas principales. **Flores** opuestas a las hojas, al final de las ramas; **botones florales** verde-claro, con pedicelo joven delgado de 20-25 × 1-2 mm, con tres bractéolas dispuestas en el tercio distal del pedicelo (**Figuras 9B, C**); bractéolas gráciles, linear-lanceoladas o linear subuladas, incurvas, de 6-10 × 1,5 mm en su zona media; **cáliz** verde en el botón, de contorno ovoide, de 12-14 × 6-8 mm, con 5 alas grandes y ligeramente sinuosas (de 2-2,5 mm alto) intercaladas con 5 más cortas y bajas (de ca. 1 mm alto), indumento externo amarillento (en seco), finamente fasciculado-equinado. Flores en antesis no vistas. **Pedúnculo fructífero** arqueado, de 30-35 mm de longitud, × 2-3 mm grosor con al menos parte de las bractéolas persistentes (en la zona media o en el tercio distal), (**Figuras 9D, E**) con indumento conspicuo marrón, estrellado-equinado. **Cáliz fructífero** cupular, marrón oscuro, recubriendo de 1/3 a la mitad del fruto, de 15-17 × 28-30(-33) mm, distalmente lobulado con lóbulos anchamente triangulares y con algunas prolongaciones de las alas, las

10 alas longitudinales, llamativamente sinuoso-rizadas, elevadas 2-3 mm; con indumento muy fino fasciculado-tuberculado. **Frutos** marrón-chocolate pálido, de 30 × 19-20(30) mm, de anchamente ovoideo u ovoide-globoso y achatado o rostrado, generalmente terminado en un pico más estrecho de 5 × 5 mm (**Figura 9D**); más raramente, fruto maduro subgloboso; **exocarpo** estriado longitudinalmente, con indumento equinado adpreso muy fino o equinado-lepidioto, mesocarpo fibroso carnosos, con cinco pirenos fusiformes, comprimidos lateralmente de ca. 15-18 mm de longitud. Semillas no vistas.

Etimología. El nombre de la especie hace referencia al distrito de Changuinola, provincia de Bocas de Toro, región de bosque tropical de zonas bajas donde crece esta especie.

Distribución, hábitat y estado de conservación (UICN). Solo conocida en la región de Bocas de Toro en Panamá por debajo de los 700 m, en ambientes de bosque conservado o bosque secundario, al parecer asociado a quebradas y riachuelos. Se trata de una especie endémica con distribución restringida (**Figura 7**). Con una extensión de presencia (EOO) de 400,6 km² y un área de ocupación calculada de (AOO) de 28 km², esta especie puede ser evaluada según los criterios de la UICN como en peligro EN B1ab(iv)+2ab(iv).

Fenología. Observado en flor en septiembre y con frutos en febrero-marzo, julio, octubre y noviembre.

Nombres comunes y usos. En Charagré, Bocas de Toro, se ha señalado el uso de los frutos maduros de este árbol para mezclar con ciertas bebidas (*Cáceres 1960*).

Notas taxonómicas. Especie claramente adscrita a la sección *Longipedes*, que presenta afinidad cercana con la especie colombiana *Matisia mutataka* Fern.Alonso, propia de la región de Urabá, en el noroeste de Antioquia. Las diferencias entre las dos especies referidas al porte, indumento de las yemas terminales, longitud de los peciolos, consistencia, forma, venación e indumento de las láminas, longitud y orientación de los pedúnculos fructíferos y características del cáliz fructífero, se mencionan detalladamente en la diagnosis.

Especímenes adicionales examinados (paratipos). PANAMÁ. **Bocas de Toro.** Charagré, río Teribe, 108 m; árbol de 8 m, (fr), 29 oct 2004, *D. Cáceres 1960* (UCH 5738); *ibidem*, Proyecto Changuinola 1, sitio de Presa, campamento del Instituto de Recursos Hidráulicos y Electrificación (IRHE), árbol de 10 m, (fr), 29 mar 1980, *L. Carrasquilla 1326 & R. Mendoza* (MO 533208/cb:533208; PMA 30829/cb 11169); Distrito de Changuinola. Área de Quebrada Bonyic, margen derecho de la quebrada, parcela, km 1 y 600m, 9°21'N82°36'W, árbol 15 m (fr), 15 feb 2013, *A. de Sedas & al. 1510* (PMA 105062); *ibidem*, Distrito de Changuinola, área de la quebrada Bonyic, margen derecho de la quebrada, parcela cola del embalse, 9°21'N82°36'W, árbol de 15 m (fr), 17 feb 2013, *A. de Sedas & al. 1562* (PMA 105062/cb:101183); *ibidem*, 9°21'N82°36'W, árbol de 10 m, frutos chocolates (fr), 10 mar 2014, *A. De Sedas & al. 1690* (PMA 116530/cb113593); *ibidem*, 9°21'N82°36'W, árbol de 15 m, frutos chocolates (fr), 20 jul 2014, *A. De Sedas & al. 1881* (PMA 116275/cb113595); *ibidem*, municipio de Almirante, 100 m, árbol de 18 m, (fr), 29 nov 1971, *E.A. Lao & A. Gentry 446* (MO 2106094/cb:533216, PMA 7108/cb11168); *ibidem*, distrito de Changuinola, proyecto hidroeléctrico CHAN 1, quebrada Boca Chica, bosque secundario dentro de la concesión de AES Changuinola, 9°15'N-82°31'O, árbol 456, 12 m, (fl), 11 sep 2015, *L. Martínez & al. 1814* (PMA 115137/cb.113604); *ibidem*, Parque Nacional Marino, Isla Bastimentos, camino a La Laguna, entrando por la casa del Sr. Elinton, 9°18'N-82°9'O, sin fecha, árbol de 15 m, (fr), *A. Zapata & al. 1263* (PMA 82350/cb:82375).

Clave para la separación de *Matisia changuinolana* y *M. mutataka*

1—Árboles de 8-18 m, hojas membranáceas, glabras, con 3 venas basales principales, pedúnculo fructífero de 30-35 mm de longitud, arqueado y péndulo, fruto marrón oscuro (material vivo).....*M. changuinolana*

1'—Arbolitos de ca. 5 m, hojas cartáceas, con abundante indumento estrellado fino en el envés; con 4-5 venas basales principales, pedúnculo fructífero de 50-65 mm de longitud, recto y rígido, frutos verdosos (material vivo).....*M. mutataka*

5. *Matisia rufula* Fern.Alonso, sp. nov. (Figuras 10-12)

TIPO: COLOMBIA. Antioquia. Municipio de Anorí, corregimiento de Providencia, valle del río Anorí, entre Dos Bocas y Anorí, bosque primario de Buenos Aires, transición Bht y Bmht de montaña, 400-900 m, (fr), 12 sep 1973, *D. Soejarto 4316* (holotipo, HUA 94372, isotipos: COL 422818, MO 2427564/cb:1442836).

Diagnosis. *Matisia* section *Calyculatae* Fern.Alonso, similar to *Matisia idroboi* and *M. jefensis*, but unlike them, it presents terminal bud (Figuras 10C y 11A, B) cataphylls and stipules larger and spatulate or narrowly lanceolate, falcate, 8-15(-20) mm long; leaves with lanceolate to narrowly lanceolate laminae (three times as long as wide), membranaceous-characeous, characteristically reddish-brown dry (Figura 10A), floral pedicel shorter 3-5 mm long; fruit ovoid to fusiform-ovoid 30-34 × 18-22 mm.

Árboles de 10-20 m, con ramificación abundante verticilada, horizontal o reclinada; corteza fibrosa, con numerosas lenticelas en las ramas jóvenes. **Yemas** terminales generalmente amplias, ovoide-fusiformes, con catáfilos estipulares estrechamente lanceolados o espatulados, incurvo-falcados, de 8-15(-20) × 3-5 mm, con indumento marrón ferrugíneo, finamente estrellado-fasciculado. **Hojas** dísticas en las ramas; **estípulas** estrechamente lanceoladas, levemente estriadas longitudinalmente, de 9-13 × 3-4 mm, indumento estrellado corto, marrón claro; **peciolos** largos, de 1,8-3,0 cm de longitud y ca. 2-2,5 mm de ancho (Figura 11A); **láminas** lustrosas, de un marrón rojizo característico (en seco), membranoso-cartáceas, de lanceoladas a estrechamente lanceoladas (tres veces más largas que anchas), ligeramente asimétricas, de 19-32 × 5,5-9 cm, cuneado-redondeadas en la base y agudo-acuminadas en el ápice, acumen de 1,2-1,6 cm; con 5 venas basales, la central muy engrosada, y las 2 submarginales muy poco conspicuas; con 2-3 venas secundarias a cada lado de la vena media, ubicadas en la mitad superior de la lámina; venación impresa



Figura 10. *Matisia rufula* Fern.Alonso A. Rama con frutos. B. Detalles de los frutos. C. Detalle del peciolo, la yema terminal y de un fruto joven rodeado por el cáliz y el cáliz persistente. A.-C. [del holotipo *Soejarto 4316* (HUA)]

en haz y muy resaltada en el envés, láminas glabras por la haz y con indumento estrellado-equinado, diminuto, disperso por el envés. **Flores** generalmente dispuestas de 1-2 en ramas cortas axilares u opuestas a las hojas; **pedicelo** floral de 3-5 mm, con indumento ferrugíneo, fasciculado de aspecto granuloso; **bractéolas** 3, verticiladas (**Figuras 11C, D**) y parcialmente unidas en su base y en la base del cáliz, triangular auriculadas en su base y estrechamente triangulares en su zona media y distal, sinuosas, de 0,8-1,6 × 0,4-0,6 cm, muy conspicuas, sobrepasando en longitud al botón floral, persistentes y ligeramente acrescentes; **botón** floral de aspecto obcónico, amarillento, con 10 alas llamativamente sinuoso-rizadas; **cáliz** verdoso-marrón, campanulado, de 12-13 mm longitud y 8-10 mm de anchura en la zona distal, con 10 alas longitudinales, crespas, con indumento fasciculado-equinado corto; **corola** con pétalos blancos o raramente amarillentos, papiráceos, patente-recurvados en la anthesis, estrechamente espatulados, de 30-35 mm de longitud y 3 mm de ancho en su zona distal y 1,5 mm en su mitad basal, externamente con pelos estrellados de pocos radios, dispuestos de modo disperso; internamente glabros; **androceo** con columna estaminal blanca, de 27-30 mm de longitud y 1-1,5 mm de grosor, glabro; ramas estaminales de 10-12 mm de longitud, orientadas en una sola dirección; anteras amarillas, hasta 6 por

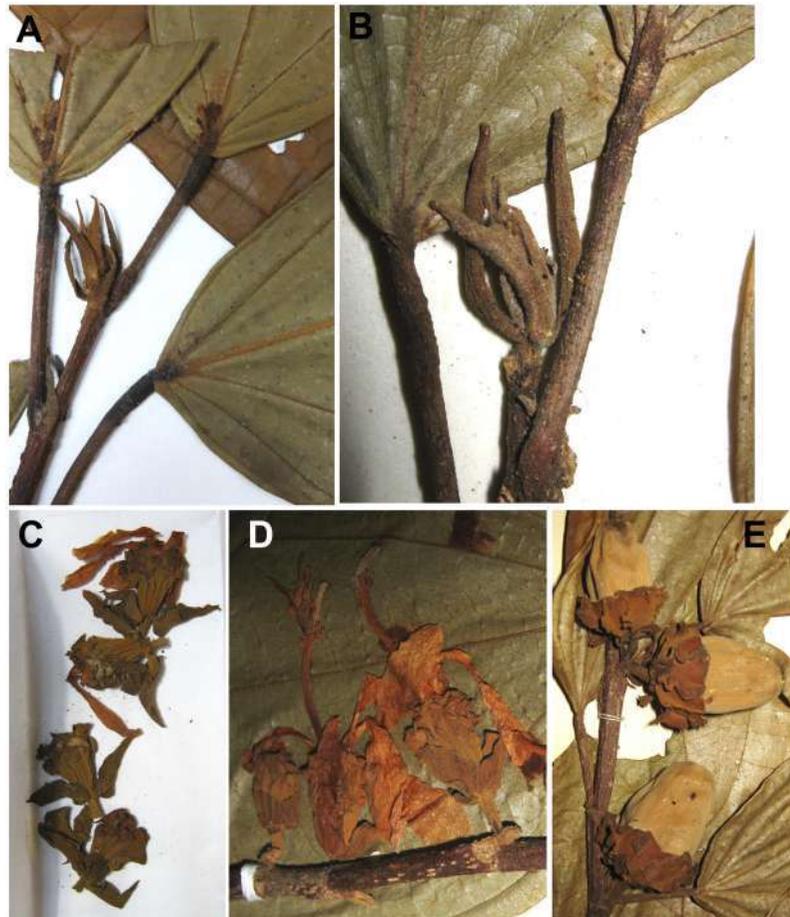


Figura 11. *Matisia rufula* Fern.Alonso **A., B.** Detalles de la base de las láminas, los peciolo con amplio pulvínulo, las estípulas y los catafilos de la yema terminal. **C.** Botones florales y flores (caídas) en que se ven el corto pedicelo y las bractéolas amplias del cáliz. **D.** Detalle de algunas flores abiertas en la rama, en vista lateral en que se ven los pétalos, la columna estaminal y el estilo. **E.** Detalle de los frutos maduros rodeados por el cáliz y el cáliz cupular persistente. **A.** [Roldan 3069 (HUA)]; **B.** [Soejarto 2800(HUA)]; **C.** [Gonzalez 2327(COL)]; **D.** [Callejas 4576(HUA)]; **E.** [Carmona 12(HUA)]

rama, muy alargadas, de ca. 3 mm de longitud; **estilo** de ca. 40 mm de longitud y 1 mm de anchura, alcanzando el mismo nivel de las ramas estaminales, densamente cubierto de indumento blanquecino, estrellado-tomentoso; estigma alargado, de la misma anchura del estilo. **Pedúnculo fructífero** de 3-7 mm de longitud, con bractéolas persistentes muy conspicuas (**Figuras 10B, C**), triangulares y unidas en su base, de $13-22 \times 6-9$ mm. **Cáliz fructífero** cupular, marrón oscuro en seco, de $25-30 \times 12-15$ mm, recubriendo en fruto generalmente $1/3$ a $1/2$ de su longitud, con 10 alas notorias sinuoso-corrugadas (**Figuras 11E, 12A, B**), de 2-3 mm alto. **Fruto** amarillo-marrón en vivo, estrechamente ovoide a fusiforme-ovoide, de $30-34(-37) \times 18-22$ mm, truncado en el ápice y con un pequeño mucrón central, agudo (**Figura 11E**); **exocarpo** marrón amarillento (en seco), con indumento muy fino, lepidoto-estrellado, adpreso y brillante; **mesocarpo** fibroso pulposo, marrón rojizo (en seco), con cinco pirenos fusiformes a estrechamente elipsoides (**Figura 12C**), de $16-19 \times 7-8$ mm, de sección oval, obtusos en el dorso y agudos en la zona ventral, comprimidos lateralmente y recubiertos de tejido fibroso sinuoso.

Etimología. El nombre de la especie hace referencia a la coloración rojiza característica (rufa) que adquieren las muestras secas de herbario.

Distribución, hábitat y estado de conservación (UICN). Especie propia de los bosques húmedos o muy húmedos tropicales de varias subregiones del departamento de Antioquia como el Bajo Cauca, el Magdalena Medio, el nordeste –vertiente oriental de la cordillera Central– y Urabá en límites con el Chocó. Crece en bosques primarios y secundarios húmedos o muy húmedos tropicales, entre 300 y 900 m en el Bajo Cauca, Magdalena Medio y también en la cuenca del Atrato en el Urabá antioqueño (**Figura 3**). Esta especie presenta una extensión de presencia (EOO) de 3.024 km² y un área de ocupación (AOO) de 44 km²; de acuerdo con este análisis, la especie puede evaluarse de forma preliminar como en peligro EN B1ab+2ab.

Fenología. Se conocen registros de floración en abril, julio y agosto y de plantas con frutos a lo largo del año entre febrero y noviembre.

Nombres comunes y usos. “Corcho” y “molinillo” (Zaragoza, Antioquia). En Antioquia, Vigía del Fuerte, la comunidad indígena Jarapeto consume sus frutos en toda la región según lo recogido en *J.A. Gómez 578* (HUA). En el municipio de Remedios, vereda La Cruz, los frutos de este árbol son consumidos por el tití gris (*Sequinus leucopus* Gunther), primate endémico de Colombia, según información de herbario [*García et al. 54* (HUA)].

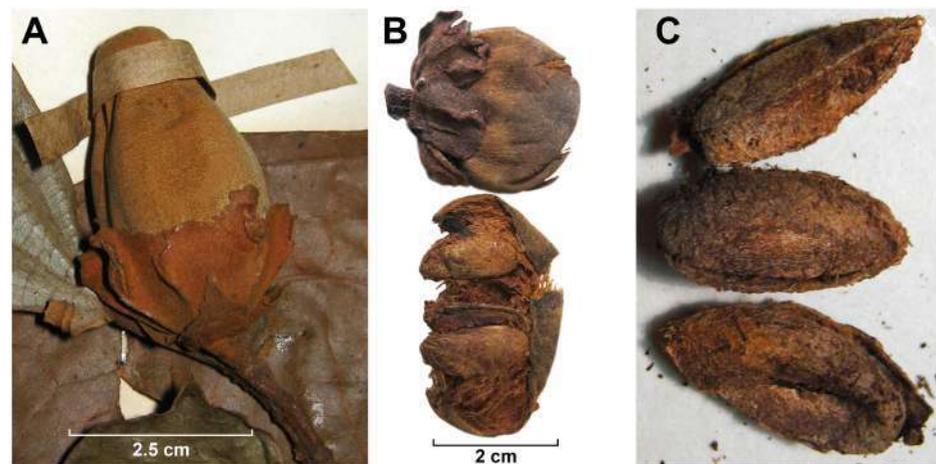


Figura 12. *Matisia rufula* Fern.Alonso **A.** Frutos maduros en las ramas en que se ven el corto pedúnculo fructífero y el cáliz que recubre sólo la parte inferior en el fruto. **B.** Fruto maduro en vista lateral y un fruto abierto en que se ven la posición y la textura de los pirenos y del mesocarpo fibroso-pulposo. **C.** Detalle de los pirenos fusiformes. A. [*Shepherd 662*(MEDEL)]; B. [*Alverson 170*(COL)]; C. [*Soejarto 2800*(COL)]

Notas taxonómicas. Dentro de la sección *Calyculatae* encontramos que la nueva especie sería afín a *Matisia jefensis* endémica de Panamá y también a *M. idroboi*, ampliamente distribuida en el norte de Suramérica, por presentar, al igual que ellas, 10 alas en el cáliz. No obstante, *M. rufula* puede separarse de ellas por presentar brácteas de la yema terminal y estípulas de mayor tamaño y con estrías longitudinales; hojas delgadas, membranosas-cartáceas, más alargadas, glabrescentes, lustrosas y rojizas al secar; pedicelos florales muy cortos con las tres bractéolas dispuestas en cálculo, muy grandes y alargadas, largamente triangulares, con las 10 alas longitudinales del cáliz, crespas, muy llamativas, de 2-3 mm de alto. Algunas plantas del noreste antioqueño, en el Bajo Cauca, suelen tener hojas más anchas, que tienden a ser obovadas y presentan flores amarillentas (*González 3227; Herrera-Palma 806*), sin embargo, todos los demás caracteres de estos especímenes coinciden con la variación observada en los caracteres de esta especie.

Especímenes adicionales examinados (paratipos). COLOMBIA. **Antioquia**, al suroriente de Zaragoza, Planta Providencia, bosque secundario entre la quebrada Tirana y Planta Providencia, 400-700 m, (fr), 9 mar 1977 *O. Alverson & al. 170* (COL 197109, HUA, MO 0169952); municipio de Zaragoza, Minguillo, 750 m, Bht a Bmht, “molinillo”, (fl), 29 ago 1967, *A. Arciria 73* (COL 508703, UDBC 05118); municipio de Anorí, vía Providencia a Toma de Algibes, a lo largo del río Anorí, rara, 7°18'N 7°08'O, 310 m, (fl), 12 jul 1987, *R. Callejas & al. 4576* (COL 353531, HUA 42784); *ibidem*, Puerto Valdivia, bosque secundario, árbol de 12 m, (fr), 22 nov 1975, *G.E. Carmona 9* (HUA 4579); cerca de Puerto Valdivia, 500 m, 12 oct 1975, *G.E. Carmona 12* (JAUM, MEDEL, HUA); municipio de El Bagre, finca La (fr) Sierrita, 6°00'N 74°36'O, 50 m, árbol de 10 m, estéril, mayo 2010, *O. Díaz & al. 167* (HUA 188824); municipio de Remedios, vereda La Cruz, fragmentos de bosque secundario, 6°54'N 74°34'O, 500-600 m, árbol de 30 cm de DAP, (fr), mar 2012, *Y. García & al. 54a* (HUA 192574); municipio de Vigía del Fuerte, río Jarapeto, comunidad indígena Jarapeto, 6° 35'N 76° 53'O, 18 m, árbol de 6 m, (fr), fruto comestible en la región, 27 jul 1992, *J.A. Gomez 578* (HUA92798); noreste antioqueño, serranía de San Lucas, municipio de El Bagre, vereda Malena, quebrada la Morena, 300 m, árbol 8 m, (fl), 6 ago 99, *C.E. González 2327* (COL 437441,437442, 470662, CAUP); municipio de Caucasia, vereda Caserí, finca La Natalia, remanente de bosque en zona con cultivo de caucho, 100 m, arbolito de 5 m, (fl), 27 abr 2024, *M. Herrera-Palma & al. 806* (HUA); municipio de Remedios, sitio La Calera, desviación Remedios-Zaragoza, 7°6'N 74°45'O, 900 m, árbol de 5 m, estéril, 17 dic 1997, *F.J. Roldan & al. 3069* (HUA 115729); Planta Providencia, al oeste de Zaragoza, 400-700 m, (fr), 9 mar 1977, *J. D. Sepherd 170* (HUA 6167); *ibidem*, valle del río Anorí, 400-700 m, árbol de 10 m, (fr), 8 nov 1976, *J. D. Sepherd 662* (COL 174980, HUA); municipio de Anorí, Providencia, camino en bosque primario, 500-700 m, árbol de 8 m, (fr), 12 feb 1971, *D.D. Soejarto 2800* (COL 157749, HUA 456); *ibidem*, Buenos Aires, bosque secundario, 400-700 m, árbol de 15 m, (fr), 20 oct 1972, *D.D. Soejarto 3404* (COL 126933, HUA 457); *ibidem*, sector Tirana, bosque primario, 400-700 m, árbol de 20 m, (fr), 24 oct 1972, *D.D. Soejarto 3475* (COL 134869, FAUC 5764; HUA 181688); municipio de Anorí, 400-900 m, (fr), 12 sep 1973, *D.D. Soejarto 4316* (COL 422818, HUA 94372); *ibidem*, corregimiento de Liberia, 7°21'N 75°01'O, 444 m, árbol de 12 m, estéril, 22 oct 2010, *A. Tabora 207 & L. Londoño* (HUA); municipio de Zaragoza, resguardo indígena Pablo Muera, 7°19'N 74°49'O, 255 m, árbol de 18,5 m, estéril, n.v.: corcho, 28 nov 2013, *D. Zapata 398* (HUA 062888).

6. *Matisia aquilarum* Fern.Alonso & Camp.-Pineda, sp. nov. (Figuras 13-14)

TIPO: PANAMÁ. Colón, río Saíno, 9°30'N 79°23'O, árboles muy grandes, (fr), 6 abr 2001, *K. Aparicio s.n. & R. Zambrano* (holotipo PMA 048098/cb:11149, isotipos BM 013824873, COL 464564).

Diagnosis. Similar to *Matisia rufula* Fern.Alonso from Colombia, from which it differs by *M. aquilarum* has linear, bud cataphylls and stipules, with long stellate indumentum -with 0,5-1 mm rays- (vs. stellate-fasciculate or fasciculate-equinuate indumentum, with very short rays, in *M. rufula*); narrowly oblanceolate leaf blades, 10-15 × 2.5-4.5 cm, not

lustrous, and slightly bullate (vs. lanceolate to narrowly lanceolate leaf blades, 19-32 × 5.5-9 cm, lustrous and not bullate); fruiting calyx with non- or slightly sinuous wings, more elevated in the distal half up to 3-4 mm high (vs. fruiting calyx with distinctly sinuous-corrugated, and evenly raised wings 2-3 mm high).

Árboles muy grandes, ca. 30 m. **Ramas** jóvenes cilíndricas, de 3-4 mm de diámetro, ramificadas, de aspecto rugoso y con indumento estrellado disperso; ramitas terminales de ca. 2 mm de diámetro, flexuosas, con indumento estrellado hirto, muy notorio (**Figura 14A**). **Yemas** terminales con indumento hirto (**Figuras 14A, C**), con 3-5 catáfilos estipulares lineares o linear-subulados, muy alargados y estrechos, de 9-13 mm de largo × 1-1,5 mm de ancho en su base, con indumento estrellado blanquecino, de radios largos (0,5-1mm). **Hojas** con **estípulas** tardíamente caducas o persistentes, largas y estrechas, linear-lanceoladas o linear subuladas, de 6-10(-13) × 1-1,5 mm, con indumento estrellado largo; hojas alternas, distribuidas de modo dístico en las ramitas, entrenudos cortos de 15-20 mm de longitud; **pecíolos** de 10-16(-20) mm de largo × 1,5-2 mm de grosor, con pulvínulo proximal cilíndrico de ca. 6 mm de longitud y pulvínulo distal más notorio de 6-7 × 2 mm dispuesto parcialmente sobre la base de la lámina, con indumento estrellado



Figura 13. Holotipo de *Matisia aquilarum* Fern.Alonso & Camp.-Pineda (fr.), [K. Aparicio s.n. (PMA 048098)]

uniforme; **láminas** marrones en seco, marrón oscuro en la haz y marrón más claro en el envés, membranoso-cartáceas, estrechamente oblanceoladas a estrechamente oblongas (**Figura 13**), de $10-15 \times 2,5-4,5$ cm, base simétrica, gradualmente cuneada (**Figura 14A**), estrechamente redondeada en la zona de unión al pecíolo; agudas en el ápice, generalmente apiculadas, con apículo llamativo de $5-16 \times 2-5$ mm; hojas de plantas jóvenes algo más largas, hasta de 18-20 cm y apículo muy desarrollado hasta de 18-22 mm; margen entero, ligeramente ondulado en la mitad distal; sin brillo y levemente bullada, con venación impresa en la haz y bulladas y ligeramente lustrosas en el envés; 3 venas basales de largo recorrido y a menudo una cuarta vena submarginal corta que se une a las venas secundarias que parten de las basales a ambos lados, impresas en la haz y muy prominentes en el envés, con indumento estrellado disperso en la mitad basal; vena media con 3(-4) venas secundarias a cada lado, distribuidas en la mitad distal de la lámina; venas de tercer orden perpendiculares a las primarias y paralelas entre sí, más o menos bulladas en el envés; venas de cuarto y quinto orden poligonales, imperceptibles en la haz y escasamente resaltadas en el envés. **Flores** dispuestas al final de las ramas cortas, opuestas a las hojas; no vistas en antesis. **Pedúnculo fructífero** corto, de $7-10 \times 1,5-2$ mm, cilíndrico, densamente cubierto de indumento estrellado largo, marrón-blanquecino (**Figura 14B, C**); bractéolas del cáliz verticiladas, persistentes, ubicadas en la base del cáliz, anchamente triangulares, incurvo-ascendentes y auriculadas en su base, solapándose ligeramente

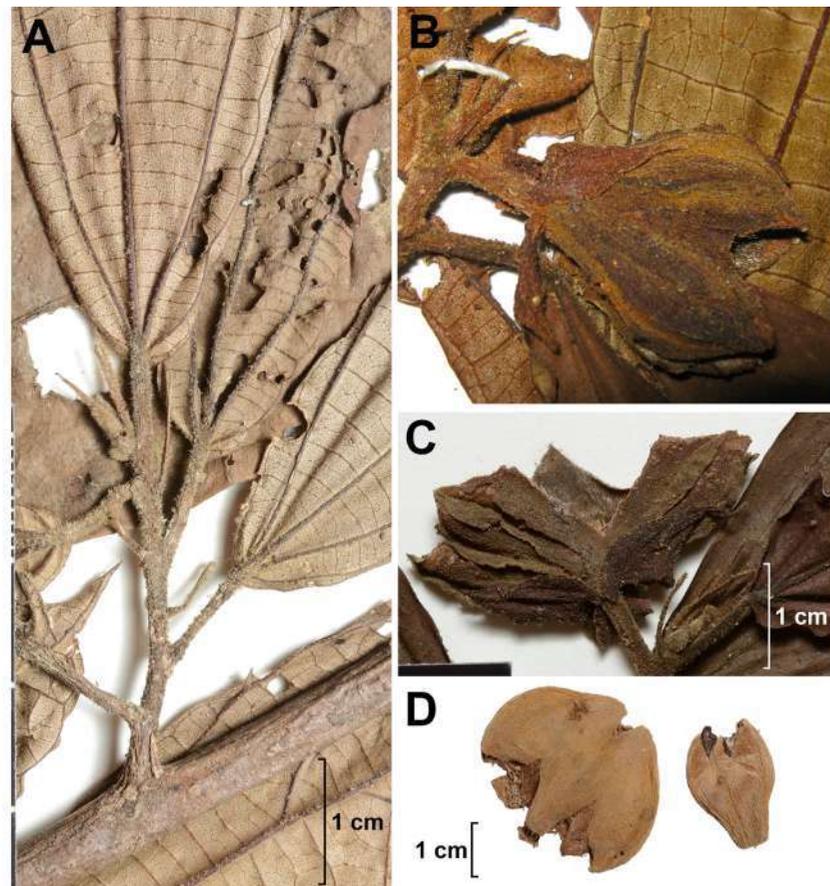


Figura 14. *Matisia aquilarum* Fern.Alonso & Camp.-Pineda **A.** Estípulas, yema terminal e indumento en las ramas jóvenes. **B., C.** Detalles de la yema terminal, las bractéolas en cáliz y las alas del cáliz fructífero. **D.** Aspecto del fruto maduro (vista lateral) en que se ven el indumento del exocarpo y la consistencia fibrosa del mesocarpo carnoso. **A., C.-D.** [del holotipo *K. Aparicio s.n.* (PMA 048098)]; **B.** [del isótipo (COL 464564)]

con las contiguas sin soldarse, de 14-16 × 5-7 mm, redondeado-auriculadas en la base y agudas y acuminadas en el ápice, con indumento disperso estrellado. **Cáliz fructífero** anchamente obcónico acampanado (**Figura 14B, C**), desigualmente 2-4 lobulado-rasgado en la parte distal, de 17-23 × 20-24(-28) mm, lóbulos distales de 4-8 × 7-10 mm; con diez alas presentes a lo largo, generalmente rectas o muy levemente sinuosas, notoriamente elevadas en la mitad distal, a modo de quilla rígida, recta, hasta de 3-4 mm de alto en el cáliz después de la antesis; externamente con indumento ferrugíneo, estrellado fino, densamente dispuesto e internamente con indumento seríceo adpreso, más largo. **Fruto** propiamente dicho marrón rojizo pálido (en seco), carnososo, ovoide a elipsoide, truncado en el ápice, de 21-24 × 18-20(-22) mm, rostro o pico apical de 5-7 × 5 mm, con un pequeño apículo o mucrón central (**Figura 14D**); **exocarpo** marrón rosado en seco, con indumento muy fino, equinado-lepidoto, liso; **mesocarpo** marrón rojizo en seco, pulposo, finamente fibroso y de aspecto algodonoso en seco, con cinco **pirenos** fusiformes elipsoides, de ca. 12-14 mm de longitud, con tejido fibroso adosado en su superficie. **Semillas** no vistas.

Etimología. El nombre hace referencia al uso de los grandes árboles de esta especie por las águilas harpías (*Harpia harpyja* L.) para instalar sus nidos, como aparece indicado en los datos de campo de *K.M. Aparicio* asociados al espécimen tipo. El Parque Nacional de Chagres estaría entre las localidades donde se verificó en campo la presencia de esta especie de águila en Panamá (*Aparicio & Candanedo, 1995; Candanedo et al., 2003*).

Distribución, hábitat y estado de conservación (UICN). Conocida en la localidad tipo, en el río Saino (Colón), y en una segunda localidad cercana en la Provincia de Panamá, en la confluencia de los ríos Chagres y Chagrecito (**Figura 7**). Con los datos conocidos, esta especie presenta un área de ocupación (AOO) de 4 km². En expediciones recientes se observó que esta región está siendo intervenida para la creación de potreros y cultivos de subsistencia, lo que representa una reducción en la extensión y calidad del hábitat donde crece esta especie. Por testimonios recogidos en la región sabemos que el árbol conspicuo de donde fue recolectado el material tipo murió por el impacto de un rayo hace unos 10 años (*K. Aparicio y R. Zambrano, com. pers.*). Por lo indicado, esta especie pudiera ser evaluada en primera instancia como vulnerable VU D2.

Fenología. Fructifica en el mes de abril.

Notas taxonómicas. Además de las diferencias entre *M. aquilarum* y *M. rufula* indicadas en la diagnosis y en la tabla (**Tabla 2**), la forma de las láminas estrechamente oblanceoladas a estrechamente oblongas y marcadamente acuminadas y el hecho de que

Tabla 2. Algunas diferencias morfológicas entre *Matisia rufula* y *M. aquilarum*

Carácter	Especie	
	<i>Matisia rufula</i>	<i>Matisia aquilarum</i>
Hábito	Árboles de 10–20 m	Árboles muy grandes ca. 30 m
Yemas, catafilos	Anchos (3-5 mm), estrechamente lanceolados y falcados	Estrechos (1-1,5 mm), lineares o linear-subulados
Yema, indumento	Fino, fasciculado	Estrellado, largo
Estípulas	Estrechamente lanceoladas	Lineares
Forma de lámina	Estrechamente lanceolado-elípticas	Estrechamente oblanceoladas
Tamaño de la lámina	19–32 × 5,5–9 cm	10–15 × 2,5–4,5 cm
Alas del cáliz (altura, sinuosidad).	Altura uniforme, muy sinuosas	Altura mayor en la mitad distal, no sinuosas
Cáliz fructífero/fruto	Recubre 1/3 a 1/2 del fruto	Recubre 1/2 o 2/3 del fruto
Fruto (forma, tamaño)	Estrechamente ovoide o fusiforme-ovoides, 30-37 x 18-22 mm	Ovoide a elipsoide 21-24 x 18-20 mm

también sean moderadamente bulladas, recuerda vegetativamente a la especie colombiana del Chocó central *M. valdes-bermejoi* Fern.Alonso, de la misma sección *Calyculatae*. No obstante, a diferencia de la que aquí se describe, esta última especie presenta hábito de arbolito del sotobosque de 5-15 m, hojas lanceoladas u oblongo-lanceoladas, pedicelos florales más cortos (3 mm) y cáliz externamente desprovisto de alas.

Especímenes adicionales examinados (paratipos). PANAMÁ. Panamá. Punto de unión entre el río Chagres y el Chagrecito, 400 m, arbolito de 3 m, estéril, mar 2002, *R. Pérez & al. s.n.* (SCZ3032/cb: 20269).

Clave para la identificación de las especies del género *Matisia* de Panamá.

1--Hojas con láminas cordadas en la base, con lóbulos o senos basales generalmente de (10-)20-40 mm de longitud (profundidad); venas basales, al menos 5-7; flores generalmente agrupadas en nodosidades en las ramas, raramente solitarias y opuestas a las hojas (*M. tinamastiana*) 2

1'--Hojas con láminas atenuadas, redondeadas o ligeramente cordadas en la base; con lóbulos o senos basales, cuando están presentes, usualmente menores de 10(-20) mm de longitud (profundidad); venas basales, generalmente 3-5, con venas laterales submarginales pequeñas; flores usualmente solitarias y opuestas a las hojas, raramente inflorescencias en las ramas o caulinares (*M. dolichosiphon*) 6

2--Flores solitarias o raramente en pares, distribuidas en las ramitas terminales o subterminales, generalmente opuestas a las hojas; cáliz caduco después de la antesis
..... *M. tinamastiana*

2'--Flores numerosas agrupadas en fascículos originados en nudos o callosidades en las ramas sin hojas, cáliz persistente y acrescente que acompaña generalmente al fruto 3

3--Lámina de la hoja fuertemente asimétrica, base desigual, con un seno o lóbulo mucho más desarrollado que el otro..... *M. obliquifolia*

3'--Lámina de la hoja simétrica o ligeramente asimétrica, base con ambos senos o lóbulos iguales o subiguales..... 4

4--Árboles pequeños, hasta de 10-12 m de altura, ramificados o no ramificados, lámina foliar ovado-oblonga a elíptica, de 55-100 × 25-50 cm, a menudo bullada; peciolo generalmente de 20-55 cm de largo..... *M. arteagensis*

4'--Árboles grandes, hasta de 30-40 m de altura, muy ramificados, lámina foliar orbicular, suborbicular, obcordada o ampliamente obovada, de 15-30 × 9-26 cm, lisa; peciolo generalmente de 5-20 (-25) cm de largo 5

5--Láminas foliares cordadas a orbiculares, base ampliamente cordada, seno basal de 15-65(-80) mm de profundidad desde la parte distal del peciolo, lámina con 5-7 venas basales en las hojas adultas, frutos de anchamente elipsoides a globosos *M. cordata*

5'--Láminas foliares en general ampliamente obovadas, más largas que anchas, base cordada con seno basal más corto, generalmente de 10-25 (-35) mm de profundidad, lámina con 5 venas basales en las hojas adultas, las 2 venas submarginales frecuentemente muy reducidas; frutos ovoides a ovoide-fusiforres *M. gentryi*

6--Pedicelo floral con 3 bractéolas distales, verticiladas o subverticiladas en la base del cáliz, bractéolas persistentes en el pedúnculo fructífero (sect. *Calyculatae*)..... 7

6'--Pedicelo floral sin bractéolas o con (2-)3 bractéolas distribuidas en la mitad distal del pedicelo (no verticiladas) y frecuentemente caducas en el pedúnculo fructífero 11

7--Pedicelo floral de al menos el doble de la longitud del cáliz; cáliz sin costillas longitudinales o raramente, con 3(-5) costillas ligeramente marcadas *M. sanblasensis*

7'--Pedicelo floral más corto que el cáliz o hasta de 1,5 veces la longitud del cáliz; cáliz con o sin costillas marcadas..... 8

8--Cáliz en flor y en el fruto sin costillas longitudinales o con solo 5 costillas marcadas..... 9

- 8'--Cáliz en flor y en el fruto con 10 costillas longitudinales marcadas 10
- 9--Bractéolas siempre verticiladas cerca de la base del cáliz, cáliz en flor y en el fruto sin costillas ni alas..... *M. exalata*
- 9'--Bractéolas verticiladas o subverticiladas (1 ligeramente por debajo de la base del cáliz), cáliz en flor y en el fruto con 5 alas evidentes *M. pacifica*
- 10--Hojas cartáceas o subcoriáceas, superficie abaxial escábrida, cáliz en el fruto cubriendo menos de la mitad de su extensión, con alas rígidas y sinuosas; frutos elipsoides o estrechamente ovoides, de 40-55 × 20-30 mm*M. jefensis*
- 10'--Hojas membranáceas o subcartáceas, superficie abaxial glabrescente, cáliz en el fruto cubriendo la mitad o más de la mitad de su extensión, con alas no sinuosas o ligeramente sinuosas; frutos ovoides a elipsoides, de 25-35 × 20-25 mm*M. aquilarum*
- 11--Cáliz floral con 10 alas longitudinales. (sect..*Longipedes*).....12
- 11'--Cáliz floral sin alas (sect..*Castano*).....13
- 12--Hojas cartáceas o subcoriáceas; láminas foliares oblanceoladas u obovadas, base foliar con senos marcados de 7-15 mm de longitud; pedúnculo fructífero de 5,9-7,0 cm, con bractéolas persistentes en posición media, fruto ovoide a elipsoide recubierto hasta la mitad por el cáliz fructífero.*M. petaquillae*
- 12'--Hojas membranosas, láminas foliares anchamente obovadas, base sin senos basales o con senos hasta de 3-5 mm de longitud; pedúnculo fructífero de 3,0-3,5 cm, con bractéolas en la mitad o tercio distal, fruto anchamente ovoide a globoso recubierto en 1/3 a 1/2 de su longitud por el cáliz fructífero.*M. changuinolana*
- 13--Inflorescencias caulifloras o ramifloras, flores agrupadas en inflorescencias racemosas o paniculadas, pedicelo floral ebracteolado..... *M. dolichosiphon*
- 13'—Flores generalmente solitarias, opuestas a las hojas, pedicelo con o sin bractéolas.....14
- 14--Pedicelo floral generalmente con indumento amarillento, con bractéolas; fruto ovoide, sin surcos ni lóbulos longitudinales; cáliz fructífero ceñido al fruto.....
.....*M. ochrocalyx*
- 14'--Pedicelo floral generalmente con indumento marrón oscuro, sin bractéolas; fruto oblato, comprimido en la parte superior y fuertemente 5-lobado-surcado cuando está seco; cáliz fructífero ligeramente recurvado y lobado, a modo de corona, no ceñido a la superficie del fruto..... *M. dolichopoda*

Agradecimientos

El primer autor agradece a la Agencia Española de Cooperación -AECID y a su coordinador en Colombia, Pablo J. Sevilla, por el apoyo recibido para la expedición de recolección al departamento del Chocó, llevada a cabo en diciembre de 1990 con la colaboración de los colegas M. Velayos (MA), E. Rico (SALA) y F. García (CHOCO) del Herbario CHOCÓ de la U. Tecnológica del Chocó. La revisión de otros materiales del género *Matisia* llevados a cabo por el primer autor en las últimas dos décadas en diferentes herbarios de Colombia y Panamá (CR, COL, HUA, FMB, MEDEL, MO, PMA, SCZ, USJ) fueron facilitados por los proyectos adelantados en el Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, en el Real Jardín Botánico-CSIC del Ministerio de Ciencia e Innovación de España y en el Herbario de la Universidad de Panamá (Coiba y Bahía Honda, Veraguas), que facilitaron los trabajos de revisión en Malvaceae con cargo a los proyectos PIE del CSIC: 200930I071 y del plan estatal (España) CGL2010-19747. El segundo autor agradece al Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI) por apoyar parte de la investigación. También quiere agradecer a David S. Mitre, Rolando Pérez y Salomón Aguilar de ForestGeo-STRI por proporcionar información complementaria de uno de los especímenes de *Matisia aquilarum*, así como a María Sánchez de Stapf, Lucila Guillén y Gino Fataciolli del Herbario de la Universidad de Panamá (PMA), por el apoyo y acceso a la colección. De igual forma agradece a Rafael Rincón, Rosa Villareal y Zuleika Serracín

del Herbario de la Universidad Autónoma de Chiriquí (UCH) y a Laurencio Martínez, Joana S. Sumich, Jorge Valdés y Basilio Fuentes por el invaluable apoyo en las giras de campo. También agradece a Maira Martínez por sus valiosos comentarios y sugerencias en las evaluaciones de los estados de conservación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores

JLFA: conceptualización y escritura del primer manuscrito, análisis formal. JLFA, ECP: procesamiento de datos, investigación y metodología, revisión y edición del manuscrito. ECP: elaboración de mapas y edición final de las figuras.

Referencias

- Alverson, W.S. (1989). *Matisia* and *Quararibea* (Bombacaceae) should be retained as separate genera. *Taxon*, 38(3), 377-388. <https://doi.org/10.2307/1222268>
- Aparicio, K. & Candanedo, I. (1995). *Informe final de actividades realizadas en el Programa de Conservación del Aguila Harpía, Parque Nacional Darién, Panamá*. Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales. **Bachman, S., Moat, J., Hill, A., de la Torre, J., Scott, B.** (2011). Supporting Red List threat assessments with GeoCAT: geospatial conservation assessment tool. *ZooKeys*, 150, 117-126. <https://doi.org/10.3897/zookeys.150.2109>
- Candanedo, I., Ponce, E., Riquelme, L. (2003). *Plan de Conservación de Área para el Alto Chagres*. The Nature Conservancy (TNC) y Asociación Nacional para la Conservación de la Naturaleza (ANCON) Panamá.
- Ellis, B., Daly, D.C., Hickey, L.J., Johnson, K.R., Mitchell, J.D., Wilf, P., Wing, S.L. (2009). *Manual of leaf architecture*. Cornell University Press and the New York Botanical Garden Press. <https://doi.org/10.1079/9781845935849.0000>
- Fernández-Alonso, J.L. (1992). Catálogo de la Flora vascular de los corregimientos de Santa Cecilia (Pueblo Rico), Puerto de Oro (Mistrató) y Campamento (Santuario), Risaralda. Informe presentado a la CARDER, (inédito). Instituto de Ciencias Naturales-Museo de Historia Natural Universidad Nacional de Colombia [Con la colaboración de J. Betancur, J. Murillo, C.I. Orozco y otros botánicos del ICN].
- Fernández-Alonso, J.L. (1996). Contribuciones al conocimiento del género *Phragmotheca* Cuatrec. (Bombacaceae-Quararibeeae). *Caldasia*, 18(3), 253-284.
- Fernández-Alonso, J.L. (2001a). Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae I. Novedades taxonómicas y corológicas en *Matisia*, *Quararibea* y *Spirotheca*. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 25(95), 183-206.
- Fernández-Alonso, J.L. (2011). Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae IX. Una nueva especie de *Matisia* Bonpl. del Chocó biogeográfico. *Caldasia*, 33 (2): 413-426.
- Fernández-Alonso, J.L., Campos-Pineda, E. (2023). *Matisia gentryi* and *M. tinamastiana* (Malvaceae), two species newly recorded from Panamá and an updated key to *Matisia* species in this country. *Check List*, 19 (6), 1013-1020. <https://doi.org/10.15560/19.6.1013>
- Font i Quer, P. (1985). *Diccionario de Botánica*. Editorial Labor.
- Harris, J.G., Harris, M.W. (2001). *Plant identification terminology: An illustrated glossary*. 2nd ed. Spring Lake Publishing.
- Ibáñez, A., Castroviejo, S., Fernández-Alonso, J.L., Correa, M. (2005). Catálogo de la flora de la región de Bahía Honda (Veraguas, Panamá). En: Castroviejo, S. y A. Ibáñez (eds.) *Estudios sobre la biodiversidad de la región de Bahía Honda (Veraguas, Panamá)*. Biblioteca de Ciencias 20. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- IUCN. (2012). *Categorías y Criterios de la Lista Roja de la UICN, versión 3.1, ed. 2*. UICN.
- IUCN. (2022). *Guidelines for using the IUCN Red List categories and criteria*. Version 15.1. Standards and Petitions Committee. IUCN. <https://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>
- Morales, R., J.A. Devesa. (2024). In memoriam Dr. Ginés A. López González (1950-2024). *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 81, e149. <https://doi.org/10.3989/ajbm.630>
- RJB (2024). Personal científico. Gines López González (1950-2024). <https://rjb.csic.es/personal-cientifico/gines-lopez-gonzalez-1950-2024/>
- Thiers, B. (2024). *Index Herbariorum: A global directory of public herbaria and associated staff*. New York Botanical Garden's Virtual Herbarium. <http://sweetgum.nybg.org/science/ih/>, recuperado en septiembre de 2024.

Artículo original

A Late Holocene Lecythidaceae wood record from Valle del Cauca, Colombia

Registro de madera de Lecythidaceae del Holoceno tardío en el Valle del Cauca, Colombia

 Diana Karen Pérez-Lara^{1,2,*},  Camila Martínez^{1,2},  Camila Pizano³,  Carlos Jaramillo²,
 Víctor Vásquez¹

¹Área de Sistemas Naturales y Sostenibilidad, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

²Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá City, Panamá

³Department of Biology, Lake Forest College, Illinois, USA

Abstract

A well-preserved fossil tree trunk was discovered in Valle del Cauca, Colombia. The radiocarbon date indicated that the tree lived during the Late Holocene, Meghalayan (4255 - 4083 cal BP). This finding is significant because the tree retains much of its original tissue. Based on wood anatomical comparisons, we suggest that this non-mineralized wood belongs to the family Lecythidaceae, a pantropical group of trees. This family includes around 12 recognized fossil genera based on fossil wood. The fossil probably belongs to the Bertholletia clade, which includes slow-growing, shade-tolerant species often found in tropical dry forests. This suggests that dry forests dominated the Valle del Cauca region before agricultural lands largely replaced them over the past decades.

Keywords: Meghalayan; Mummified; Dry forest; Subfossil; Non-mineralized.

Resumen

Se halló un tronco de árbol fósil bien conservado en el Valle del Cauca, Colombia. La fecha de radiocarbono indicó que el árbol vivió durante el Holoceno tardío, Meghalayo (4255 - 4083 cal BP). El descubrimiento es significativo porque el árbol conserva gran parte de su tejido original. Basándonos en comparaciones anatómicas de la madera, sugerimos que esta muestra no mineralizada pertenece a la familia Lecythidaceae, un grupo pantropical de árboles. Esta familia incluye alrededor de 12 géneros fósiles reconocidos a partir de maderas fósiles y el fósil encontrado probablemente pertenece al clado Bertholletia, el cual incluye especies de crecimiento lento, tolerantes a la sombra, comunes en los bosques secos tropicales, lo que sugiere que el Valle del Cauca estuvo dominado por este tipo de bosques antes de ser reemplazados por tierras agrícolas en las últimas décadas.

Palabras clave: Megalayense; Momificado; Bosque seco; Subfósil; No mineralizado.

Introduction

A well-preserved subfossil tree was discovered in Valle del Cauca, Colombia (**Figure 1**). The large tree trunk was found when drilling a well at a water treatment plant in Puerto Mallarino, Cali. The specimen exhibits remarkable preservation, with much of its original tissue still intact. This preservation is unusual, as most fossil samples are mineralized with silica or carbonates.

Subfossil wood can be found in surroundings that inhibit microbial decay and prevent exposure to oxygen and harsh chemicals. It can be mummified, retaining most of its original tissue; charcoaled due to combustion in an anaerobic environment, or coalified from intense heat and pressure during deep burial (**Mustoe, 2018**). Although most mummified

Citation: Pérez-Lara DK, *et al.* A Late Holocene Lecythidaceae wood record from Valle del Cauca, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(189):922-935, octubre-diciembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.3085>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Corresponding autor:**

Diana Karen Pérez-Lara;
dkperezl@eafit.edu.co

Received: October 9, 2024

Accepted: December 4, 2024

Published on line: December 11, 2024



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



Figure 1. Large tree trunk found at a water treatment plant in Puerto Mallarino, Valle del Cauca, Colombia

wood localities are found in Quaternary volcanic settings, there are also Neogene and Paleogene records from the Canadian Arctic, northwestern United States, Hungary, Italy, China, and Japan, among other sites (Mustoe, 2018).

These types of fossil fragments can be identified with similar methods to those used for modern wood preparation, where anatomical sections for microscopic observation are obtained with microtomes (Jagels *et al.*, 2005). We propose that this non-mineralized wood belongs to the Lecythidaceae family, a pantropical group of trees within the order Ericales (APG IV, 2016). This family is most diverse in the Neotropics (Mori *et al.*, 1990; Vargas & Dick, 2020) and consists of three subfamilies: Foetidioideae (Madagascar), Planchonioideae (Asia and Africa), and Lecythidoideae (Mori *et al.*, 2017), the latter being the largest with approximately 232 species (Vargas & Dick, 2020).

The Lecythidoideae crown clade dates back 46 million years ago, with the stem age at 62.7 million years (Vargas & Dick, 2020) suggesting that the family dispersed well after the breakup of Gondwana, and most of its major clades diversified during the Miocene (23-5.3 million years ago). Vargas & Dick (2020) proposed the Guyana floristic region as the ancestral range for many Lecythidoideae clades.

After Lecythidoideae was established in the Neotropics, it diversified into a wide range of species potentially shaped by Pleistocene refugia (Haffer, 1969; Thomas *et al.*, 2014); however, there is no comprehensive study on Lecythidoideae diversification. The multiple fossil records of Lecythidaceae have been primarily described from fossil pollen and wood and most of them are from India. The oldest record is from the Piauí Cretaceous in Brazil (Table 1).

Today, the Valle del Cauca region is almost entirely deforested and dominated by sugar cane crops. Only four Lecythidaceae species have been identified in its tropical dry forest: *Eschweilera caudiculata* R.Knuth 1939, *Gustavia speciosa* (Kunth) DC 1828, *Gustavia superba* (Kunth) O.Berg 1856, and *Lecythis minor* Jacq. 1763 (Pizano *et al.*, 2014; Silverstone-Sopkin, 2012).

Materials and methods

Geological setting

The fossil wood was collected at the Emcali Water Treatment Plant in Puerto Mallarino (Figure 2), near the Cauca River in Cali, department of Valle del Cauca, Colombia (3.4462 N; 76.4795 W at 1018 m.a.s.l.).

A three-meter-long tree trunk (Figure 1) was collected during the drilling of a 50-meter-deep water well at meter 17. In this area, Quaternary alluvial deposits are exposed (Gomez *et al.*, 2023), and probably the well crossed this particular one (Figure 2). The fossil was

Table 1. Lecythidaceae fossil species

Species	Vessels	Axial parenchyma	Rays	Crystals	Other	Region	Age	Reference
<i>Barringtonioxylon arcotense</i>	8–16/mm ²	Paratracheal and apotracheal diffuse	6-8/mm 1-8 seriate Homocellular / heterocellular	Absent	Tyloses and silice	South India	Paleogene	Awasthi, 1969
<i>Barringtonioxylon assamicum</i>	12-16/mm ²	Paratracheal parenchyma scanty, apotracheal diffuse	6-9/mm 1-7 seriate Homocellular / heterocellular	Absent	Tyloses and gums	Tipam sandstones Formation, India	Oligocene and Miocene	Prakash & Tripathi, 1970; Agarwal et al., 2000
<i>Barringtonioxylon eopterocarpum</i>	12/mm ²	Paratracheal parenchyma sparse, apotracheal abundant, occurring mostly as narrow, irregular, uniseriate lines	6-8/mm 1-8 seriate Homocellular / heterocellular	Absent	Tyloses	The Deccan Intertrappean beds of Mahurzari, India	Eocene	Prakash & Dayal, 1964
<i>Barringtonioxylon mandlaense</i>	---	Axial parenchyma diffuse vasicentric, aliform	4-12/mm 4-10 seriate Heterocellular	Absent	Sheath cells	The Deccan Intertrappean beds of Mandla District, India		Bande & Khatri, 1980
<i>Barringtonioxylon deccanense</i>	--	Diffuse-in-aggregates, scanty paratracheal and banded	4-12/mm >4-seriate Heterocellular	Absent	Axial canals, sheath cells, tyloses	India	Upper Cretaceous to Early Eocene	Shallom, 1960
<i>Careyoxylon pondichherriense</i>	8–15/mm ²	Paratracheal and apotracheal (1-6 cells wide)	9-14/mm 1-4 seriate Homocellular / heterocellular	Absent	Tyloses	South India	Paleogene	Awasthi, 1969
<i>Careyoxylon chindwinnense</i>	-----	Diffuse-in-aggregates, banded in narrow bands up to three cells wide	4-12/mm 1-3 seriate Homocellular / heterocellular	Present	Tyloses	Myanmar	Middle Miocene	Gottwald, 1994
<i>Careyoxylon kuchilense</i>	6-14/mm ²	Paratracheal parenchyma scanty, apotracheal diffuse	7-15/mm 1-5 seriate Homocellular / heterocellular	_____	Tyloses	Tipam sandstones Formation, India	Middle Miocene	Prakash & Tripathi, 1970
<i>Carinianoxylon brasiliensi</i>	7–14/mm ² 170µm	Reticulate	8-11/mm 1-3 seriate Homocellular / heterocellular	Present	Tyloses	Maranhão, Brazil Solimões Formation, Brazil	Paleogene Miocene	Selmeier, 2003 Kloster et al., 2017
<i>Lecythioxylon brasiliensi</i>	4–5/mm ²	In lines of 1-2 cells wide	7-12/mm 1-3 seriate Homocellular / Heterocellular	Present	_____	Piauí, Brazil	Cretaceous	Milanez, 1935
<i>Lecythioxylon milanezzi</i>	4–5/mm ²	In lines of 1-2 cells wide	9-12/mm 1-3 seriate Homocellular /heterocellular	Present	Tyloses	Brazil	Neogene	Mussa, 1959
<i>Cariniana valverdei</i>	7/mm ²	Paratracheal scarce and apotracheal of 1-3 cells wide	5/mm 1-4 seriate Homocellular /heterocellular	Present	Tyloses	Piedra Chamaná Fossil Forest, Perú	Eocene	Woodcock et al., 2017

Species	Vessels	Axial parenchyma	Rays	Crystals	Other	Region	Age	Reference
<i>Lecythioxylon enviraense</i> ,	4–15/mm ² 128µm	Reticulate >3 cells wide	7-12/mm 1-3 seriate Homocellular /heterocellular	Present	Tyloses	Solimões Formation, Brazil	Miocene	Kloster <i>et al.</i>, 2017
<i>cf. Cariniana</i>	--	Reticulate 1-2 cells wide	1-2 seriate Homocellular	Absent	Two types of vessel-ray pits are present	Pebas formation, Perú	Middle Miocene to Pliocene	Pons & de Franceschi, 2007
<i>cf. Echweilera</i>	--	In broad continuous tangential bands	2-3 seriate Homocellular	Absent	Tyloses	Pebas formation, Perú	Middle Miocene to Pliocene	Pons & de Franceschi, 2007
Lecythidaceae this work	6-12/mm ²	Paratracheal absent and apotracheal diffuse, and in narrow bands up to 5 cells wide	8-11/mm 1-2 seriate Homocellular /heterocellular	Present	Tyloses	Valle del Cauca, Colombia	Holocene	



Unconsolidated deposit

- al – alluvial
- t – terrace
- ca – alluvial fan
- l – paludal
- g – morainic
- p – ash fall
- e – dunes
- m – coastal
- vc – volcanoclastic

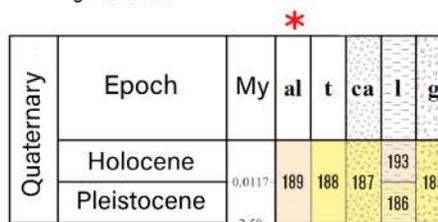


Figure 2. Sample collection site (red star) and stratigraphic column (red asterisk). Taken and modified from **Gómez *et al.*, 2023**.

sliced into 20 pieces with a benchtop band saw at Universidad ICESI (Cali, Colombia). Five of these pieces were sent to Universidad EAFIT (Medellín, Colombia), where they were sectioned for anatomical observation. Another fragment was sent to the Beta Analytic Radiocarbon Dating Laboratory (Miami, Florida, United States) for radiocarbon dating (sample ID 48530), and the remaining pieces remained at the Universidad ICESI Herbarium.

Sample processing

The anatomical features were studied from small pieces of wood found at the collection site and later placed in Ziploc bags to keep them moist until the time of preparation in the laboratory. Some of the well-preserved wood samples had to be dehydrated by immersion in 95% ethanol for 72 hours and then embedded in polyethyleneglycol (PEG) 2000 at 60°C for 24 hours. Then, we obtained 20–70 μm thick slices using a SLEE Mainz Rotary Microtome CUT 5062. The best-quality slices from each sample were immediately assembled using Eukitt to prevent the tissue from degrading.

We used the terminology from the IAWA Hardwood List (Wheeler, 1986; IAWA Committee, 1989) for the descriptions, and determined affinities by consulting the literature (de Zeeuw & Mori, 1987; Detienne & Jacquet, 1983; Diehl, 1935; Metcalfe & Chalk, 1950; Richter, 1982) and the multiple-entry key InsideWood from the Inside Wood Database (2004 onwards) (Wheeler, 2011). Photographs were taken with an Olympus BX53 light microscope and an SC100 digital camera with a 10.5 MP CMOS sensor.

We scanned the sample with a Scanning Electron Microscope to assess the type of non-mineralization (mummification, charcoalification, or coalification) and the potential for stable isotope analyses (Mustoe, 2018: Figure 3). For the taxonomic classification, we followed APG IV (The Angiosperm Phylogeny Group, 2016).

Results

Radiometric dating

The radiocarbon dating of sample 48530 indicated a calibrated age of 4255 – 4083 cal BP (91.5%) (Beta Analytic 632015, Conventional Radiocarbon Age: 3790 ± 30 BP, percent modern carbon (pMC): 62.39 ± 0.23 pMC, $\delta_{13}\text{C}$ (IRMS): -25.3‰) (Figure 4).

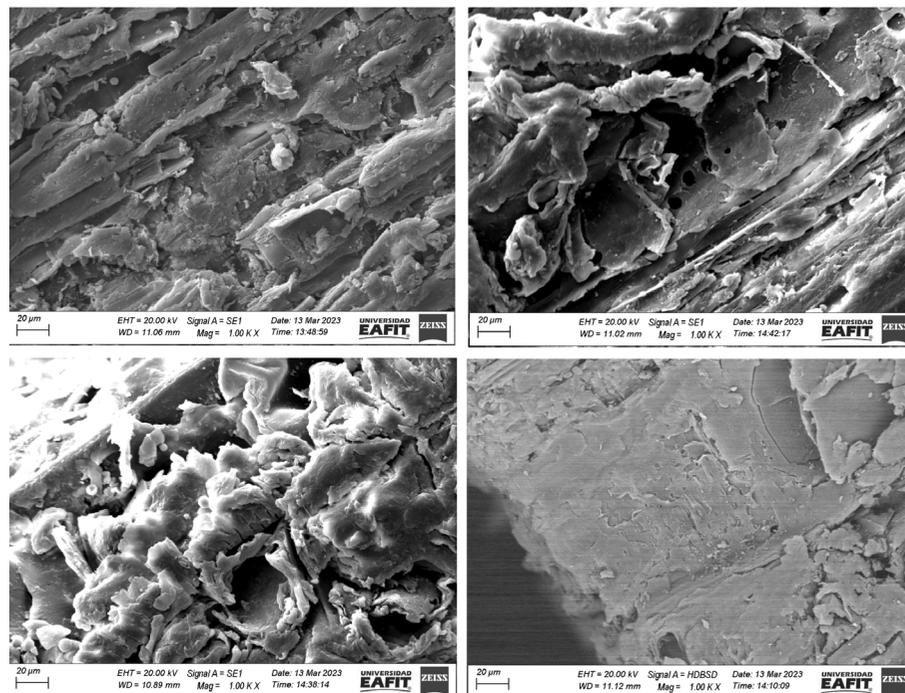


Figure 3. SEM photos. The wood's external structure remains largely preserved. The cell walls consist of an outer primary wall that encases a multi-layered secondary wall. The primary wall, which can be relatively thick, is primarily made up of cellulose and hemicellulose. In contrast, the thinner secondary wall is predominantly composed of cellulose and lignin. This secondary wall is typically divided into three distinct layers (lamellae), each varying in the arrangement of cellulose aggregates and the amount of lignin.

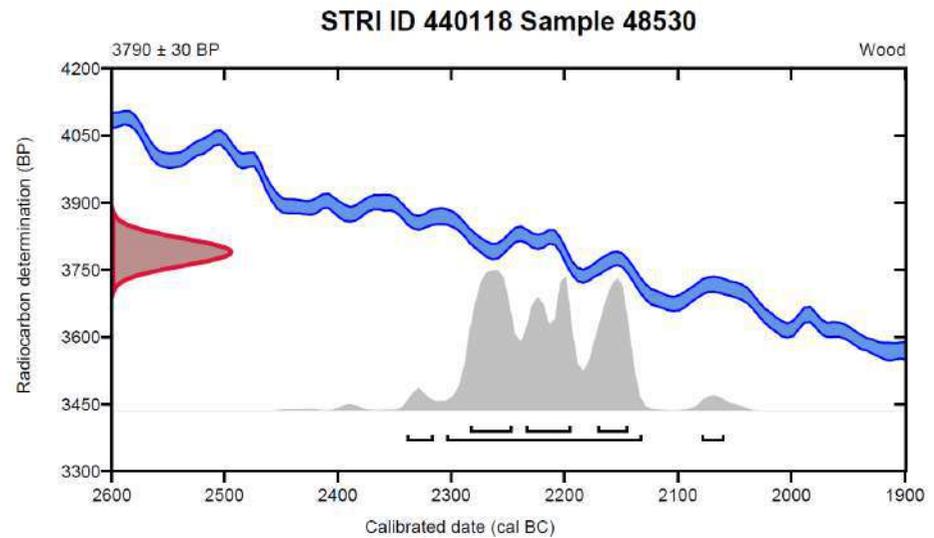


Figure 4. Calibration results using radiocarbon ages

Systematic palaeontology

Order – Ericales

Family – Lecythidaceae

Subfamily — Lecythidoideae Beilschmied

Clade — Bertholletia

Genus — *Eschweilera/Lecythis*

Age –calibrated age of 4255 – 4083 cal BP (radiocarbon dating analysis obtained for the fossil fragment)

Description in IAWA feature numbers: 5p 13p 22p 26p 32p 56p 65p 66p 70p 87p 89p 97p 106p 115p with 1 allowable mismatch

Description – Growth rings indistinct. Diffuse porous wood (**Figure 5 a-c**). Solitary vessels (36%), radial multiples two to three (up to 6) (**Figure 5 a-c**). Vessel elements round to oval in outline (**Figure 5 b-c**). Mean tangential vessel diameter 102 (70-200) μm ; 8 (6–12) vessels per square millimeter; vessel walls in transverse sections of 12 (6-16) μm thick; simple perforation plates; intervessel pitting alternate 7-10 μm (**Figure 5 d**); vessel-ray parenchyma pitting with reduced borders, horizontally elongate, and similar to intervascular pits (**Figure 5 h**). Mean vessel element length 200-400 μm . Bubble-like tyloses common (**Figure 5 b-c**).

Uniseriate rays averaging 12 (7–20) cells, 535 (407-1188) μm high, 22 (19-23) μm wide (**Figure 5 e-f**). Some biseriate rays averaging 12 (8–21) cells and 904 (710-1210) μm high, 28 (27-29) μm wide (**Figure 5 e-f**). Rays 10 (8–11) per millimeter. Heterogeneous with procumbent body cells and usually one marginal row (**Figure 5 g**).

Fibers septate (**Figure 5**) and non-septate, thin to thick walls, pitting not observed. Axial parenchyma apotracheal diffuse, and axial parenchyma in narrow bands up to five cells wide (**Figure 5 a-c**).

Remarks — The fossil wood studied exhibits a combination of features indicating an affinity with Lecythidaceae and Malvaceae. However, Malvaceae members generally have storied rays and scarce axial parenchyma (**Wheeler et al.**, 1994). This fossil wood shows characters consistent with Lecythidaceae, such as parenchyma in apotracheal bands, simple perforation plates, alternate intervessel pitting, and two types of vessel-ray pitting. Additionally, rays are mostly 2–3 cells wide and distinctly heterogeneous to homogeneous, which aligns with the characteristics of Lecythidaceae (**Diehl**, 1935; **Lens et al.**, 2007;

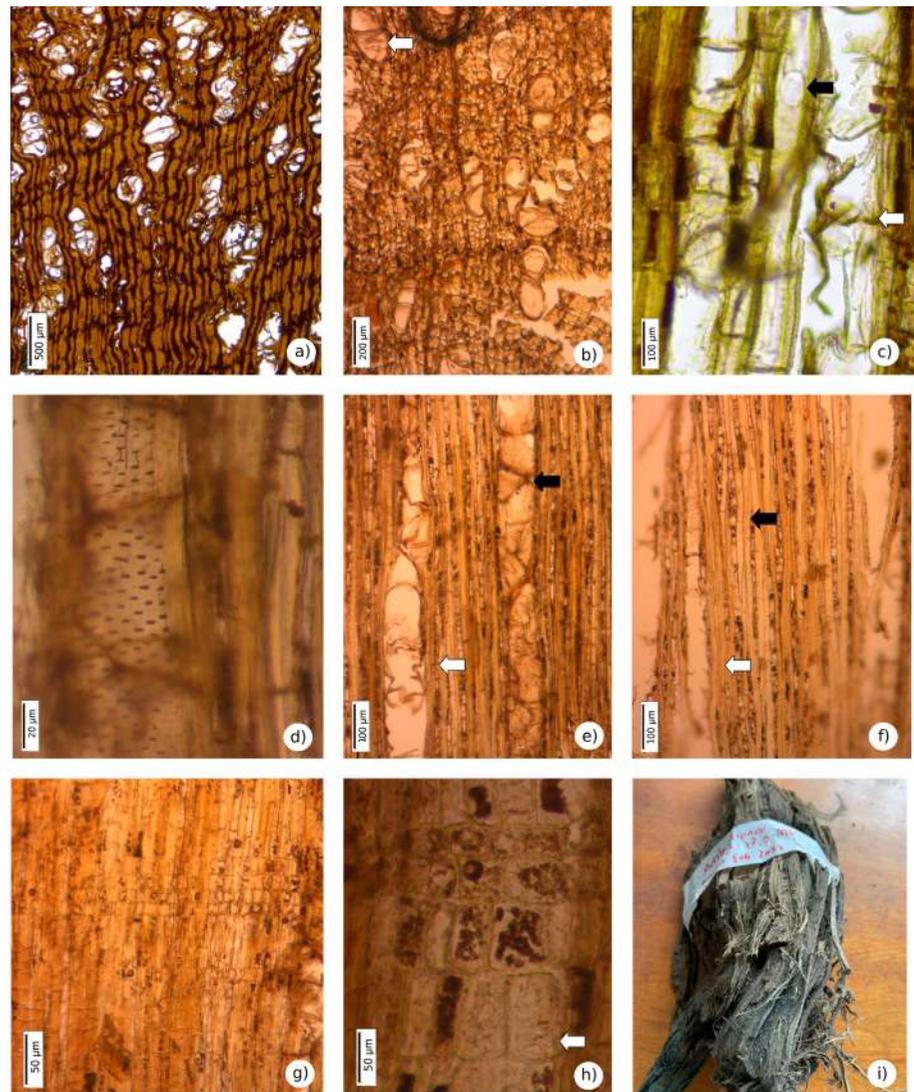


Figure 5. Wood anatomical features of the mummified wood. **a.** Transverse section (TS). Diffuse porous wood. **b.** TS. Vessels in radial multiples and nearly absent parenchyma. **c.** Axial parenchyma apotracheal diffuse and axial parenchyma in narrow bands up to five cells wide. **d.** Longitudinal tangential section (LTS). Vessel elements, simple perforation plates, and alternate intervessel pitting. **e.** LTS. Tyloses and uniseriate rays and biseriate rays. **f.** LTS. Septate and non-septate fibers and uniseriate rays. **g.** LRS. Heterogeneous with procumbent body cells and usually one marginal row. **h.** Vessel-ray parenchyma pitting with reduced borders, horizontally elongated and similar to intervacular pits. **i.** mummified wood.

(Metcalf & Chalk, 1950; Silva *et al.*, 2022). Rays < 1 mm high lacking crystals and the presence of two types of vessel-ray pits generally distinguish the Lecythidoideae subfamily (Lens *et al.*, 2007). The solitary vessels in small multiple tyloses, the parenchyma in continuous bands 1–2 cells wide, and the abundant less than 1 mm uniseriate rays with 1 or 2 marginal rows of square cells support its inclusion in *Eschweilera* and *Lecythis* (Metcalf & Chalk, 1959) (Table 2).

Comparisons with Lecythidaceae fossil woods

Approximately 12 fossil woods have been described (Gregory *et al.*, 2009; *Inside Wood Database*, 2004-onwards) (Table 1). The following characteristics differentiate them

Table 2. Some modern Lecythidaceae species

Species	Vessels	Axial parenchyma	Rays	Crystals	Other
<i>Gustavia speciosa</i> Kunth	1–30/mm ²	Diffuse-in aggregates to uniseriately banded	1-11/mm 2-8 seriate Heterocellular	Present	_____
<i>Gustavia augusta</i> L.	20-40/mm	Diffuse, diffuse-in aggregates, scanty, narrow bands	6-10/mm 1-9 seriate Heterocellular	In chambered axial parenchyma cells	Tyloses
<i>Gustavia gigantophylla</i> Sandwith	5-20/mm	Narrow bands	4-12/mm 4-10 seriate Heterocellular	In chambered axial parenchyma cells	Tyloses
<i>Gustavia hexapétala</i> (Aubl.) Sm.	20-100/mm	Diffuse-in aggregates	4-12/mm 1-3 seriate Heterocellular	In chambered axial parenchyma cells and in rays	_____
<i>Gustavia nana</i> Pitt.	20-40/mm	Narrow bands	4-12/mm >10 seriate Heterocellular	In chambered axial parenchyma cells	
<i>Lecythis ampla</i>	8–15/mm ²	Paratracheal and apotracheal (1-6 cells wide)	9-14/mm 1-4 seriate Homocellular/heterocellular	Absent	Tyloses
<i>Lecythis chartacea</i> O.Berg	5-20/mm	Bands (> 3 cells)	4-12/mm 1-7 Homocellular to heterocellular	In chambered axial parenchyma cells	Tyloses
<i>Lecythis confertiflora</i> (A.C.Sm.) S.A.Mori	<5-20/mm	Scanty paratracheal, narrow bands, reticulate, marginal bands	4-12/mm 1-3 seriate Homocellular to heterocellular	In chambered axial parenchyma cells	Tyloses and silica bodies in rays
<i>Lecythis idatimon</i> Aubl.	<5-20/mm	Scanty paratracheal, narrow bands, and reticulate	4-12/mm 1-3 Homocellular	_____	Tyloses
<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A.Mori	<5-20/mm	Diffuse, diffuse-in aggregates	4-12/mm 1-6 Heterocellular	In chambered axial parenchyma	Tyloses
<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	<5-20/mm	Narrow bands, reticulate, marginal bands	4-12/mm 1-3 Homocellular to heterocellular	In chambered axial parenchyma	Tyloses and silica bodies in rays
<i>Lecythis zabucajo</i> Aubl.	<5-20/mm	Scanty, narrow bands, reticulate and marginal bands	4-12 1-3 Homocellular to heterocellular	In chambered axial parenchyma	Tyloses and silica bodies in rays
<i>Eschweilera sclerophylla</i> Cuatrec	7–14/mm ² 170µm	Reticulate	8-11/mm 1-3 seriate Homocellular/ heterocellular	Present	Tyloses
<i>Eschweilera alata</i> A.C.Sm.	<5/mm	Scanty, narrow bands, reticulate and in marginal bands	10-14/mm 1-3 seriate Homocellular to heterocellular	_____	Tyloses and silica bodies in rays
<i>Eschweilera tenax</i> (Moritz ex O.Berg) Miers	5-20/mm	Bands and reticulate	4-12/mm 1-3 seriate Homocellular	In chambered axial parenchyma cells	Tyloses
<i>Eschweilera albiflora</i>	5-20/mm	Bands, reticulate	4-12/mm 1-4 seriate Homocellular to weakly heterocellular	In chambered axial parenchyma cells	Tyloses
<i>Eschweilera congestiflora</i>	5-20/mm	Bands	4-12/mm 1-4 seriate Heterocellular	_____	Tyloses
Lecythidaceae this work	6-12/mm ²	Apotracheal diffuse and paratracheal in narrow bands	8-11/mm 1-2 seriate Homocellular/ heterocellular	In axial parenchyma	Tyloses

from the fossil we describe here: *Barringtonioxylon arcotense* Awasthi, 1969 from the Indian Neogene exhibits parenchyma aliform to confluent and wider rays (up to 8 cells) (Awasthi, 1969). *Barringtonioxylon eopterocarpum* from the Eocene of the Deccan Intertrappean Series, India, differs from our wood sample in that it has ring-porous wood and lacks radial canals (Prakash & Dayal, 1964). *Barringtonioxylon mandlaense* from the Deccan Intertrappean Series, India, has vasicentric parenchyma and fine to broad rays of two distinct types (Bande & Khatri, 1980). *Careyoxylon pondicherriense* reported in Paleogene sediments from southern India differs in having wider rays (up to 4 cells) and sheath cells (Awasthi, 1969). *Careyoxylon chindwinnense* from the middle Myanmar Miocene differs in having prismatic crystals in rays and thick-walled vessels (Gottwald, 1994; *Inside Wood Database*, 2004-onwards). *Careyoxylon kuchilense* described from the Tipam sandstones Formation Middle Miocene in India differs in the presence of scanty paratracheal parenchyma (Prakash & Tripathi, 1970). In the New World, *Carinianoxylon brasiliensi* from Brazil differs in having reticulate parenchyma (Kloster *et al.*, 2017; Selmeier, 2003). *Lecythioxylon brasiliensi* and *Lecythioxylon milanezzi* described from the Neogene have lower vessel density and wider rays (Milanez, 1935; Mussa, 1959). *Lecythioxylon enviraense*, from the Acre Basin, Brazil, differs in having reticulate axial parenchyma more than three cells wide and the presence of crystals in ray cells (Kloster *et al.*, 2017). Finally, from the Eocene of Perú, *Cariniana valverdei* has lower vessel density and scarce paratracheal parenchyma (Woodcock *et al.*, 2017) (Table 1).

Scanning electron microscopy

Photographs were taken to examine the anatomy and preservation of the samples (Figure 3). The tangential section is shown in greater detail, revealing key anatomical features such as fibers, parenchyma, vessels, and intervessel pits (Figure 5).

Remarks — Mustoe (2018) identified three types of non-mineralized fossilized wood: mummified, charcoaled, and coalified. Mummified wood retains its original tissues with minimal chemical alteration, though they may exhibit distortion or desiccation. Charcoaled wood forms when wood is burned in an oxygen-deprived environment, reducing the organic material mainly to pure carbon. Coalified wood, in contrast, results from prolonged exposure to heat and pressure during deep burial, transforming the original organic material into a mixture of pure carbon and hydrocarbons.

Discussion

Subfossil wood has an economic importance in the wood industry, especially in Europe, where it is used in furniture (Beldean & Timar, 2021). In Colombia, information about subfossil wood is scarce — only two studies describe five subfossil woods identified as *Terminalioxylon gumminae*, *Andesanthus risaraldense*, *Anacardium quindiuense*, *Chrysochlamys colombiana*, and *Goupioxylon stutzeri* from the Pleistocene of the Central Cordillera (Ayala-Usma, 2014; Ayala-Usma *et al.*, 2024).

The successful preparation, description, and dating of this sample confirms the high potential that non-mineralized fossil wood has for paleobotanical investigation. The processes described here can be replicated for future findings of this type of fossil. Our record confirms the presence of the Bertholletia clade (*Lecythis*/*Eschweilera*) in Valle del Cauca at least since the Late Holocene (Meghalayan).

This wood is an exemplar of mummified wood because it retains its original tissues with only minimal degradation of cellular components (Figures 1, 3, 5i) (Mustoe, 2018). The key conditions for mummification involve preventing microbial and chemical decay, typically in environments with deeply submerged wood, burial in impermeable sediments, arid regions, or cold climates. Also, this subfossil wood is frequently found in Quaternary deposits, where glacial, fluvial, and volcanoclastic lahar sediments create deep layers of fine material that aid in preserving organic remains (Mustoe, 2018).

Cali, where the fossil was found, is the capital of the department of Valle del Cauca and the third largest city in Colombia, with a population of approximately 2.28 million (DANE, 2018) and an average elevation of 1018 m. The surrounding area is highly urbanized, the Cauca River valley has been largely transformed, and only 1.4% of primary forest, mostly tropical dry forest, remains (Pizano *et al.*, 2014).

The presence of the Lecythidaceae family in Colombia had been already reported. Berrío *et al.* (2002) described *Couroupita santanderiensis* fossil leaves from the Miocene of Santander and Huertas (1969) described a *Lecythidopyon girardotatum* fruit from Cundinamarca.

Lecythis and *Eschweilera* are non-monophyletic genera that share the greatest number of characters with our fossil and belong to the Lecythidoideae subfamily, which is dominant in the Amazonian forests and includes many emergent tree species (Vargas & Dick, 2020). Both genera vary from small to very large trees found throughout the Neotropics below 1500 m (GBIF, 2024) in México, Central America, Colombia, Venezuela, Amazonia, and Eastern and Central Brazil (Huang *et al.*, 2015; Mori *et al.*, 2017, 2007). The genera originated in the biogeographic regions of the Guiana, Amazonia, Cerrado-Caatinga, Mata Atlántica, and Transandean areas (Vargas & Dick, 2020). It is possible then that these species were typical of the dry forest-wetland transition that characterized this vast region before natural ecosystems were almost completely replaced by agricultural lands (Ramos-Pérez & Silverstone-Sopkin, 2018; Silverstone-Sopkin, 2012).

Late Holocene climate

The Valle del Cauca vegetation was dominated by tropical dry forests before the Industrial Revolution. The climate of the late Holocene, around 4,200 years BP, was a period characterized by increased aridity in mid- and low-latitudes (Meghalayan) (Berkelhammer *et al.*, 2012; Walker *et al.*, 2018, 2012). Many records show a rapid onset of aridification in the Mediterranean region, parts of Asia, North America, northeastern Brazil, and Africa (Bini *et al.*, 2019; Booth *et al.*, 2005; Cheng *et al.*, 2015; De Oliveira *et al.*, 1999; Dixit *et al.*, 2014; Kaniewski *et al.*, 2017; Thompson *et al.*, 2002; Toth & Aronson, 2019; Utida *et al.*, 2019, 2020). In Colombia, Berrío *et al.* (2002) described two sediment cores from the Valle del Cauca region with pollen, charcoal, and radiocarbon data. The Quilichao-1 core covers from 13,150 to 7,720 14C years BP and, after a gap, from 2,880 14C years BP to the present. The La Teta-2 core provides a continuous record from 8,700 14C years BP to the present. Maximum dryness was reached around 7,500 and 4,300 14C years BP, close to the 4,200 events. Additionally, pollen grains from Zone TET-1 (8850–7560 14C yr BP) show the dominance of dry forest taxa (*Crotalaria*, *Croton*, *Tabebuia*, *Alchornea*), while Lecythidaceae represents 8% of the pollen grains. Although the Valle del Cauca records for the late Holocene indicate an increase in aridity, the changes in precipitation were not large enough to modify its biome dominance; the valley was dominated by dry forests and wetlands/flooded forests during the Late Holocene and in modern times before the Industrial Revolution.

Conclusions

The discovery of a well-preserved subfossil tree in Valle del Cauca, Colombia, provides a rare and valuable insight into the ancient tropical dry forests of the region. The fossil wood exhibits anatomical features strongly indicative of the Lecythidaceae family, particularly aligning with the genera *Lecythis* and *Eschweilera*. These findings suggest that Lecythidaceae, a family now dominant in the Amazon forests, once flourished in the Valle del Cauca region, contributing to the region's biodiversity and ecological complexity. They further underscore that the region probably lost a considerable part of its biodiversity centuries ago, when natural forests were replaced by agricultural lands (Silverstone-Sopkin, 2012). The identification of Lecythidaceae in the fossil record highlights the long-term ecological stability and adaptability of this family. Furthermore, the preservation of this fossil wood suggests that specific environmental conditions, such as rapid burial

and low oxygen levels, played a crucial role in the fossilization of wood. The climatic history of the Valle del Cauca region is a powerful reminder of the capacity of natural systems to adapt and evolve in the face of change, but also of their vulnerability. Learning from these records can help us anticipate future challenges and more effectively adapt our conservation and climate management strategies.

Acknowledgments

We want to thank EMCALI-ECIE-ESP for the permission to collect and study the fossil. Luis Darío Gómez (CINARA-Universidad del Valle) and Juan Pablo Gutiérrez and José Ospinal (MCALI-ECIE-ESP) for making this study possible; Wilmar Oswaldo Díaz-Vasco for helping with the field collection and the processing and proper storage of the fossil at the Universidad Icesi Herbarium; Carlos D. Cárdenas and Juan David Quintero for their assistance in the processing of the fossil, and Juan Camilo Arango Gálvez for their assistance in taking the SEM photographs at Universidad EAFIT.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no competing financial interests or personal relationships that could have influenced the work reported in this paper.

References

- Agarwal, A., Ambwani, K., Saha, S., and Kar, R.K. (2000). Fossil wood of *Barringtonia* (Lecythidaceae) from Ramgarh, Chittagong Hill Tract, Bangladesh. *Phytomorphology*, 50, 333-336.
- Awasthi, N. (1969). On the occurrence of two new fossil woods belonging to the family Lecythidaceae in the Tertiary rocks of South India. *Journal of Palaeosciences*, 18(1-3), Article 1-3. <https://doi.org/10.54991/jop.1969.820>
- Ayala-Usma, D. A. (2014). *Stable isotopes in subfossil woods-first insights into an ultra-high resolution paleoclimatic record of an Andean Forest during the Late Pleistocene*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstreams/adcb7ee4-5a14-4b57-a138-7cea0817ec9b/download>
- Ayala-Usma, D. A., Lozano-Gutiérrez, R., Orejuela, C., Pérez-Ángel, L. C., Montes, C., González-Arango, C. (2024). Exceptionally preserved subfossil woods from late Pleistocene volcanic deposits from the Northern Andes of Colombia. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 324, 105090. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2024.105090>
- Bande, M. B. & Khatri, S. K. (1980). Some more fossil woods from the Deccan intertrappean beds of Mandla District, Madhya Pradesh, India. *Palaeontographica Abteilung B Band*, 173(4-6), 147-165.
- Beldean, E. & Timar, M. C. (2021). A New Opportunity for Research in Romania – Subfossil Wood. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry • Wood Industry • Agricultural Food Engineering*, 77-88. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2021.14.63.1.7>
- Berkelhammer, M., Sinha, A., Stott, L., Cheng, H., Pausata, F. s. r., Yoshimura, K. (2012). An Abrupt Shift in the Indian Monsoon 4000 Years Ago. *Climates, Landscapes, and Civilizations*. American Geophysical Union (AGU). <https://doi.org/10.1029/2012GM001207>
- Berrío, J. C., Hooghiemstra, H., Marchant, R., Rangel, O. (2002). Late-glacial and Holocene history of the dry forest area in the south Colombian Cauca Valley. *Journal of Quaternary Science*, 17(7), 667-682. <https://doi.org/10.1002/jqs.701>
- Bini, M., Zanchetta, G., Perşoiu, A., Cartier, R., Català, A., Cacho, I., Dean, J. R., Di Rita, F., Drysdale, R. N., Finnè, M., Isola, I., Jalali, B., Lirer, F., Magri, D., Masi, A., Marks, L., Mercuri, A. M., Peyron, O., Sadori, L., ... Brisset, E. (2019). The 4.2 ka BP Event in the Mediterranean region: An overview. *Climate of the Past*, 15(2), 555-577. <https://doi.org/10.5194/cp-15-555-2019>
- Booth, R. K., Jackson, S. T., Forman, S. L., Kutzbach, J. E., Bettis, E. A., Kreigs, J., Wright, D. K. (2005). A severe centennial-scale drought in midcontinental North America 4200 years ago and apparent global linkages. *The Holocene*, 15(3), 321-328. <https://doi.org/10.1191/0959683605hl825ft>

- Cheng, H., Sinha, A., Verheyden, S., Nader, F. H., Li, X. L., Zhang, P. Z., Yin, J. J., Yi, L., Peng, Y. B., Rao, Z. G., Ning, Y. F., Edwards, R. L.** (2015). The climate variability in northern Levant over the past 20,000 years. *Geophysical Research Letters*, 42(20), 8641-8650. <https://doi.org/10.1002/2015GL065397>
- DANE** (2018). *¿Cuántos somos?* <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018/cuantos-somos>
- De Oliveira, P. E., Barreto, A. M. F., Suguio, K.** (1999). Late Pleistocene/Holocene climatic and vegetational history of the Brazilian caatinga: The fossil dunes of the middle São Francisco River. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 152(3), 319-337. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(99\)00061-9](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(99)00061-9)
- de Zeeuw, C. H. & Mori, S. A.** (1987). Wood anatomy. The Lecythidaceae of a lowland Neotropical forest: La Fumée Mountain, French Guiana. *Memoirs of the New York Botanical Garden*, 44, 100-112.
- Detienne, P. & Jacquet, P.** (1983). *Identification atlas for wood of the Amazon River and neighboring areas*. Centre technique forestier tropical. https://scholar.google.com/?title=Identification+atlas+for+wood+of+the+Amazon+River+and+neighboring+areas&author=Detienne%2C+Pierre.&publication_year=1983
- Diehl, G. A.** (1935). *A study of the Lecythidaceae*. Yale University School of Forestry.
- Dixit, Y., Hodell, D. A., Petrie, C. A.** (2014). Abrupt weakening of the summer monsoon in northwest India ~4100 yr ago. *Geology*, 42(4), 339-342. <https://doi.org/10.1130/G35236.1>
- GBIF Backbone Taxonomy.** (2024). <https://doi.org/10.15468/39omei>
- Gómez, J., Montes, N. E., Marín, E.** (2023). *Mapa Geológico de Colombia 2023*. <https://sgcolombiano.maps.arcgis.com/apps/mapviewer/index.html?webmap=6faed511e7c542de85ae4d6a1668953c>
- Gottwald, H. P.** (1994). *Tertiäre Kieselhölzer aus dem Chindwinn-Bassin im nordwestlichen Myanmar (Birma)*. Forschungen aus den Naturwissenschaften.
- Gregory, M., Poole, I., Wheeler, E. A.** (2009). *Fossil Dicot Wood Names: An Annotated List with Full Bibliography*. Published for the International Association of Wood Anatomists at the Nationaal Herbarium Nederland.
- Haffer, J.** (1969). Speciation in Amazonian Forest Birds. *Science*, 165(3889), 131-137. <https://doi.org/10.1126/science.165.3889.131>
- Huang, Y.-Y., Mori, S. A., Kelly, L. M.** (2015). Toward a phylogenetic-based Generic Classification of Neotropical Lecythidaceae—I. Status of Bertholletia, Corythophora, Eschweilera and Lecythis. *Phytotaxa*, 203(2), 85. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.203.2.1>
- Huertas G. G.** (1969). Un nuevo género y especie fósiles de las Lecitidaceas. *Caldasia*, 10(48), 365-369.
- Jagels, R., Visscher, G.E., Wheeler, E.A.** (2005). An Eocene High Arctic Angiosperm Wood. *IAWA Journal*, 26(3), 387-382. <https://doi.org/10.1163/22941932-02603009>
- Jansen, S., Kitin, P., De Pauw, H., Idris, M., Beeckman, H., Smets, E.** (1998). Preparation of Wood Specimens for Transmitted Light Microscopy and Scanning Electron Microscopy. *Belgian Journal of Botany*, 131(1), 41-49.
- Kaniewski, D., Marriner, N., Ilan, D., Morhange, C., Thareani, Y., Van Campo, E.** (2017). Climate change and water management in the biblical city of Dan. *Science Advances*, 3(11), e1700954. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700954>
- Kloster, A., Gnaedinger, S., Adami-Rodrigues, K.** (2017). Nuevos registros de maderas del Mioceno de la Formación Solimões, Cuenca de Acre, Amazonia, Brasil. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 20(3), 383-404. <https://doi.org/10.4072/rbp.2017.3.09>
- Lens, F., Baas, P., Jansen, S., Smets, E.** (2007). A search for phylogenetically informative wood characters within Lecythidaceae s.l. *American Journal of Botany*, 94(4), 483-502. <https://doi.org/10.3732/ajb.94.4.483>
- Metcalfe, C. R. & Chalk, L.** (1950). *Anatomy of the dicotyledons, Vols. 1 & 2*. <https://www.cabdigitalibrary.org/doi/full/10.5555/19511603379>
- Milanez, F. R.** (1935). Estudo De Um Dicotyledoneo Fossil Do Cretaceo. *Rodriguésia*, 1(2), 83-89.
- Mori, S. A., Prance, G. T., De Zeeuw, C., Prance, G. T.** (1990). *Zygomorphic-flowered New World genera (Couroupita, Corythophora, Bertholletia, Couratari, Eschweilera, & Lecythis)*. *Flora Neotropica*, 21, 1-333.
- Mori, S. A., Tsou, C.-H., Wu, C.-C., Cronholm, B., Anderberg, A. A.** (2007). Evolution of Lecythidaceae with an emphasis on the circumscription of neotropical genera: Information from combined ndhF and trnL-F sequence data. *American Journal of Botany*, 94(3), 289-301. <https://doi.org/10.3732/ajb.94.3.289>

- Mori, S., Kiernan, E., Smith, N., Kelly, L., Prance, G. T.** (2017). Observations on the phytogeography of the Lecythydaceae clade (Brazil nut family). *Phytoneuron*, 30, 1-85.
- Mussa, D.** (1959). *Contribuição à paleoanatomia vegetal: II madeiras fósseis do Território do Acre (Alto Juruá) Brasil*. Serviço Gráfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- Mustoe, G. E.** (2018). Non-Mineralized Fossil Wood. *Geosciences*, 8(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/geosciences8060223>
- Pizano, C., Cabrera, M., García, H.** (2014). *Bosque seco tropical en Colombia; generalidades y contexto*. Bogotá, D.C. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). <https://dare.uva.nl/search?identificer=f6d3da1b-126f-41a1-9040-1969c4c294ee>
- Pons, D., Franceschi, D.** (2007). Neogene woods from western Peruvian Amazon and paleoenvironmental interpretation. *Bulletin of Geoscience*, 82, 343-354. doi:10.3140/bull.geosci.2007.04.343
- Prakash, U. & Dayal, R.** (1964). Barringtonioxylon eopterocarpum sp. Nov., A fossil wood of lecythydaceae from the Deccan Intertrappean beds of Mahurzari. *Journal of Palaeosciences*, 13(1-3), Article (1-3). <https://doi.org/10.54991/jop.1964.675>
- Prakash, U. & Tripathi, P. P.** (1970). Fossil woods of Careya and Barringtonia from the Tertiary of Assam. *Journal of Palaeosciences*, 19(1-3), 25-29. <https://doi.org/10.54991/jop.1970.863>
- Ramos-Pérez, J. E. & Silverstone-Sopkin, P. A.** (2018). *Catálogo de la Flora Relictual del Valle Geográfico del Río Cauca [Catalog of the Relictual Flora of the Geographical Valley of the Cauca River]*. <https://www.nhbs.com/catalogo-de-la-flora-relictual-del-valle-geografico-del-rio-cauca-catalog-of-the-relictual-flora-of-the-geographical-valley-of-the-cauca-river>
- Richter, H. G.** (1982). The Wood Structure of *Couratari* Aubl. and *Courouplta* Aubl. (Lecythydaceae). *IAWA Journal*, 3(1), 45-55. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000746>
- Selmeier, A.** (2003). First record of a Lecythydaceae wood (Carinianoxylon brasiliense gen. Et sp. Nov.) from the Tertiary of the New World (Brazil, Rio Paranaíba). *Zitteliana*, 43, 171-178. <http://epub.ub.uni-muenchen.de/12128/>
- Shallom, L.J.** (1960). Fossil dicotyledonous wood of Lecythydaceae from the Deccan Intertrappean beds of Mahurzari. *Indianbot Soc.* 39(2), 198-203.
- Silva, M. dos S., Silva, L. B. da, Santos, N. C. dos, Carvalho, E. R. de, Silva, C. R. A. da, Silva, C. C. S., Leite, K. R. B.** (2022). *Madeiras da Bahia: Anatomia do lenho de espécies nativas da Mata Atlântica*. EDUFBA. <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/34749>
- Silverstone-Sopkin, P. A.** (2012). *Los muertos vivientes: La historia natural de cuatro lirios amazónicos del suroccidente de Colombia (Eucharis y Plagiolirion, Amaryllidaceae)* (1.^a ed.). Universidad del Valle. <https://www.jstor.org/stable/j.ctv1228j4j>
- The Angiosperm Phylogeny Group.** (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181(1), 1-20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>
- Thomas, E., Alcazar Caicedo, C., Loo, J., Kindt, R.** (2014). *The distribution of the Brazil nut (Bertholletia excelsa) through time: From range contraction in glacial refugia to anthropogenic climate change*. Boletín del Museo Paraense Emilio Goeldi. Ciencias Naturales. <https://hdl.handle.net/10568/66057>
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Davis, M. E., Henderson, K. A., Brecher, H. H., Zagorodnov, V. S., Mashiotta, T. A., Lin, P.-N., Mikhailenko, V. N., Hardy, D. R., Beer, J.** (2002). Kilimanjaro Ice Core Records: Evidence of Holocene Climate Change in Tropical Africa. *Science*, 298(5593), 589-593. <https://doi.org/10.1126/science.1073198>
- Toth, L. T. & Aronson, R. B.** (2019). The 4.2 ka event, ENSO, and coral reef development. *Climate of the Past*, 15(1), 105-119. <https://doi.org/10.5194/cp-15-105-2019>
- Utida, G., Cruz, F. W., Etourneau, J., Bouloubassi, I., Schefuß, E., Vuille, M., Novello, V. F., Prado, L. F., Sifeddine, A., Klein, V., Zular, A., Viana, J. C. C., Turcq, B.** (2019). Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. *Scientific Reports*, 9(1), 1698. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38003-6>
- Utida, G., Cruz, F. W., Santos, R. V., Sawakuchi, A. O., Wang, H., Pessenda, L. C. R., Novello, V. F., Vuille, M., Strauss, A. M., Borella, A. C., Strikis, N. M., Guedes, C. C. F., Dias De Andrade, F. R., Zhang, H., Cheng, H., Edwards, R. L.** (2020). Climate changes in Northeastern Brazil from deglacial to Meghalayan periods and related environmental impacts. *Quaternary Science Reviews*, 250, 106655. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106655>

- Vargas, O. M. & Dick, C. W.** (2020). Diversification History of Neotropical Lecythidaceae, an Ecologically Dominant Tree Family of Amazon Rain Forest. En V. Rull & A. C. Carnaval (Eds.), *Neotropical Diversification: Patterns and Processes* (pp. 791-809). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31167-4_29
- Walker, M., Head, M. J., Berkelhammer, M., Björck, S., Cheng, H., Cwynar, L., Fisher, D., Gkinis, V., Long, A., Lowe, J., Newnham, R., Rasmussen, S. O., Weiss, H.** (2018). Formal ratification of the subdivision of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period): Two new Global Boundary Stratotype Sections and Points (GSSPs) and three new stages/subseries. *Episodes Journal of International Geoscience*, 41(4), 213-223. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2018/018016>
- Walker, M. J. C., Berkelhammer, M., Björck, S., Cwynar, L. C., Fisher, D. A., Long, A. J., Lowe, J. J., Newnham, R. M., Rasmussen, S. O., Weiss, H.** (2012). Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch: A Discussion Paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommittee on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy). *Journal of Quaternary Science*, 27(7), 649-659. <https://doi.org/10.1002/jqs.2565>
- Wheeler, E. A.** (1986). Vessels Per Square Millimetre or Vessel Groups Per Square Millimetre? *IAWA Journal*, 7(1), 73-74. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000444>
- Wheeler, E. A.** (2011). Inside Wood – A Web resource for hardwood anatomy. *IAWA Journal*, 32(2), 199-211. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000051>
- Wheeler, E. A., Baas, P., Gasson, P. E.** (1989). *IAWA list of microscopic features for hardwood identification* (Vol. 10). IAWA Leiden. <https://www.academia.edu/download/42652264/IAWA.Hardwood.List.pdf>
- Wheeler, E. A., Lehman, T. M., Gasson, P. E.** (1994). Javelinoxylon, an Upper Cretaceous Dicotyledonous Tree from Big Bend National Park, Texas, with Presumed Malvacean Affinities. *American Journal of Botany*, 81(6), 703-710. <https://doi.org/10.2307/2445648>
- Woodcock, D. W., Meyer, H. W., Prado, Y.** (2017). The Piedra Chamana fossil woods (Eocene, Peru). *IAWA Journal*, 38, 313–365. <https://doi.org/10.1163/22941932-20170175>

Artículo original

Una nota acerca del método de la función inversa de codificación de redes

A note on the inverse function method for network coding

 Victor Peña-Macías

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

Resumen

La teoría de codificación de redes estudia la transmisión de mensajes a través de un grafo dirigido o red, de tal manera que los destinatarios previstos los reciban claramente. Es importante determinar la mejor forma de transmitir mensajes, lo cual se mide mediante una tasa. El método de la función inversa es una técnica que involucra la construcción de transformaciones lineales que cumplen ciertas condiciones asociadas con la topología de una red. Según la estructura de la red, el método funcionaría al producir una desigualdad propia del álgebra lineal, lo que a su vez brindaría información acerca del comportamiento de la tasa con respecto a un espacio vectorial sobre un cuerpo finito. Se demuestra aquí que el método puede usarse con la red conocida como Char-2, el cual produce una desigualdad válida en espacios vectoriales definidos sobre cuerpos de característica impar.

Palabras clave: Grafo acíclico dirigido; Transformación lineal; Codificación lineal de redes; Desigualdades rango lineales; Capacidad de red.

Abstract

Network coding focuses on studying the transmission of messages through a directed graph or network in such a way that they are received by their intended receivers. It is of interest to determine the best way to transmit messages, which is measured by a rate. The inverse function method is a technique that involves the construction of linear functions that satisfy certain conditions associated with the topology in a network. Depending on the network structure, the method could succeed in producing an inequality inherent to linear algebra, which in turn provides information about the behavior of the rate with respect to a vector space over a finite field. This paper shows that the method can be used with the network known as Char-2, resulting in a valid inequality in vector spaces defined over odd-characteristic fields.

Keywords: Directed acyclic graph; Linear function; Linear network coding; Linear rank inequality; Network capacity.

Introducción

La teoría de codificación de redes conocida en inglés como *network coding* fue introducida por Ahlswede et al. en el año 2000. En esta área se estudia un grafo dirigido o red en el cual hay ciertos nodos que poseen algunos mensajes que están siendo demandados por otros nodos. Los mensajes deben ser combinados o codificados a lo largo de la red hasta que sean decodificados por los nodos demandantes (Ahlswede et al., 2000). Existen diferentes modelos matemáticos que ofrecen una visión del estudio de este problema, haciendo uso diversas herramientas de la teoría de grafos, topología, álgebra lineal, álgebra abstracta, teoría de modelos, teoría de números, teoría de códigos y teoría de la información. Su problema más importante consiste en determinar códigos eficientes que cumplan la demanda de todos los nodos que soliciten un mensaje. La eficiencia de un código depende de la forma de los

Citación: Peña-Macías V. Una nota acerca del método de la función inversa de codificación de redes. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(189):936-951, octubre-diciembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.3018>

Editor: Jorge Cossio

***Correspondencia:**

Victor Peña-Macías;
vbpenam@udistrital.edu.co

Recibido: 30 de julio de 2024

Aceptado: 18 de noviembre de 2024

Publicado en línea: 29 de noviembre de 2024



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

mensajes usados y se mide con una tasa; se requieren tasas de información grandes y la mejor tasa se le conoce como la capacidad de la red. La teoría de la información, mediante el concepto de entropía y las llamadas desigualdades de la información, ha sido una gran herramienta para establecer cotas o límites que deben cumplir las capacidades (**Dougherty, Freiling, & Zeger, 2007**).

Cuando los mensajes son dotados de estructuras algebraicas, tales como cuerpos, anillos o espacios vectoriales el proceso de codificación se hace más sencillo y eficiente pero sigue teniendo un amplio margen de estudio con una cantidad de problemas abiertos. Este documento está interesado en códigos con estructuras de espacios vectoriales finito dimensionales definidos sobre un cuerpo finito. Las *desigualdades de la información* tienen una estrecha relación con unas desigualdades propias del álgebra lineal conocidas como *desigualdades rango lineales* (**Shen et al., 2000**). Estas últimas son desigualdades que establecen las leyes o condiciones que deben cumplir las dimensiones de unos espacios con respecto a las dimensiones de otros. Algunos conceptos de álgebra lineal tienen su contraparte en la teoría de la información: la dimensión de un espacio es su entropía, la codimensión se interpreta como la entropía condicional y la dimensión de la intersección de subespacios como la información mutua. De ahí, las desigualdades rango lineales son importantes al estudiar la capacidad de una red cuyos códigos tienen una estructura de espacio vectorial (**Dougherty, Freiling, & Zeger, 2005**).

Existen desigualdades rango lineales que solo son válidas dependiendo de la característica del cuerpo finito del espacio vectorial. Son conocidas como *desigualdades rango lineales dependientes de la característica* (**Blasiak, Kleinberg, & Lubetzky, 2011**) y (**Dougherty, Freiling, & Zeger, 2015**). Se consideran las desigualdades ideales si se desea estudiar la capacidad de una red sobre cuerpos finitos específicos. En la literatura se han encontrado tres técnicas para producir estas desigualdades:

- La primera técnica construye desigualdades siempre que existan cierto tipo de matrices binarias (**Peña-Macias & Sarria-Zapata, 2019**) y (**Peña-Macias & Sarria, 2020**).
- La segunda técnica permite obtener una desigualdad usando algunas redes como guía del razonamiento que se debe seguir. Fue bautizado por los autores como *el método de la función inversa* debido a que usa transformaciones lineales asignadas en “sentido inverso” al flujo de mensajes en una red (**Dougherty, Freiling, & Zeger, 2015**), (**Freiling, 2014**) y (**Das & Rai, 2017**).
- La tercera técnica construye una desigualdad siempre que existan ciertos tipos de objetos de teoría de matroides y criptografía (**Peña-Macias, 2023**).

La primera y tercera técnica permiten obtener las desigualdades bajo ciertas condiciones muy concretas, pero esto no ocurre con la segunda ya que aún no ha alcanzado un grado suficiente de desarrollo: no es claro si en efecto se producirá una desigualdad. El método de la función inversa involucra a una red y una serie de lemas que garantizan la existencia de espacios vectoriales y transformaciones lineales con algunas propiedades. Lo interesante de esto es la forma en como se operan las transformaciones lineales ya que en principio el método usa la topología de la red en cuestión como guía de los razonamientos que se deben seguir. Dentro del proceso se debe definir un subespacio S que es nulo solo en cuerpos finitos de una característica en concreto. Si se logra conseguir este subespacio, entonces la desigualdad es encontrada y demostrada; de otro modo el método falla. La obtención de este subespacio no es clara y la topología de la red no ayuda en una correcta definición. Las redes usadas como guía en (**Dougherty, Freiling, & Zeger, 2015**), (**Freiling, 2014**) y (**Das & Rai, 2017**) tienen la cualidad de tener mejores capacidades sobre unos cuerpos de determinada característica que sobre otros, y puede ser una razón por la que el método tuvo éxito con estas redes. Aunque, exceptuando las redes *Fano* y *no-Fano*, estas redes fueron introducidas con el propósito de que funcionara el método.

Permanece como problema abierto si la dependencia de la capacidad de una red, sobre un cuerpo finito de determinada característica, es una condición suficiente para producir una desigualdad: si el subespacio S siempre puede ser definido en estas redes. Es por esta razón que el autor está interesado en estudiar la aplicación del método de la función inversa a nuevas redes. En (Connelly & Zeger, 2019) y (Connelly & Zeger, 2016) fueron definidas nuevas familias de redes que presentan dependencias sobre determinados cuerpos y anillos, enfatizando en una familia de redes llamada redes Char- m . Los autores definen una red Char- m para cada entero $m \geq 2$, como se muestra en la figura 1. Además, demuestran mediante razonamientos muy distantes al método de la función inversa, que esas redes tienen mejores capacidades sobre anillos cuya característica divide a m ; concretamente una capacidad de uno. En este trabajo se va a demostrar que el método de la función inversa funciona cuando $m = 2$, de este modo, se establecen bases teóricas que permiten extender el razonamiento para toda la familia de redes Char- m . Se produce una desigualdad rango lineal verdadera en espacios vectoriales definidos sobre cuerpos finito de característica impar y se obtiene de una manera alternativa, los resultados conseguidos en (Connelly & Zeger, 2019) sobre la capacidad de la red Char-2.

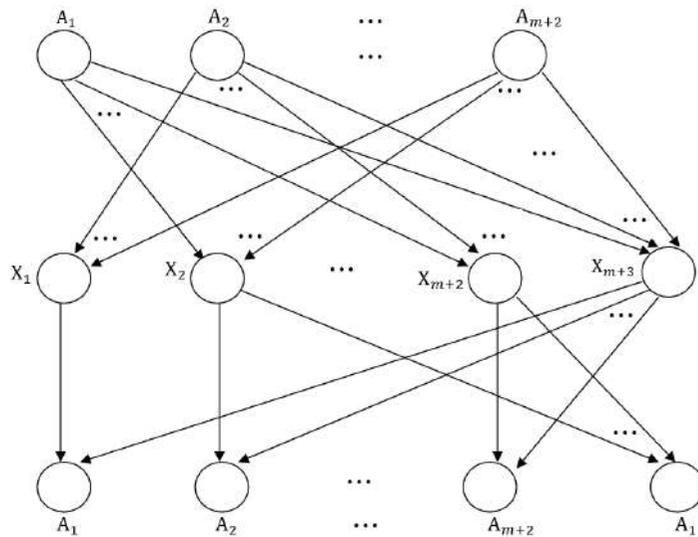


Figura 1. Red Char- m . Una red para cada entero $m \geq 2$. Alcanzan una capacidad de 1 cuando la característica del anillo de sus códigos divide a m ; de otro modo, su capacidad es inferior.

Organización del trabajo: primero se hace una breve introducción a la teoría de codificación de redes omitiendo formalismos. Luego se introduce la codificación lineal y se presenta el problema de codificación de una red en términos de espacios vectoriales. Después se escriben los lemas claves del método de la función inversa y se presenta el teorema principal - Teorema 5 - y su demostración. Como corolario se muestran resultados relacionados con la red Char-2 y algunas conclusiones. Adicional a esto, el autor pretende desarrollar todas las ideas haciendo omisión de conceptos propios de la teoría de la información, de modo que los argumentos recaigan completamente en el álgebra lineal.

Notación: letras mayúsculas $A, B, \dots, A_1, \dots, A_m$, denotan espacios vectoriales de dimensión finita sobre un cuerpo finito. Se denota por $\langle 0 \rangle$ es espacio nulo. Letras f, f_1, f_2, \dots, f_m denotan transformaciones lineales, el 1 y el 0 representan las transformaciones identidad y nula, respectivamente. Para cualesquiera A, B subespacios de un espacio vectorial V , la suma o el subespacio generado por A y B se denota por $A + B$. La dimensión de

$A + B$ se escribe como $\dim(A, B)$. La *codimensión* de A en V se define como $\text{codim}_V A := \dim V - \dim A$, esto es, la cantidad de vectores que le hacen falta a una base de A para generar V .

Desarrollo

A continuación, se presentan conceptos básicos de la teoría de codificación de redes omitiendo algunos formalismos. Una *red* es un grafo dirigido acíclico y conectado. Cada arista del grafo posee dos nodos, uno es su nodo inicial y otro es su nodo final. No se aceptan aristas repetidas. El no tener ciclos permite garantizar la existencia de ciertos nodos llamados fuentes y otros llamados receptores. Un nodo *fuentes* solo le corresponden aristas en donde éste es el nodo inicial; y un nodo *receptor* solo le corresponden aristas en donde éste es el nodo final. Un *mensaje* es una k -tupla de elementos de un conjunto finito llamado *alfabeto*. Cada fuente posee un mensaje que está siendo solicitado por un receptor. Un nodo *intermedio* es aquel que no es fuente ni receptor. Cualquier nodo que no es fuente tiene la capacidad de almacenar un mensaje de n -tuplas de elementos del alfabeto. El mensaje de estos nodos depende o son combinación de los mensajes almacenados en el nodo inicial de todas las aristas en donde éste es un nodo final; en otras palabras, los mensajes de los intermedios y receptores están en función de otros mensajes intermedios y de los mensajes fuentes.

El problema de codificación de una red consiste en encontrar eficientes asignaciones de mensajes o funciones que le permitan a los nodos receptores recibir los mensajes solicitados. Una asignación de mensaje se denomina (k, n) -*código* y su eficiencia se mide con la tasa k/n . Se buscan tasas grandes, por lo que la *capacidad de la red* es el supremo del conjunto de todas las tasas de un código. Muchos problemas de codificación de red involucran grafos en los cuales solo hay un camino que conecta una fuente con un receptor que requiere su mensaje, en estas redes la capacidad nunca es superior a uno (**Dougherty, Freiling, & Zeger, 2005**). Una red es soluble cuando su capacidad es exactamente uno y existe un código con esta tasa.

Cuando los mensajes involucrados en la red son vectores, el problema de codificación de una red se puede escribir de una manera alternativa. Los mensajes son reemplazados por subespacios de un espacio vectorial de dimensión finita y cada receptor solicita uno de estos. De este modo, el problema consiste en encontrar una tupla de subespacios que cumplan las siguientes condiciones:

- Cada fuente tiene asociado un subespacio de dimensión k y cada uno es independiente de los otros. Es decir, cualquier vector no nulo de un subespacio no es combinación lineal de vectores del espacio generado por la suma de subespacios asignados a las otras fuentes.
- Cada nodo que no es fuente tiene asociado un subespacio de dimensión a lo mucho n que está contenido en la suma de los subespacios que se asocian al nodo inicial de todas las aristas en donde él es un nodo final.
- El subespacio asociado a un receptor debe contener como subconjunto el subespacio que solicita.

Un (k, n) -*código lineal* es una tupla de tales subespacios. También, se requieren tasas eficientes y el supremo de todas se conoce como la capacidad lineal de la red.

En la figura 2 (izquierda) se presenta un ejemplo, con una red soluble conocida como *la red mariposa*. El código del centro funciona sobre cualquier cualquier cuerpo finito; incluso sobre cualquier estructura de grupo. El código de la derecha está escrito en términos de espacios vectoriales y es un $(1, 1)$ -código lineal. Se hace notar que el espacio X se genera por $(1, 1)$ que es combinación lineal de $(1, 0)$ y $(0, 1)$. El espacio B se genera por $(0, 1)$ que es

combinación lineal de $(1, 0)$ y $(1, 1)$. El espacio A se genera por $(1, 0)$ que es combinación lineal de $(1, 1)$ y $(0, 1)$. Con el ánimo de manifestar la importancia de las desigualdades rango lineales, se hace el siguiente análisis. Cualquier (k, n) -código lineal de la red mariposa cumple que $\dim A = \dim B = k$, $\dim(A, B) = 2k$, $\dim(X) \leq n$, $X \leq A + B$, $A \leq B + X$ y $B \leq A + X$. De modo que

$$\begin{aligned} 2k &= \dim(A, B) \\ &\leq \dim(A, B, X) && \text{[desigualdad rango lineal]} \\ &= \dim(A, X) \\ &\leq \dim A + \dim X && \text{[desigualdad rango lineal]} \\ &\leq k + n. \end{aligned}$$

Esto implica que

$$\frac{k}{n} \leq 1.$$

En general, los razonamientos usados tanto con desigualdades de la información como con desigualdades rango lineales son de este estilo. Las desigualdades establecen cotas sobre las tasas o capacidad y luego se busca alcanzar esa cota con un código.

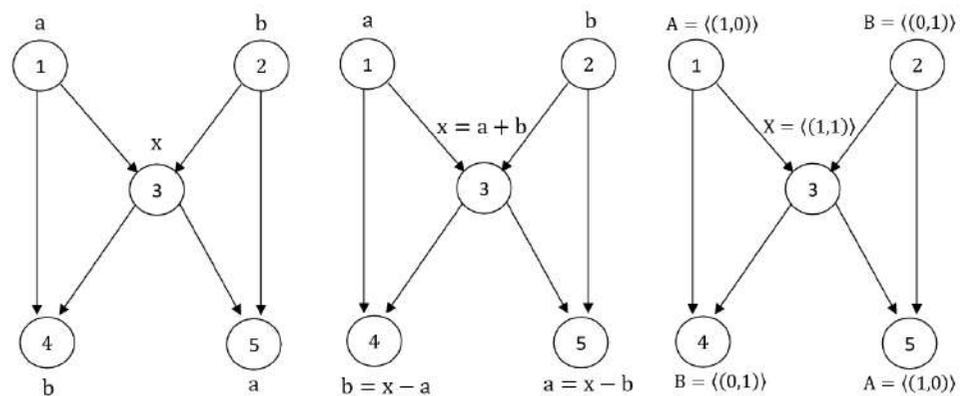


Figura 2. Izquierda: Red mariposa. Centro: Una solución sobre cualquier cuerpo finito. Derecha: Una solución en términos de subespacios.

Los Lemas 1-4 son usados para desarrollar el método de la función inversa. Las pruebas se encuentran en (Dougherty, Freiling, & Zeger, 2015).

Lema 1. Para cualesquiera subespacios A_1, \dots, A_m de un espacio vectorial de dimensión finita V ,

$$\text{codim}_V \bigcap_{i \leq m} A_i \leq \sum_{i \leq m} \text{codim}_V A_i.$$

Lema 2. Sean A y B espacios vectoriales finito dimensionales y $f : A \rightarrow B$ una transformación lineal. Considere un subespacio B' de B , entonces

$$\text{codim}_A f^{-1}(B') \leq \text{codim}_B B'.$$

El siguiente lema garantiza la existencia de las transformaciones lineales con las cuales puede trabajar el método.

Lema 3. Sean A_1, \dots, A_m, B subespacios de un espacio vectorial de dimensión finita V . Entonces existen m transformaciones lineales de la forma $f_i : B \rightarrow A_i, i \leq m$, tales que $f_1 + \dots + f_m = 1$ en un subespacio de B cuya codimensión en B es $\text{codim}_{A_1, \dots, A_k, B}(A_1, \dots, A_k)$.

Una vez se tienen las transformaciones lineales, el lema de abajo garantiza la existencia de subespacios convenientes. Nótese que todos estos lemas aportan cotas superiores sobre la codimensión.

Lema 4. Para cualesquiera subespacios A, B_1, \dots, B_m de un espacio vectorial finito dimensional V y m transformaciones lineales $f_i : A \rightarrow B_i, i \leq m$, tales que $f_1 + \dots + f_m = 0$. Se verifica que $f_1 = \dots = f_m = 0$ en un subespacio de A cuya codimensión en A es a lo sumo $\dim B_1 + \dots + \dim B_m - \dim (B_1, \dots, B_m)$.

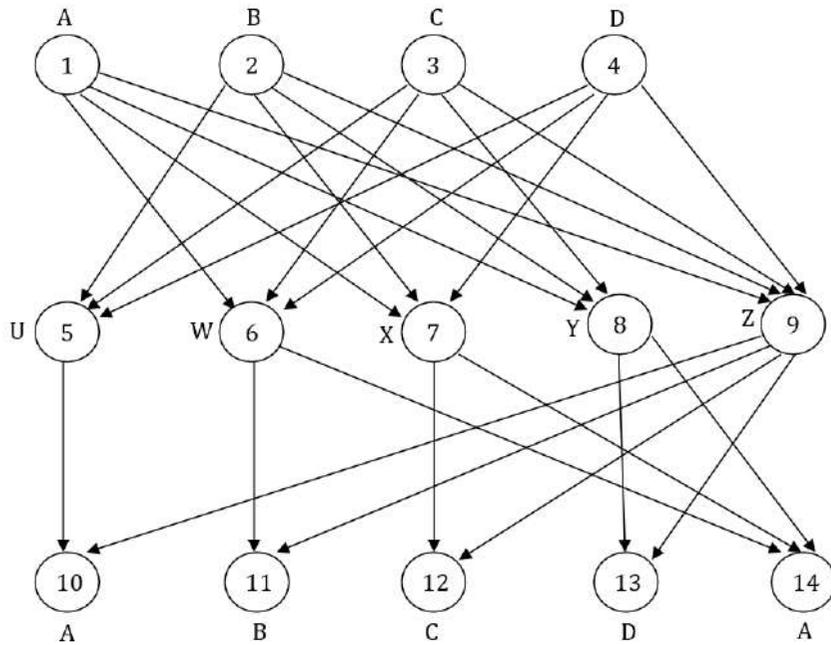


Figura 3. Red Char-2. Soluble únicamente sobre cuerpos finitos de característica par.

La red de la figura 3 se conoce como la red Char-2 y es una red Char- m cuando se toma $m = 2$. Tiene la cualidad de ser soluble cuando los códigos se definen sobre cuerpos finitos de característica par. En característica impar no lo es y se conoce que tiene una cota superior sobre la capacidad de $\frac{6}{7}$ (Connelly & Zeger, 2016). La demostración del Teorema 5 usa el método de la función inversa tomando esta red como guía del razonamiento a seguir. La figura 4 modifica la red invirtiendo sus aristas solo con el fin de facilitar este razonamiento.

Teorema 5. Para cualesquiera subespacios A, B, C, D, W, X, Y y Z de un espacio vectorial de dimensión finita V sobre un cuerpo finito cuya característica es impar, se verifica la siguiente desigualdad:

$$\begin{aligned}
 & 13 \dim(A, B, C, D) + 2 \dim(A, B, C) + 2 \dim(A, B, D) + 2 \dim(A, C, D) \\
 & + 3 \dim(B, C, D) + \dim(W, X, Y) + \dim(W, Z) + \dim(Y, Z) + \dim(X, Z) + 3 \dim(U, Z) \\
 & \leq 3 \dim A + 6 \dim B + 6 \dim C + 6 \dim D + \dim W + \dim X + \dim Y + 3 \dim Z \\
 & \quad + 3 \dim(A, U, Z) + \dim(B, W, Z) + \dim(C, X, Z) + \dim(D, Y, Z) \\
 & \quad + 2 \dim(A, C, D, W) + 2 \dim(A, B, D, X) + 2 \dim(A, B, C, Y) \\
 & \quad + 3 \dim(B, C, D, U) + \dim(A, W, X, Y) + 6 \dim(A, B, C, D, Z).
 \end{aligned}$$

Además, en general la desigualdad es falsa cuando la característica del cuerpo es par.

Demostración. El Lema 3 permite garantizar la existencia de 27 transformaciones lineales

$$\begin{aligned} f_1 : U \rightarrow B, & \quad f_2 : U \rightarrow C, & \quad f_3 : U \rightarrow D, & \quad f_4 : W \rightarrow A, & \quad f_5 : W \rightarrow C, & \quad f_6 : W \rightarrow D, \\ f_7 : X \rightarrow A, & \quad f_8 : X \rightarrow B, & \quad f_9 : X \rightarrow D, & \quad f_{10} : Y \rightarrow A, & \quad f_{11} : Y \rightarrow B, & \quad f_{12} : Y \rightarrow C, \\ f_{13} : Z \rightarrow A, & \quad f_{14} : Z \rightarrow B, & \quad f_{15} : Z \rightarrow C, & \quad f_{16} : Z \rightarrow D, & \quad f_{17} : A \rightarrow U, & \quad f_{18} : A \rightarrow Z, \\ f_{19} : B \rightarrow W, & \quad f_{20} : B \rightarrow Z, & \quad f_{21} : C \rightarrow X, & \quad f_{22} : C \rightarrow Z, & \quad f_{23} : D \rightarrow Y, & \quad f_{24} : D \rightarrow Z, \\ f_{25} : A \rightarrow W, & \quad f_{26} : A \rightarrow X, & \quad f_{27} : A \rightarrow Y, \end{aligned}$$

tales que

- $f_1 + f_2 + f_3 = 1$ en un subespacio U' de U con

$$\text{codim}_U U' \leq \text{codim}_{U,B,C,D}(B, C, D). \quad (1)$$

- $f_4 + f_5 + f_6 = 1$ en un subespacio W' de W con

$$\text{codim}_W W' \leq \text{codim}_{W,A,C,D}(A, C, D). \quad (2)$$

- $f_7 + f_8 + f_9 = 1$ en un subespacio X' de X con

$$\text{codim}_X X' \leq \text{codim}_{X,A,B,D}(A, B, D). \quad (3)$$

- $f_{10} + f_{11} + f_{12} = 1$ en un subespacio Y' de Y con

$$\text{codim}_Y Y' \leq \text{codim}_{Y,A,B,C}(A, B, C). \quad (4)$$

- $f_{13} + f_{14} + f_{15} + f_{16} = 1$ en un subespacio Z' de Z con

$$\text{codim}_Z Z' \leq \text{codim}_{Z,A,B,C,D}(A, B, C, D). \quad (5)$$

- $f_{17} + f_{18} = 1$ en un subespacio A' de A con

$$\text{codim}_A A' \leq \text{codim}_{A,U,Z}(U, Z). \quad (6)$$

- $f_{19} + f_{20} = 1$ en un subespacio B' de B con

$$\text{codim}_B B' \leq \text{codim}_{B,W,Z}(W, Z). \quad (7)$$

- $f_{21} + f_{22} = 1$ en un subespacio C' de C con

$$\text{codim}_C C' \leq \text{codim}_{C,X,Z}(X, Z). \quad (8)$$

- $f_{23} + f_{24} = 1$ en un subespacio D' de D con

$$\text{codim}_D D' \leq \text{codim}_{D,Y,Z}(Y, Z). \quad (9)$$

- $f_{25} + f_{26} + f_{27} = 1$ en un subespacio A^* de A con

$$\text{codim}_A A^* \leq \text{codim}_{A,W,X,Y}(W, X, Y). \quad (10)$$

En la figura 4 se ha invertido la red Char-2 y se han etiquetado convenientemente sus aristas con las transformaciones definidas. Ahora se busca encontrar transformaciones de A en A que resulten de operaciones de composición y suma de estas transformaciones. Como ayuda para ubicar rápidamente estas transformaciones se fija el nodo 10 y se ubican todos los caminos que van hasta el nodo 1, las transformaciones requeridas son las asignadas a las aristas de estos caminos. Luego, se buscan todas las transformaciones de A en B ubicando todos los caminos que van del nodo 10 al nodo 2. Después buscamos los caminos que van del nodo 10 al nodo 3 para ubicar las transformaciones de A en C y por último los caminos que van del nodo 10 al nodo 4 para ubicar las transformaciones de A en D .

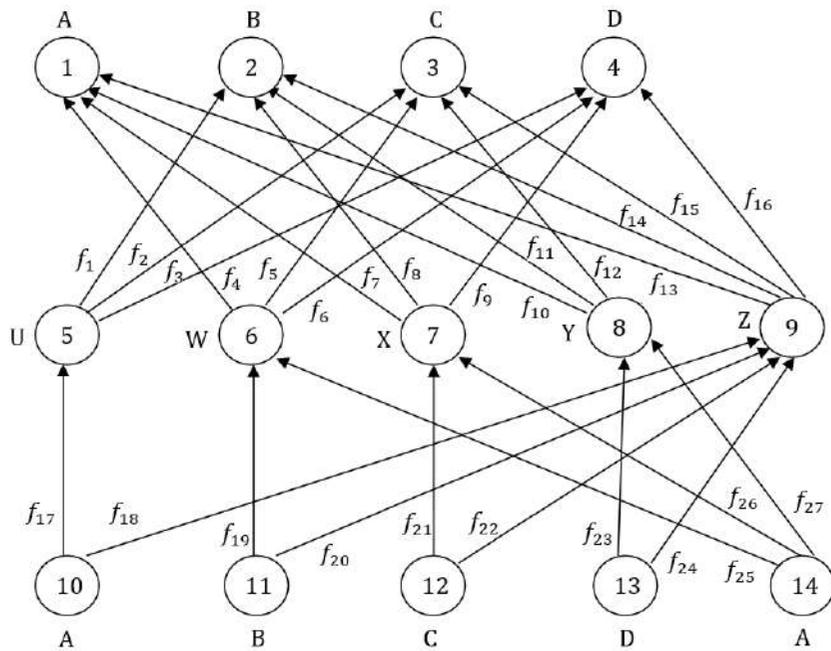


Figura 4. Red Char-2 invertida y con una transformación lineal asociada a cada arista.

Se consiguen entonces las transformaciones

$$\begin{aligned}
 f_{13}f_{18} &: A \rightarrow A \\
 f_1f_{17} + f_{14}f_{18} &: A \rightarrow B \\
 f_2f_{17} + f_{15}f_{18} &: A \rightarrow C \\
 f_3f_{17} + f_{16}f_{18} &: A \rightarrow D
 \end{aligned}$$

que cumplen la ecuación

$$f_{13}f_{18} + f_1f_{17} + f_{14}f_{18} + f_2f_{17} + f_{15}f_{18} + f_3f_{17} + f_{16}f_{18} = 1$$

en un subespacio $A'' = A' \cap f_{17}^{-1}(U') \cap f_{18}^{-1}(Z')$, y de los Lemas 1 y 2 se tiene

$$\begin{aligned}
 \text{codim}_A A'' &\leq \text{codim}_A A' + \text{codim}_A f_{17}^{-1}(U') + \text{codim}_A f_{18}^{-1}(Z') \\
 &\leq \text{codim}_A A' + \text{codim}_U U' + \text{codim}_Z(Z') \\
 &\leq \text{codim}_{A,U,Z}(U, Z) + \text{codim}_{U,B,C,D}(B, C, D) \\
 &\quad + \text{codim}_{Z,A,B,C,D}(A, B, C, D). \quad [\text{de (1), (5) y (6)}] \quad (11)
 \end{aligned}$$

Aplicando el Lema 4 a

$$\begin{aligned} f_{13}f_{18} - 1 \\ f_1f_{17} + f_{14}f_{18} \\ f_2f_{17} + f_{15}f_{18} \\ f_3f_{17} + f_{16}f_{18} \end{aligned}$$

se consigue un subespacio \bar{A} de A'' tal que

$$\begin{aligned} f_{13}f_{18} &= 1 \\ f_1f_{17} + f_{14}f_{18} &= 0 \\ f_2f_{17} + f_{15}f_{18} &= 0 \\ f_3f_{17} + f_{16}f_{18} &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

y la desigualdad

$$\begin{aligned} \text{codim}_A \bar{A} &= \text{codim}_A A'' + \text{codim}_{A''} \bar{A} \\ &\leq \Delta_A := \text{codim}_{A,U,Z}(U,Z) + \text{codim}_{U,B,C,D}(B,C,D) + \text{codim}_{Z,A,B,C,D}(A,B,C,D) \\ &\quad + \dim A + \dim B + \dim C + \dim D - \dim(A,B,C,D). \quad [\text{de (11)}] \end{aligned} \quad (13)$$

Se debe repetir el proceso previo cuatro veces más definiendo transformaciones cuyos dominios sean B del nodo 11, C del nodo 12, D del nodo 13 y A del nodo 14, respectivamente. Se puede usar la topología de la red de la figura 4 tal y como se hizo anteriormente, como guía del razonamiento a seguir. Las transformaciones

$$\begin{aligned} f_4f_{19} + f_{13}f_{20} &: B \rightarrow A \\ f_{14}f_{20} &: B \rightarrow B \\ f_5f_{19} + f_{15}f_{20} &: B \rightarrow C \\ f_6f_{19} + f_{16}f_{20} &: B \rightarrow D \end{aligned}$$

cumplen la ecuación

$$f_4f_{19} + f_{13}f_{20} + f_{14}f_{20} + f_5f_{19} + f_{15}f_{20} + f_6f_{19} + f_{16}f_{20} = 1$$

en un subespacio $B'' = B' \cap f_{19}^{-1}(W') \cap f_{20}^{-1}(Z')$, y de los Lemas 1 y 2 se tiene

$$\begin{aligned} \text{codim}_B B'' &\leq \text{codim}_{B,W,Z}(W,Z) + \text{codim}_{W,A,C,D}(A,C,D) \\ &\quad + \text{codim}_{Z,A,B,C,D}(A,B,C,D). \quad [\text{de (2), (5) y (7)}] \end{aligned} \quad (14)$$

Aplicando el Lema 4 a

$$\begin{aligned} f_4f_{19} + f_{13}f_{20} \\ f_{14}f_{20} - 1 \\ f_5f_{19} + f_{15}f_{20} \\ f_6f_{19} + f_{16}f_{20} \end{aligned}$$

se consigue un subespacio \bar{B} de B'' tal que

$$\begin{aligned} f_4f_{19} + f_{13}f_{20} &= 0 \\ f_{14}f_{20} &= 1 \\ f_5f_{19} + f_{15}f_{20} &= 0 \\ f_6f_{19} + f_{16}f_{20} &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

y la desigualdad

$$\begin{aligned} \text{codim}_B \bar{B} &\leq \Delta_B := \text{codim}_{B,W,Z}(W,Z) + \text{codim}_{W,A,C,D}(A,C,D) + \text{codim}_{Z,A,B,C,D}(A,B,C,D) \\ &\quad + \dim A + \dim B + \dim C + \dim D - \dim(A,B,C,D). \quad [\text{de (14)}] \end{aligned} \quad (16)$$

Las transformaciones

$$\begin{aligned} f_7 f_{21} + f_{13} f_{22} &: C \rightarrow A \\ f_8 f_{21} + f_{14} f_{22} &: C \rightarrow B \\ f_{15} f_{22} &: C \rightarrow C \\ f_9 f_{21} + f_{16} f_{22} &: C \rightarrow D \end{aligned}$$

cumplen la ecuación

$$f_7 f_{21} + f_{13} f_{22} + f_8 f_{21} + f_{14} f_{22} + f_{15} f_{22} + f_9 f_{21} + f_{16} f_{22} = 1$$

en un subespacio $C'' = C' \cap f_{21}^{-1}(X') \cap f_{22}^{-1}(Z')$, y de los Lemas 1 y 2 se tiene

$$\begin{aligned} \text{codim}_C C'' &\leq \text{codim}_{C,X,Z}(X, Z) + \text{codim}_{X,A,B,D}(A, B, D) \\ &+ \text{codim}_{Z,A,B,C,D}(A, B, C, D). \quad [\text{de (3), (5) y (8)}] \end{aligned} \tag{17}$$

Aplicando el Lema 4 a

$$\begin{aligned} f_7 f_{21} + f_{13} f_{22} \\ f_8 f_{21} + f_{14} f_{22} \\ f_{15} f_{22} - 1 \\ f_9 f_{21} + f_{16} f_{22} \end{aligned}$$

se consigue un subespacio \bar{C} de C'' tal que

$$\begin{aligned} f_7 f_{21} + f_{13} f_{22} &= 0 \\ f_8 f_{21} + f_{14} f_{22} &= 0 \\ f_{15} f_{22} &= 1 \\ f_9 f_{21} + f_{16} f_{22} &= 0 \end{aligned} \tag{18}$$

y la desigualdad

$$\begin{aligned} \text{codim}_C \bar{C} \leq \Delta_C := \text{codim}_{C,X,Z}(X, Z) + \text{codim}_{X,A,B,D}(A, B, D) + \text{codim}_{Z,A,B,C,D}(A, B, C, D) \\ + \dim A + \dim B + \dim C + \dim D - \dim(A, B, C, D). \quad [\text{de (17)}] \end{aligned} \tag{19}$$

Las transformaciones

$$\begin{aligned} f_{10} f_{23} + f_{13} f_{24} &: D \rightarrow A \\ f_{11} f_{23} + f_{14} f_{24} &: D \rightarrow B \\ f_{12} f_{23} + f_{15} f_{24} &: D \rightarrow C \\ f_{16} f_{24} &: D \rightarrow D \end{aligned}$$

cumplen la ecuación

$$f_{10} f_{23} + f_{13} f_{24} + f_{11} f_{23} + f_{14} f_{24} + f_{12} f_{23} + f_{15} f_{24} + f_{16} f_{24} = 1$$

en un subespacio $D'' = D' \cap f_{23}^{-1}(Y') \cap f_{24}^{-1}(Z')$, y de los Lemas 1 y 2 se tiene

$$\begin{aligned} \text{codim}_D D'' &\leq \text{codim}_{D,Y,Z}(D, Y, Z) + \text{codim}_{Y,A,B,C}(A, B, C) \\ &+ \text{codim}_{Z,A,B,C,D}(A, B, C, D). \quad [\text{de (4), (5) y (9)}] \end{aligned} \tag{20}$$

Aplicando el Lema 4 a

$$\begin{aligned} f_{10} f_{23} + f_{13} f_{24} \\ f_{11} f_{23} + f_{14} f_{24} \\ f_{12} f_{23} + f_{15} f_{24} \\ f_{16} f_{24} - 1 \end{aligned}$$

se consigue un subespacio \bar{D} de D'' tal que

$$\begin{aligned} f_{10} f_{23} + f_{13} f_{24} &= 0 \\ f_{11} f_{23} + f_{14} f_{24} &= 0 \\ f_{12} f_{23} + f_{15} f_{24} &= 0 \\ f_{16} f_{24} &= 1 \end{aligned} \tag{21}$$

y la desigualdad

$$\begin{aligned} \text{codim}_D \bar{D} \leq \Delta_D := & \text{codim}_{D,Y,Z}(Y,Z) + \text{codim}_{Y,A,B,C}(A,B,C) + \text{codim}_{Z,A,B,C,D}(A,B,C,D) \\ & + \dim A + \dim B + \dim C + \dim D - \dim(A,B,C,D). \quad [\text{de (20)}] \end{aligned} \quad (22)$$

Las transformaciones

$$\begin{aligned} f_4 f_{25} + f_7 f_{26} + f_{10} f_{27} &: A \rightarrow A \\ f_8 f_{26} + f_{11} f_{27} &: A \rightarrow B \\ f_5 f_{25} + f_{12} f_{27} &: A \rightarrow C \\ f_6 f_{25} + f_9 f_{26} &: A \rightarrow D \end{aligned}$$

cumplen la ecuación

$$f_4 f_{25} + f_7 f_{26} + f_{10} f_{27} + f_8 f_{26} + f_{11} f_{27} + f_5 f_{25} + f_{12} f_{27} + f_6 f_{25} + f_9 f_{26} = 1$$

en un subespacio $A^{**} = A^* \cap f_{25}^{-1}(W') \cap f_{26}^{-1}(X') \cap f_{27}^{-1}(Y')$, y de los Lemas 1 y 2 se tiene

$$\begin{aligned} \text{codim}_A A^{**} \leq & \text{codim}_{A,W,X,Y}(W,X,Y) + \text{codim}_{W,A,C,D}(A,C,D) \\ & + \text{codim}_{X,A,B,D}(A,B,D) + \text{codim}_{Y,A,B,C}(A,B,C). \quad [\text{de (2), (3), (4) y (10)}] \end{aligned} \quad (23)$$

Aplicando el Lema 4 a

$$\begin{aligned} f_4 f_{25} + f_7 f_{26} + f_{10} f_{27} - 1 \\ f_8 f_{26} + f_{11} f_{27} \\ f_5 f_{25} + f_{12} f_{27} \\ f_6 f_{25} + f_9 f_{26} \end{aligned}$$

se consigue un subespacio \hat{A} de A^{**} tal que

$$\begin{aligned} f_4 f_{25} + f_7 f_{26} + f_{10} f_{27} &= 1 \\ f_8 f_{26} + f_{11} f_{27} &= 0 \\ f_5 f_{25} + f_{12} f_{27} &= 0 \\ f_6 f_{25} + f_9 f_{26} &= 0 \end{aligned} \quad (24)$$

y la desigualdad

$$\begin{aligned} \text{codim}_A \hat{A} \leq \bar{\Delta}_A := & \text{codim}_{A,W,X,Y}(W,X,Y) + \text{codim}_{W,A,C,D}(A,C,D) + \text{codim}_{X,A,B,D}(A,B,D) \\ & + \text{codim}_{Y,A,B,C}(A,B,C) + \dim A + \dim B + \dim C + \dim D - \dim(A,B,C,D). \quad [\text{de (23)}] \end{aligned} \quad (25)$$

En lo sucesivo, la topología de la red no se usa como guía del razonamiento a seguir. Se busca construir un subespacio conveniente S que sea nulo cuando el cuerpo tenga característica impar. Con esto en mente, se definen subespacios y funciones restringidas que proporcionen subespacios en común de A , B , C o D en donde algunas transformaciones puedan ser invertibles:

- Sea $\tilde{A} := f_{18}(\bar{A})$. Usando la primera ecuación de (12) se sigue que $f_{18}|_{\tilde{A}}$ y $f_{13}|_{\tilde{A}}$ son inversas.
- Sea $\tilde{B} := f_{20}(\bar{B})$. Usando la segunda ecuación de (15) se sigue que $f_{20}|_{\tilde{B}}$ y $f_{14}|_{\tilde{B}}$ son inversas.
- Sea $\tilde{C} := f_{22}(\bar{C})$. Usando la tercera ecuación de (18) se sigue que $f_{22}|_{\tilde{C}}$ y $f_{15}|_{\tilde{C}}$ son inversas.
- Sea $\tilde{D} := f_{24}(\bar{D})$. Usando la cuarta ecuación de (21) se sigue que $f_{24}|_{\tilde{D}}$ y $f_{16}|_{\tilde{D}}$ son inversas.

Usando los numerales anteriores, se pueden obtener algunas funciones inyectivas:

- Sea $\check{B} := f_{14}(\check{A} \cap \check{B}) \leq \check{B}$. Entonces f_{20} es inyectiva en \check{B} y $f_{20}(\check{B}) = \check{A} \cap \check{B}$. Así $f_{13}f_{20}$ es inyectiva en \check{B} . De la primera ecuación de (15), se sigue que f_4f_{19} también lo es. Por lo que f_{19} es inyectiva y verifica

$$\dim f_{19}(\check{B}) = \dim \check{B} = \dim(\check{A} \cap \check{B}). \quad (26)$$

- Sea $\check{C} := f_{15}(\check{A} \cap \check{C}) \leq \check{C}$. Entonces f_{22} es inyectiva en \check{C} y $f_{22}(\check{C}) = \check{A} \cap \check{C}$. Así $f_{13}f_{22}$ es inyectiva en \check{C} . De la primera ecuación de (18) se sigue que f_7f_{21} también lo es. Por lo que f_{21} es inyectiva y verifica

$$\dim f_{21}(\check{C}) = \dim \check{C} = \dim(\check{A} \cap \check{C}). \quad (27)$$

- Sea $\check{D} := f_{16}(\check{A} \cap \check{D}) \leq \check{D}$. Entonces f_{24} es inyectiva en \check{D} y $f_{24}(\check{D}) = \check{A} \cap \check{D}$. Así $f_{13}f_{24}$ es inyectiva en \check{D} . De la primera ecuación de (21) se sigue que $f_{10}f_{23}$ también lo es. Por lo que f_{23} es inyectiva y verifica

$$\dim f_{23}(\check{D}) = \dim \check{D} = \dim(\check{A} \cap \check{D}). \quad (28)$$

Ahora ya es posible definir el subespacio de A ,

$$S := \hat{A} \cap S_1 \cap S_2 \cap S_3.$$

donde

$$\begin{aligned} S_1 &= \{s \in A : f_{25}(s) \in f_{19}(\check{B})\} \\ S_2 &= \{s \in A : f_{26}(s) \in f_{21}(\check{C})\} \\ S_3 &= \{s \in A : f_{27}(s) \in f_{23}(\check{D})\}. \end{aligned}$$

Se presentará que $S = \langle 0 \rangle$ en espacios definidos sobre cuerpos de característica impar. Sea $s \in S$. Existen $b \in \check{B}$, $c \in \check{C}$ y $d \in \check{D}$ tales que

$$\begin{aligned} f_{25}(s) &= f_{19}(b) \\ f_{26}(s) &= f_{21}(c) \\ f_{27}(s) &= f_{23}(d). \end{aligned}$$

Entonces

$$f_4f_{19}(b) + f_7f_{21}(c) + f_{10}f_{23}(d) = s \quad [\text{de la primera ecuación de (24)}] \quad (29)$$

$$f_8f_{21}(c) + f_{11}f_{23}(d) = 0 \quad [\text{de la segunda ecuación de (24)}] \quad (30)$$

$$f_5f_{19}(b) + f_{12}f_{23}(d) = 0 \quad [\text{de la tercera ecuación de (24)}] \quad (31)$$

$$f_6f_{19}(b) + f_9f_{21}(c) = 0. \quad [\text{de la cuarta ecuación de (24)}] \quad (32)$$

Por lo que

$$f_{14}f_{22}(c) + f_{14}f_{24}(d) = 0 \quad [\text{de (30) y segundas ecuaciones de (18) y (21)}]$$

$$f_{15}f_{20}(b) + f_{15}f_{24}(d) = 0 \quad [\text{de (31) y terceras ecuaciones de (15) y (21)}]$$

$$f_{16}f_{20}(b) + f_{16}f_{22}(c) = 0. \quad [\text{de (32) y cuartas ecuaciones de (15) y (18)}]$$

La inyectividad de las transformaciones f_{14} , f_{15} y f_{16} sobre los espacios en previamente definidos, permiten conseguir

$$\begin{aligned} f_{22}(c) + f_{24}(d) &= 0 \\ f_{20}(b) + f_{24}(d) &= 0 \end{aligned}$$

$$f_{20}(b) + f_{22}(c) = 0$$

De modo que $f_{22}(c) = f_{24}(d) = -f_{20}(b)$. Por lo que $2f_{20}(b) = 0$ y ya que la característica del cuerpo finito es impar, se sigue que $f_{20}(b) = 0$. De la inyectividad de f_{20} , f_{22} y f_{24} , se puede asegurar que $b = c = d = 0$. Por lo tanto, de (29) se sigue que $s = 0$. Además, se verifica que

$$\begin{aligned} \text{codim}_A S_1 &\leq \text{codim}_W f_{19}(\check{B}) && \text{[del Lema 2]} \\ &= \dim W - \dim(\check{A} \cap \check{B}) + \dim Z - \dim Z && \text{[de (26)]} \\ &= \text{codim}_Z(\check{A} \cap \check{B}) + \dim W - \dim Z \\ &\leq \text{codim}_Z \check{A} + \text{codim}_Z \check{B} + \dim W - \dim Z && \text{[del Lema 1]} \\ &= \dim Z - \dim \check{A} + \dim Z - \dim \check{B} + \dim W - \dim Z && \text{[}f_{18} \text{ y } f_{20} \text{ son inyectivas]} \\ &= \dim A - \dim \check{A} + \dim B - \dim \check{B} + \dim W + \dim Z - \dim A - \dim B \\ &= \text{codim}_A \check{A} + \text{codim}_B \check{B} + \dim W + \dim Z - \dim A - \dim B \\ &\leq \Delta_A + \Delta_B + \dim W + \dim Z - \dim A - \dim B. && \text{[de (13) y (16)]} \end{aligned}$$

De forma semejante,

$$\text{codim}_A S_2 \leq \Delta_A + \Delta_C + \dim X + \dim Z - \dim A - \dim C.$$

$$\text{codim}_A S_3 \leq \Delta_A + \Delta_D + \dim Y + \dim Z - \dim A - \dim D.$$

Finalmente,

$$\begin{aligned} \dim A &= \text{codim}_A S && \text{[ya que } S = \langle 0 \rangle\text{]} \\ &\leq \text{codim}_A \hat{A} + \text{codim}_A S_1 + \text{codim}_A S_2 + \text{codim}_A S_3 && \text{[del Lema 1]} \\ &\leq \bar{\Delta}_A + 3\Delta_A + \Delta_B + \Delta_C + \Delta_D - 3\dim A - \dim B - \dim C - \dim D \\ &\quad + \dim W + \dim X + \dim Y + 3\dim Z. && \text{[de (25) y desigualdades anteriores]} \end{aligned}$$

En resumen,

$$\begin{aligned} 4\dim A + \dim B + \dim C + \dim D &\leq \bar{\Delta}_A + 3\Delta_A + \Delta_B + \Delta_C + \Delta_D \\ &\quad + \dim W + \dim X + \dim Y + 3\dim Z \end{aligned} \quad (33)$$

simplificando las expresiones Δ 's se consigue la desigualdad deseada de nuestro teorema. Además, la desigualdad en general es falsa cuando la característica del cuerpo es par. Defina los espacios 1-dimensionales,

$$\begin{aligned} A &= \langle\langle 1, 0, 0, 0 \rangle\rangle \\ B &= \langle\langle 0, 1, 0, 0 \rangle\rangle \\ C &= \langle\langle 0, 0, 1, 0 \rangle\rangle \\ D &= \langle\langle 0, 0, 0, 1 \rangle\rangle \\ U &= \langle\langle 0, 1, 1, 1 \rangle\rangle \\ W &= \langle\langle 1, 0, 1, 1 \rangle\rangle \\ X &= \langle\langle 1, 1, 0, 1 \rangle\rangle \\ Y &= \langle\langle 1, 1, 1, 0 \rangle\rangle \\ Z &= \langle\langle 1, 1, 1, 1 \rangle\rangle. \end{aligned} \quad (34)$$

Nótese que $\Delta_A = \Delta_B = \Delta_C = \Delta_D = 0$ sin importar la característica pero $\bar{\Delta}_A = 0$ solo si ésta es par ya que

$$\text{codim}_{A,W,X,Y}(W,X,Y) = \begin{cases} 0 & \text{característica par} \\ 1 & \text{característica impar.} \end{cases}$$

Luego, la desigualdad (33) implica la contradicción $7 \leq 6$. \square

La tupla de espacios (34) también funciona como un (1,1)-código lineal de la red Char-2 en cuerpos con característica par. La desigualdad presentada, sirve como una alternativa para encontrar una cota sobre cuerpos con característica impar. Desafortunadamente, no mejora la cota ya conocida.

Corolario 6. *La capacidad lineal de la red Char-2, sobre cuerpos finitos cuya característica es impar, es a lo sumo $\frac{6}{7}$.*

Demostración. Considere los subespacios $A, B, C, D, U, W, X, Y,$ y Z de un (k,n) -código lineal de la red Char-2. Nótese que A, B, C y D tienen dimensión k y su suma dimensión $4k$; $U, W, X, Y,$ y Z deben tener dimensión a lo sumo n ; $U \leq A + B + C, W \leq A + C + D, X \leq A + B + D, Y \leq A + B + C, Z \leq A + B + C + D, A \leq U + Z, B \leq W + Z, C \leq X + Z, D \leq Y + Z$ y $A \leq W + X + Y$. Todo esto permite verificar que $\bar{\Delta}_A = \Delta_A = \Delta_B = \Delta_C = \Delta_D = 0$. Lo que implica que la desigualdad (33) es equivalente a $7k \leq 6n$. De modo que $\frac{6}{7}$ es una cota superior de la tasa $\frac{k}{n}$ y por lo tanto una cota superior de la capacidad lineal sobre cuerpos finitos de característica impar. \square

Ya que hay dos técnicas diferentes que arrojan la misma cota sobre la red Char-2, se podría pensar que $\frac{6}{7}$ es la capacidad sobre cuerpos de característica impar, sin embargo encontrar un código con esta tasa parece ser una tarea no trivial. Aunque, es posible alcanzar una tasa de $\frac{4}{5}$, obteniendo una brecha aproximada de 5,7% respecto a $\frac{6}{7}$, mediante el siguiente (4,5)-código lineal válido sobre cualquier cuerpo finito:

$$a = (a_1, a_2, a_3, a_4)$$

$$b = (b_1, b_2, b_3, b_4)$$

$$c = (c_1, c_2, c_3, c_4)$$

$$d = (d_1, d_2, d_3, d_4)$$

$$u = (b_1 + c_1 + d_1, b_2 + c_2 + d_2, b_3 + c_3 + d_3, b_4 + c_4 + d_4)$$

$$w = (a_1 + c_1 + d_1, a_2 + c_2 + d_2, a_3 + c_3 + d_3, a_4 + c_4 + d_4, a_2)$$

$$x = (a_1 + d_1, a_2 + b_2 + d_2, a_3 + b_3 + d_3, a_4 + b_4 + d_4, a_3)$$

$$y = (a_1 + c_1, a_2 + b_2 + c_2, a_3 + b_3 + c_3, a_4 + b_4 + c_4, a_4)$$

$$z = (a_1 + b_1 + c_1 + d_1, a_2 + b_2 + c_2 + d_2, a_3 + b_3 + c_3 + d_3, a_4 + b_4 + c_4 + d_4, b_1).$$

En efecto, el nodo 10 puede usar los mensajes u y z , por lo que a se recupera con $a = z^* - u$, donde z^* representa las primeras cuatro componentes de z . El nodo 11 puede usar los mensajes w y z , por lo que b se recupera con $b = z^* - w^*$, donde w^* representa las primeras cuatro componentes de w . El nodo 12 puede usar los mensajes x y z , por lo que c se recupera con $c = z^* - x^*$, donde

$$x^* = (a_1 + b_1 + d_1, a_2 + b_2 + d_2, a_3 + b_3 + d_3, a_4 + b_4 + d_4, a_3).$$

El nodo 13 puede usar los mensajes y y z , por lo que d se recupera con $d = z^* - y^*$, donde

$$y^* = (a_1 + b_1 + c_1, a_2 + b_2 + c_2, a_3 + b_3 + c_3, a_4 + b_4 + c_4, a_4).$$

El nodo 14 puede usar los mensajes w, x e y , por lo que a se recupera de la siguiente forma: a_1 es la primera componente de $y - w + x$. Mientras que a_2, a_3 y a_4 son la cuarta componente de w, x e y , respectivamente. Todas las operaciones involucradas son lineales.

Conclusiones

En este documento se estudia el método de la función inversa de la teoría de codificación de redes que consiste en una técnica para demostrar la existencia de desigualdades rango lineales que depende de la característica del cuerpo finito donde se definen los espacios vectoriales involucrados. Con el fin de dar mayor claridad de cuando es posible aplicar el método, se trabajó con la red Char-2 obteniendo una desigualdad que es verdadera en espacios vectoriales definidos sobre cuerpos finitos de característica impar. Si bien aún no es posible definir condiciones concretas que indiquen cuando el método producirá una desigualdad o no, se abre camino para que la respuesta sea afirmativa en el caso de la familia de redes Char-m.

Agradecimientos

El autor agradece el soporte proporcionado por Minciencias en Conv. 727.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses con respecto al contenido de este artículo.

References

- Ahlsvede, R., Cai, N., Li, S.-Y. R., Yeung, R. W. (2000) Network information flow. *IEEE Transactions on Information Theory*, 46, 1204–1216. <https://doi.org/10.1109/18.850663>
- Blasiak, A., Kleinberg, R., Lubetzky, E. (2011) Lexicographic products and the power of non-linear network coding. *2011 IEEE 52nd Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, 609–618. <https://doi.org/10.1109/FOCS.2011.39>
- Connelly, J., Zeger, K. (2016) A class of non-linearly solvable networks. *2016 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, 1964–1968. <https://doi.org/10.1109/ISIT.2016.7541642>
- Connelly, J., Zeger, K. (2019) Capacity and achievable rate regions for linear network coding over ring alphabets. *IEEE Transactions on Information Theory*, 65(1), 220–234. <https://doi.org/10.1109/TIT.2018.2866244>
- Das, N., Rai, B. K. (2017) On the dependence of linear coding rates on the characteristic of the finite field. *arXiv:1709.05970*.
- Dougherty, R., Freiling, C., Zeger, K. (2005) Insufficiency of linear coding in network information flow. *IEEE Transactions on Information Theory*, 51(8), 2745–2759. <https://doi.org/10.1109/TIT.2005.851744>
- Dougherty, R., Freiling, C., Zeger, K. (2007) Networks, matroids, and non-shannon information inequalities. *IEEE Transactions on Information Theory*, 3(6), 1949–1969. <https://doi.org/10.1109/TIT.2007.896862>
- Dougherty, R., Freiling, C., Zeger, K. (2015) Achievable rate regions for network coding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 61(5), 2488–2509. <https://doi.org/10.1109/TIT.2015.2403315>
- Freiling, E. F. (2014) *Characteristic dependent linear rank inequalities and applications to network coding*. Dissertation for the doctoral degree, University of California, San Diego.
- Peña-Macías, V. (2023) Access structures for finding characteristic-dependent linear rank inequalities. *Kybernetika - International Journal of Institute of Information Theory and Automation*, 59(2), 198–208. <https://doi.org/10.14736/kyb-2023-2-0198>

- Peña-Macias, V., Sarria, H.** (2020) Characteristic-dependent linear rank inequalities via complementary vector spaces. *Journal of Information and Optimization Sciences*, 42(2), 345–369. <https://doi.org/10.1080/02522667.2019.1668157>
- Peña-Macias, V., Sarria-Zapata, H.** (2019) Characteristic-dependent linear rank inequalities in 21 variables. *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(169), 764–770. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.928>
- Shen, A., Hammer, D., Romashchenko, A. E., Vereshchagin, N. K.** (2000) Inequalities for shannon entropy and kolmogorov complexity. *Journal of Computer and Systems Sciences*, 60, 442–464. <https://doi.org/10.1006/jcss.1999.1677>

Ensayo/ Assay

Nobel 2024 en Fisiología o Medicina para los microARN

Nobel 2024 in Physiology or Medicine for microRNAs

Este año el premio Nobel en Fisiología y Medicina fue otorgado a Victor Ambros y Gary Ruvkun por el descubrimiento de los microARNs y la elucidación de su función en la célula (Nobel Foundation, The Nobel Committee for Medicine, The Royal Swedish Academy of Sciences (2024)). El descubrimiento no es muy reciente. Los dos eran posdoctorantes durante los años 80 en el laboratorio de H. Robert Horwitz (premio Nobel 2002). El laboratorio estudiaba el desarrollo embrionario y usaba como modelo un pequeño gusano, el *Caenorhabditis elegans*. El nombre del gusanito es más largo que él; mide apenas 1 mm y tiene 959 células que se pueden ver e identificar bajo el microscopio. A pesar de ser tan pequeño tiene neuronas, intestino, hígado y otros órganos bien diferenciados, y por eso lo usaban como modelo para estudiar la diferenciación celular y el desarrollo de los órganos.

En el laboratorio encontraron y coleccionaron muchos mutantes con diversas anomalías en el proceso de diferenciación y, como corresponde, se repartieron el trabajo, cada uno tratando de profundizar en qué consistía la mutación que le correspondió. Al final del posdoctorado, ya vinculados como profesores a diferentes instituciones, los dos siguieron investigando con sus propios grupos, cada uno con su mutación.

En esos años los principios básicos de la biología molecular ya estaban bien establecidos. Se sabía que la información genética está inscrita en largas secuencias de las cuatro letras químicas del ADN, formando cadenas de dos hebras complementarias que se encuentran en los cromosomas que en las células eucariotes se localizan en el núcleo. Que esa información era transcrita a moléculas mensajeras de ARN (también de cuatro letras), pero de una sola cadena, y eran llevadas al citoplasma donde una maquinaria sofisticada las traducía a proteínas de 20 letras (aminoácidos). Las proteínas ejercen todas, o casi todas, las funciones del ser vivo: administran la energía, sintetizan y degradan, mueven, en fin, cuanto podemos hacer.

También se sabía por entonces que todas las células del organismo contienen su información completa. Sin embargo, a pesar de que todas tienen la misma información, durante el desarrollo asumen tareas muy diferentes, unas se vuelven hueso mientras otras se convierten en cerebro y algunas en hígado o en páncreas, en ojo o en piel. Ya entonces se había descubierto que ese fenómeno se debía a que diferentes genes se activan o inactivan

Victor Ambros



Victor Ambros. Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

Gary Ruvkun



Gary Ruvkun. Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

Tomado de <https://www.nobelprize.org/all-nobel-prizes-2024/>

en momentos diferentes y en diferente extensión, y que dicha activación diferencial la llevan a cabo unas proteínas que definieron como activadoras o inactivadoras de la transcripción, es decir, de la síntesis de los mensajeros. Constataron, asimismo, que la presencia y la abundancia de una proteína específica dependía de la cantidad del mensajero específico presente en determinado momento en la célula.

En una entrevista reciente Ambros cuenta que no tenían muchas razones para creer que el cuento fuera más complicado que eso. Pero, al estudiar el gen mutante que le había correspondido (*lin-4*) con técnicas genéticas más novedosas, encontró, con mucha sorpresa, que la mutación sucedía en un fragmento pequeñísimo de ADN, de apenas 21 nucleótidos, lo que no alcanzaba para que codificara una proteína, pero que era transcrito a un ARN pequeñísimo, un microARN (Lee *et al.*, 1993; Moss *et al.*, 1997).

Más se sorprendieron todavía cuando encontraron que la secuencia de ese ARN era antisentido. El ADN tiene dos cadenas complementarias, una tiene sentido, que es la que terminará traducida a proteínas, la otra es antisentido. No tiene significado, pero tiene gran afinidad por la otra y en condiciones apropiadas se une a ella en forma parecida al ADN, dando lugar al ARN de doble cadena.

Otro hecho que se conocía entonces es que hay enzimas en las células que destruyen muy rápidamente el ARN de doble cadena. Se conocían unas moléculas, a las cuales llamaron ARN de interferencia, que se unían a ARN diversos y generaban su degradación por parte de las enzimas mencionadas.

Atando cabos, Ambros propuso la hipótesis de que los microARN actuaban en forma parecida y constituían otro mecanismo, adicional a los bien conocidos factores de transcripción, para regular la diferenciación celular y el desarrollo de órganos. Eso le generaba una mayor complejidad al proceso, pero fue una complejidad bien recibida, porque cada vez parecía más difícil que un proceso como la diferenciación, con tantas sutiles diferencias en expresión de proteínas, dependiera solo de una limitada batería de factores de transcripción.

Según el modelo que imaginó, se producirían en cierto momento los microARN que se unirían a los mensajeros con secuencia complementaria formando ARN de doble cadena, inactivándolos y así suspendiendo la síntesis de la proteína correspondiente. Como anoté antes, la cantidad de una proteína en la célula depende de la cantidad de ARN mensajero presente (y de su tiempo de vida medio). Con la propuesta de Ambros la cantidad de mensajero es el resultante de su síntesis por un lado, menos la inhibición, y la degradación producida, por otro. La teoría era atractiva, pero no había ninguna razón para pensar que no fuera un hecho singular y exótico, exclusivo del nemátodo *C. elegans*.

Muy pocos años después Ruvkun, estudiando el gen que le había tocado (*let-7*) y haciendo uso de las técnicas de secuenciación ya disponibles, empezó a encontrar esas mismas secuencias en muchos otros organismos (Reinhart *et al.*, 2000; Pasquinelli *et al.*, 2000). En este momento hay unas 700 que se han identificado en humanos y otros animales; de hecho están presentes en todos los animales bilaterales en los que se ha buscado (los bilaterales son, como nosotros, los que tienen una simetría bastante aproximada, los que tienen dos órganos de todos los que hay que tener dos).

Además de explicar cómo suceden las cosas, generalmente los humanos queremos ver una utilidad en lo que se descubre. La capacidad de inhibir procesos con estas pequeñas moléculas es atractiva, y ya se han hecho experimentos en esta dirección. Uno de ellos fue el diseño de un tratamiento experimental contra la hepatitis-C en el hígado. Por supuesto, el equilibrio en la diferenciación es tan delicado que seguramente pasará algún tiempo hasta que se afine una técnica sin riesgos.

Sin duda se encontrarán muchos fenómenos que tienen entre sus causas estas pequeñas moléculas. Se conocen hoy varios tipos de cáncer en los que están implicados, y se perfila que tienen un papel importante en la activación del sistema inmune.

No puedo terminar esta breve reseña sin alabar a un actor fundamental en la historia de este premio, que es el gusanito *C. elegans*. Quienes hemos trabajado en el laboratorio de investigación comprendemos la importancia del sistema experimental que se escoge. Este nemátodo transparente, casi microscópico, con menos de 1000 células, pero con órganos y procesos parecidos a los de animales más complejos, ha sido un sistema ideal.

Bastará para demostrarlo decir que es el sujeto de cuatro premios Nobel. El primero en 2002, concedido a H. Robert Horwitz, Sydney Brenner y John Sulston por la regulación genética del desarrollo de órganos y la muerte celular programada. El otorgado en 2006 a Craig C. Mello y Andrew Fire por la interferencia con ARN o ribointerferencia. El tercero fue de química, no de medicina, y se le entregó a Martin L. Chalfie, Osamu Shimomura y Roger Y. Tsien por el descubrimiento, desarrollo y utilización de la proteína verde fluorescente (otro sistema experimental extraordinario).

Es apenas justo rendirle homenaje a *Caenorhabditis elegans* como actor fundamental y soporte en miles de trabajos experimentales, entre ellos, los cuatro que condujeron a premios Nobel y no sé a cuantos más premios, y también como sustento de cientos de científicos que deben estarle muy agradecidos.

Moisés Wasserman, Ph.D. en Bioquímica.

Académico Honorario Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Colombia

Referencias

- Lee RC, Feinbaum RL, Ambros V.** (1993). The *C. elegans* heterochronic gene *lin-4* encodes small RNAs with antisense complementarity to *lin-14*. *Cell*, 75(5), 43-54. PMID: 8252621.
- Moss EG, Lee RC, Ambros V.** (1997). The cold shock domain protein LIN-28 controls developmental timing in *C. elegans* and is regulated by the *lin-4* RNA. *Cell*, 88(5):637-646. PMID: 9054503.
- Nobel Foundation, The Nobel Committee for Medicine, The Royal Swedish Academy of Sciences** (2024). <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2024/advanced-information/>
- Pasquinelli AE, Reinhart BJ, Slack F, Martindale MQ, Kuroda MI, Maller B, Hayward DC, Ball EE, Degan B, Müller P, Spring J, Srinivasan A, Fishman M, Finnerty J, Corbo J, Levine M, Leahy P, Davidson E, Ruvkun G.** (2000). Conservation of the sequence and temporal expression of *let-7* heterochronic regulatory RNA. *Nature*, 408(6808), 86-89 - PMID: 11081512 – <https://doi.org/10.1038/35040556>
- Reinhart BJ, Slack FJ, Basson M, Pasquinelli AE, Bettinger JC, Rougvie AE, Horvitz HR, Ruvkun G.** (2000). The 21-nucleotide *let-7* RNA regulates developmental timing in *Caenorhabditis elegans*. *Nature*, 403(6772), 901-906. PMID: 10706289 - <https://doi.org/10.1038/35002607>

Ensayo/ Assay

Premio Nobel de Química 2024

Nobel Prize in Chemistry 2024

Este año el premio Nobel de Química fue adjudicado a tres investigadores que emplearon inteligencia artificial (IA) para construir y predecir la estructura tridimensional de las proteínas, que son los componentes básicos de las células y de la vida. La mitad del premio fue para David Baker, bioquímico de la Universidad de Washington en Seattle, y la otra mitad para Demis Hassabis y John Jumper, científicos computacionales en el laboratorio de Google DeepMind en Londres. Baker creó un programa llamado *RoseTTAfold* que permite construir nuevas proteínas no existentes en la naturaleza y Hassabis y Jumper idearon el programa *AlphaFold*, que predice la estructura tridimensional de cualquier proteína con base en su composición de aminoácidos.

Estos programas de IA fueron entrenados empleando la base de datos de proteínas (<http://www.wwpdb.org>) fundada por la profesora Helen M. Berman, quien hoy es su directora emérita.

AlphaFold fue precedido por el programa *AlphaGo*, un algoritmo desarrollado por estos dos investigadores y su equipo de Google Deepmind, con el que lograron derrotar, primero, al campeón europeo de go, Fan Hui 5-0 en el 2016, y luego al campeón mundial, Lee Sedo 4-1. El go, originario de China, es el juego de tablero más antiguo del mundo.

Antes de utilizar la IA para develar la estructura proteica, se conocían solo 150 mil proteínas, la mayoría de ellas hallada con el empleo de la cristalografía de rayos X, una técnica difícil y lenta con la que, por ejemplo, Max Perutz demoró 18 años desentrañando la estructura de la hemoglobina. Un año después de la publicación de *AlphaFold* en 2021, se obtuvieron las estructuras de millones de proteínas cuya composición de aminoácidos se conocía. Lo mejor de este avance es que la información es de acceso abierto.

El gran logro de los investigadores fue emplear la herramienta de la IA para predecir algo que antes se consideraba casi imposible: la conformación tridimensional de una proteína, una operación de tanta complejidad como ganar en el juego de go. Debe resaltarse, sin embargo, que tales metas se alcanzan a partir de lo que otros investigadores han conseguido. En este caso, sin la contribución de la base de datos creada por la doctora Berman hubiera sido difícil enseñarle los principios del plegamiento de las proteínas a *AlphaFold*.

El programa desarrollado por el profesor Baker y su grupo permite construir proteínas inexistentes en la naturaleza con funciones nuevas que pueden aplicarse, entre otros, en innumerables campos de la medicina y la industria. Entre otros descubrimientos que

David Baker



David Baker. Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

Demis Hassabis



Demis Hassabis. Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

John Jumper



John Jumper. Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

Tomado de <https://www.nobelprize.org/all-nobel-prizes-2024/>

precedieron el programa merecedor del Nobel, debe destacarse el de los profesores Michael Sela y Ruth Arnon, del Instituto Weizmann en Israel, quienes en los años 60 construyeron pequeñas proteínas sintéticas, los péptidos, y demostraron que podían ser antigénicos debido a la gran capacidad de adaptación del sistema inmunitario para generar una respuesta inmunitaria ante nuevos antígenos. Este avance permitió un mejor entendimiento de su funcionamiento y la generación de vacunas sintéticas. En un futuro cercano la IA permitirá avanzar el desarrollo de nuevas vacunas, diferentes tipos de antibióticos, nuevas hormonas para todo tipo de usos.

En *Nexus*, el libro publicado recientemente por Yuval Harari, el autor nos presenta los planteamientos éticos que deben sustentar el uso de la IA, destacando su utilidad y también los grandes peligros que representa para la humanidad. Hay que pensar en la IA como una herramienta, que no es buena ni mala en sí misma, pero que exige hacer un uso cuidadoso de ella. Debemos emplear nuestra inteligencia natural y el sentido común para que los beneficios que se deriven de su aplicación sean muy superiores a los perjuicios que pueda traernos su uso.

Juan Guillermo McEwen MD. Ph.D.

Profesor, Universidad de Antioquia

Investigador, Corporación para Investigaciones Biológicas

Referencias

- The Nobel Prize in Chemistry 2024.** NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2024. Thu. 7 Nov 2024. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2024/summary/>
- Lisanza, S. L., Gershon, J. M., Tipps, S. W. K., Sims, J. N., Arnoldt, L., Hendel, S. J., Simma, M. K., Liu, G., Yase, M., Wu, H., Tharp, C. D., Li, X., Kang, A., Brackenbrough, E., Bera, A. K., Gerben, S., Wittmann, B. J., McShan, A. C., Baker, D.** (2024). Multistate and functional protein design using RoseTTAFold sequence space diffusion. *Nat Biotechnol.* <https://doi.org/10.1038/s41587-024-02395-w>
- Jumper, J., Evans, R., Pritzel, A., Green, T., Figurnov, M., Ronneberger, O., Tunyasuvunakool, K., Bates, R., Zidek, A., Potapenko, A., Bridgland, A., Meyer, C., Kohl, S. A. A., Ballard, A. J., Cowie, A., Romera-Paredes, B., Nikolov, S., Jain, R., Adler, J., Hassabis, D.** (2021). Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature*, 596 (7873), 583-589. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03819-2>
- Sela, M. & Arnon, R.** (1960). A specific synthetic polypeptide antigen. *Biochim Biophys Acta*, 40, 382-384. [https://doi.org/10.1016/0006-3002\(60\)91377-9](https://doi.org/10.1016/0006-3002(60)91377-9)

Ensayo/ Assay

El camino hacia una memoria asociativa del conocimiento humano

The road to an associative memory of human knowledge

Un físico y un psicólogo reciben el premio Nobel de Física por sus trabajos pioneros en el área de las redes neuronales artificiales

¿Las máquinas pueden pensar? Esta fue la pregunta que se hizo el matemático Alan Turing en un artículo publicado en la revista *Mind* en 1950 (Turing, 1950). Los computadores comenzaron a desarrollarse con el objetivo inicial de automatizar cálculos repetitivos y aburridos para los humanos. En ese entonces, ser calculadora humana era un trabajo como cualquier otro. Sin embargo, no tardaron en aparecer quienes imaginaron que el computador podría servir para tareas cognitivas, como jugar ajedrez. Claude Shannon, padre de la teoría de la información, publicaría también en 1950 un artículo sobre cómo programar un computador para jugar ajedrez (Shannon, 1950). Curiosamente, en la introducción del artículo Shannon comenta: «...aunque quizás carezca de importancia práctica, esta cuestión podría tener un interés teórico». Tras periodos de euforia, en los que se esperaban resultados exagerados, y momentos de progreso moderado, en la actualidad los computadores no solamente juegan ajedrez, sino que, de cierta manera, pueden inventar historias y chistes, gracias a la progresión de la quizás mal llamada inteligencia artificial.

Los algoritmos más recientes, capaces de procesar el lenguaje natural, escribir códigos para computador y generar imágenes, se basan en las llamadas redes neuronales artificiales, que son modelos simplificados del sistema nervioso. Este año el Comité Nobel de Física de la Real Academia Sueca de Ciencias otorgó el premio a John Hopfield, físico y profesor emérito de la Universidad de Princeton, y a Geoffrey Hinton, psicólogo de formación y profesor en la Universidad de Toronto y en otras instituciones, reconocido como el “padrino de la inteligencia artificial”. Ambos fueron premiados por sus descubrimientos e invenciones fundamentales en el aprendizaje automático mediante redes neuronales artificiales (Nobel Foundation *et al.*, 2024a).

Hopfield primero (1982), y luego Hinton (1986) (Ackley *et al.*, 1985), partieron de la idea de emular el funcionamiento de las neuronas biológicas a través de modelos relativamente sencillos, a partir de los trabajos previos de Warren McCulloch y Walter Pitts,

John Hopfield



John Hopfield. Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

Geoffrey Hinton



Geoffrey Hinton. Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

Tomado de <https://www.nobelprize.org/all-nobel-prizes-2024/>

quienes propusieron que las neuronas biológicas podrían ser funcionalmente equivalentes a unidades de procesamiento similares a las puertas lógicas que componen los computadores digitales (**McCulloch & Pitts**, 1943); de Donald O. Hebb, quien investigó cómo los mecanismos fundamentales del aprendizaje podrían emularse a través de la adaptación de las conexiones entre las neuronas (**Hebb**, 1949), y de Frank Rosenblatt, quien introdujo el cableado de un modelo de percepción compuesto de múltiples neuronas, así como los mecanismos de adaptación que le permitían aprender (**Rosenblatt**, 1958).

Hopfield se interesó en desarrollar modelos formados por una única capa de neuronas en la que cada neurona está conectada a todas las demás excepto a sí misma. Dichas conexiones son bidireccionales y simétricas. Hopfield se preguntó si esta configuración de neuronas exhibiría capacidades computacionales emergentes (**Tank & Hopfield**, 1987) y demostró en sus investigaciones que dichos modelos no solo permiten memorizar información, sino que pueden “recordar” patrones completos a partir de sus fragmentos o versiones distorsionadas. Esto significa que, cuando se le presenta una entrada incompleta o con ruido, la red puede recuperar el patrón original asociado a esa entrada. En ese sentido decimos que se trata de una “memoria asociativa”, dado que es capaz de “recordar” información asociándola a otra relacionada.

Por otro lado, Hinton desarrolló un modelo distinto de red neuronal conocido como “máquina de Boltzmann” (**Ackley et al.**, 1985). De manera similar a la red de Hopfield, la de Hinton es recurrente, es decir, utiliza conexiones de retroalimentación, lo que le permite evolucionar con el tiempo hasta alcanzar un estado estable, pero se diferencia por su comportamiento estocástico. Sus neuronas se “encienden” y “apagan” de manera aleatoria, buscando configuraciones que reduzcan su energía, tal como algunos sistemas físicos buscan el estado más estable.

Aunque el modelo resultó ser muy ineficiente, sus versiones posteriores tendrían una profunda influencia en el desarrollo de arquitecturas modernas de redes neuronales artificiales, incluidas las redes neuronales profundas convolucionales (**LeCun et al.**, 1989) y los llamados modelos transformadores (**Ashish et al.**, 2017).

Las dinámicas que ambos integraron en sus modelos provienen de la física. Hopfield utilizó, por ejemplo, ecuaciones que describen la dinámica de materiales ferromagnéticos, mientras que Hinton recurrió a principios de termodinámica y física estadística al aplicar un enfoque probabilístico inspirado en el equilibrio energético (**Nobel Foundation et al.**, 2024a).

Por otro lado, Hinton contribuiría también a popularizar el uso del algoritmo de retropropagación (**Rumelhart et al.**, 1986) para entrenar las redes neuronales artificiales. Este algoritmo busca minimizar, de manera iterativa, el error entre las respuestas de la red neuronal y un conjunto de ejemplos de respuestas deseadas, ajustando los parámetros de conexión entre las neuronas de la red neuronal artificial. Pasados casi 40 años, este mecanismo de “aprendizaje” perdura y sigue siendo la base para entrenar los modelos más avanzados en reconocimiento de objetos, procesamiento del lenguaje y generación de imágenes a partir de descripciones en lenguaje natural.

No cabe duda de que los modelos de aprendizaje automático se han convertido en una especie de navaja suiza para la resolución de problemas debido a su adaptabilidad y competencia. Por un lado, han facilitado la detección de patrones en imágenes y en todo tipo de señales, lo cual es la base de los sistemas actuales de reconocimiento de objetos, de diagnóstico médico, y de otras innumerables aplicaciones. Por otra parte, han permitido la creación de modelos predictivos capaces de revelar relaciones complejas y ocultas entre los datos, por ejemplo en el desarrollo de sistemas de predicción meteorológica y en la predicción de la estructura tridimensional de las proteínas a partir de secuencias de aminoácidos. Fue precisamente este último avance, logrado por los investigadores Demis Hassabis y John Jumper, el que fue reconocido con el premio Nobel de química de este mismo año (**Nobel Foundation et al.**, 2024b).

Por último, Hinton desarrolló la idea de utilizar redes neuronales artificiales para generar representaciones distribuidas de los conceptos del lenguaje (Hinton, 1986). Cada concepto se ve asociado a un vector de valores numéricos en un espacio de alta dimensionalidad, de manera que las redes neuronales quedan habilitadas para procesar información textual mediante representaciones que capturan relaciones semánticas.

Por ejemplo, en un modelo de lenguaje el concepto de “curiosidad” puede representarse numéricamente y, mediante operaciones en este espacio vectorial, se pueden derivar relaciones como “Curiosidad - Incertidumbre + Información = Comprensión”. Estas representaciones distribuidas permiten que las máquinas adquieran habilidades bastante sofisticadas de procesamiento simbólico y ofrezcan una capacidad —aún limitada— de razonamiento y deducción (Valmeekam *et al.*, 2022).

En lugar de entrar en mayores detalles del trabajo de los galardonados, prefiero destacar lo que el desarrollo de estas investigaciones podría hacer posible a nivel tecnológico y científico. Por un lado, hoy en día somos testigos de la emergencia de sistemas capaces de aumentar nuestros sentidos que se aplican en campos que van desde el diagnóstico de enfermedades a partir de exámenes médicos (Xue *et al.*, 2024) hasta la detección de exoplanetas en el espacio (Malik *et al.*, 2022). De otra parte, el computador ha dejado de ser una simple máquina de cálculo y se ha convertido en una especie de máquina para razonar, gracias a la capacidad que hoy ha adquirido para descubrir asociaciones conceptuales complejas e interdisciplinarias en el vasto corpus del conocimiento humano.

A pesar de estos grandes avances tecnológicos, no podemos asegurar que las máquinas podrían llegar a pensar. Sin embargo, el computador y la inteligencia artificial prometen convertirse en “catalizadores de innovación” que faciliten descubrimientos y soluciones a partir de la fusión de conocimientos diversos, lo que acelerará la creatividad y la innovación científica.

Andrés Pérez-Uribe

University of Applied Sciences and Arts of Western Switzerland, Yverdon-les-Bains, Suiza

Referencias

- Ackley, D. H., Hinton, G. E., Sejnowski, T. J. (1985). A learning algorithm for Boltzmann machines. *Cognitive science*, 9(1), 147-169.
- Ashish, V. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 1.
- Hebb, D. O. (1949). *The Organization of Behavior; a Neuropsychological Theory*. Wiley.
- Hinton, G. E. (1986). Learning distributed representations of concepts. In *Proceedings of the Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (Vol. 1, p. 12).
- Hopfield, J. J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 79(8), 2554-2558.
- LeCun, Y., Boser, B., Denker, J. S., Henderson, D., Howard, R. E., Hubbard, W., Jackel, L. D. (1989). Backpropagation applied to handwritten zip code recognition. *Neural computation*, 1(4), 541-551.
- Malik, A., Moster, B. P., Obermeier, C. (2022). Exoplanet detection using machine learning. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 513(4), 5505-5516.
- McCulloch, W. S. & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5, 115-133.
- Nobel Foundation, The Nobel Committee for Physics, The Royal Swedish Academy of Sciences (2024a). *Scientific Background to the Nobel Prize in Physics 2024*. <https://www.nobelprize.org/uploads/2024/09/advanced-physicsprize2024.pdf>
- Nobel Foundation, The Nobel Committee for Chemistry, The Royal Swedish Academy of Sciences (2024b). *Scientific Background to the Nobel Prize in Chemistry 2024*. <https://www.nobelprize.org/uploads/2024/10/advanced-chemistryprize2024.pdf>
- Rosenblatt, F. (1958). The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, 65(6), 386.

- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., Williams, R. J.** (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323(6088), 533-536.
- Shannon, C. E.** (1950). XXII. Programming a computer for playing chess. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(314), 256-275.
- Tank, D. W. & Hopfield, J. J.** (1987). Collective computation in neuronlike circuits. *Scientific American*, 257(6), 104-115.
- Turing, A. M.** (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59, 433-460.
- Valmeekam, K., Olmo, A., Sreedharan, S., Kambhampati, S.** (2022, November). Large language models still can't plan (a benchmark for LLMs on planning and reasoning about change). In NeurIPS 2022. Workshop: Foundation Models for Decision Making.
- Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., Polosukhin, I.** (2017). Attention Is All You Need. arXiv.org: 1706.03762v7 PDF.
- Xue, C., Kowshik, S. S., Lteif, D., Puducheri, S., Jasodanand, V. H., Zhou, O. T., Walia, A. S., Guney, O. B., Zhang, J. D., Pham, S. T., Kaliaev, A., Andreu-Arasa, V. C., Dwyer, B. C., Farris, C. W., Hao, H., Kedar, S., Mian, A. Z., Murman, D.L., O'Shea, S. A., ... Kolachalama, V. B.** (2024). AI-based differential diagnosis of dementia etiologies on multimodal data. *Nature Medicine*, 30, 2977-2989.

Ensayo/ Assay

El Nobel de Economía concedido a Daron Acemoglu y Simon Johnson, del Instituto Tecnológico de Massachussets, y James A. Robinson, de la Universidad de Chicago

The Nobel Prize in Economics was awarded to Daron Acemoglu and Simon Johnson of the Massachussets Institute of Technology and James A. Robinson of the University of Chicago

El Nobel de Economía de 2024 fue concedido a los autores de dos libros que han cautivado la atención de miles de académicos y estudiantes en el mundo anglosajón cuyos títulos en español serían: *Por qué fracasan las naciones, Los orígenes del poder, la prosperidad y la pobreza* (2012, 529 pp.), con versión en español publicada por Ediciones Deusto (Barcelona), y *El estrecho corredor Estados, sociedades y el destino de la libertad* (2019, 558 pp.). Mientras el primero considera los factores que pueden obstaculizar el desarrollo económico de largo plazo, en especial las instituciones y la economía política de cada cual, el segundo intenta explicar la clave de la prosperidad, que combina la naturaleza del Estado, el tipo de sociedad y la suerte de la libertad aludidas en el subtítulo. Es extraño, pero en las ediciones recientes de los dos libros no figura Simon Johnson, aunque el premio fue concedido a los tres. En 2023 Johnson publicó con Acemoglu el libro *Poder y progreso: la lucha de mil años por la tecnología y la prosperidad*. En él los autores explican el desarrollo de la tecnología a lo largo de la historia y las consecuencias sociales y políticas del cambio tecnológico sobre la productividad y los ingresos del capital y del trabajo.

Los dos libros de Acemoglu y Robinson están escritos en un lenguaje ágil y sencillo que explica el gran éxito editorial que han alcanzado con el paso del tiempo. La teoría detrás de la obra de los autores es relativamente sencilla: los países que en el curso de su desarrollo económico y político crearon instituciones incluyentes, que ofrecían oportunidades de progreso y libertad política para la población, lograron prosperidad, en tanto que los que se encuentran maniatados por instituciones excluyentes no crean oportunidades y se ven condenados a la pobreza y la tiranía. Tal planteamiento ya de por sí introduce dudas, porque países poco democráticos en su despegue económico, como Corea del Sur, Vietnam, Singapur, o la Cuba de Batista, progresaron primero y luego desataron fuerzas internas que lograron algún grado de democracia (aunque Cuba fracasó económicamente en su trasegar socialista y pasó de una dictadura personalista a otra de partido único).

Daron Acemoglu



Daron Acemoglu. Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

Simon Johnson



Simon Johnson. Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

James Robinson



James Robinson. Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

Tomado de <https://www.nobelprize.org/all-nobel-prizes-2024/>

China, sin embargo, fue un caso exitoso de desarrollo económico sin hacer concesiones democráticas, entre ellas, permitir la existencia de partidos que compitan por el apoyo popular y roten según las preferencias del pueblo. El progreso de China es un fenómeno que Acemoglu y Robinson no logran explicar adecuadamente, porque no es democrática y es cada vez más próspera. Regida por un régimen de partido único, que cuenta con 90 millones de miembros, se define como un estado socialista con economía de mercado bajo la dirección del Partido Comunista Chino (PCCh), encabezado por un secretario general que actúa como líder supremo. Mao Zedong llegó al poder en 1949, cuando China estaba sumida en la pobreza y devastada por la guerra contra la ocupación japonesa y que, una vez triunfante, se enfrentó al Kuomintang, partido nacionalista y antisocialista al cual derrotó y expulsó del continente, a la isla de Taiwán, donde se instauró.

En 2024 se cumplen 75 años del triunfo de los comunistas en un país que hoy es radicalmente diferente al de sus inicios: se trata de una potencia mundial de primer orden que aspira a convertirse en la primera economía del globo. Su extraordinario crecimiento se debió a una política de reforma y apertura impulsada por Deng Xiaping, con la que sacó de la pobreza a 750 millones de personas, hecho no igualado por ninguna economía emergente. Se fomentaron las exportaciones, se privatizaron partes no esenciales de la economía, se ejecutaron políticas expansionistas fiscales y de compras estatales que mantuvieron crecimientos de dos dígitos hasta tiempos recientes, cuando las tasas de crecimiento empezaron a oscilar alrededor del 5 % anual, alcanzando un grado de madurez que cuida que la inflación se mantenga controlada. El régimen define a Taiwán como un territorio suyo en rebeldía (*rogue*, que también se traduce como canalla), pero convive con él y aprovecha su progreso tecnológico, lo cual le permite escalar posiciones avanzadas en su oferta de bienes cada vez más complejos y sofisticados. Como se puede apreciar, China es muy próspera y poco democrática, así que hay todo tipo de regímenes en la viña del señor.

Volviendo al Nobel otorgado a los tres autores, el comunicado destaca sus aportes: “Algunos países quedaron atrapados en una situación caracterizado por instituciones extractivas y bajo crecimiento económico. La introducción de instituciones inclusivas crearía beneficios de largo plazo para todos, pero instituciones extractivas crearían ganancias de corto plazo para la gente en el poder. En tanto el sistema político garantizara que ellos mantuvieran el control, nadie confiaría en sus promesas de futuras reformas económicas. De acuerdo con los laureados, esa es la razón para que no ocurrieran mejoras”. Preguntado si el ejemplo del exitoso desarrollo chino con escasa democracia contradecía la teoría de sus asociados, Robinson contestó que sería una cuestión de tiempo para que China se estancara.

Salomón Kalmanovitz

Miembro correspondiente de la Academia de Ciencias Económicas.

Referencias

The Nobel Prize in Economic Sciences (2024). <https://www.nobelprize.org/prizes/economic-sciences/2024/press-release/>

Assay/Ensayo

Original article:

Degrange, F. J., Cooke, S. B., Ortiz-Pabón, L. G., Pelegrin, J. S., Perdomo, C. A., Salas-Gismondi, R., & Link, A. (2024). A gigantic new terror bird (Cariamiformes, Phorusrhacidae) from Middle Miocene tropical environments of La Venta in northern South America. *Papers in Palaeontology*, 10(6), e1601.

The first terror bird of Colombia: a giant rewriting the paleoecology and palaeobiogeography of La Venta Miocene

La primera ave del terror de Colombia: se reescribe la paleoecología y paleobiogeografía del Mioceno de La Venta

Following the last major extinction event 66 million years ago (M.y.), the sole surviving dinosaur lineage, the Neornithes birds, underwent a period of diversification into an array of new groups during the Paleocene and Eocene between 66 to 34 M.y. that would later become the modern avian species. The Cariamiformes birds and their family, Phorusrhacidae, are among these lineages. This family, colloquially designated as the “Terror Birds” on account of their considerable dimensions and robust beak heads, occupies ecological niches as predators in the Cenozoic ecosystems of South America (Mayr, 2016).

In contrast with the popular belief that these birds are direct descendants of the avian dinosaurs that survived the extinction, they are not an “ancestral” lineage in the context of modern birds. Conversely, they are related to other derived lineages that diversified in South America, such as the falcons (Falconiformes) and groups of significant representation and origin in the southern hemisphere, such as the parrots (Psittaciformes) or the songbirds (Passeriformes). Indeed, the most closely related extant taxa to the terror birds are other Cariamiformes (Family Cariamidae), the Seriemas or Chuñas, which inhabit open and semi-open dry environments in Brazil, Argentina, Uruguay, Paraguay, and Bolivia.

The terror bird family (Phorusrhacidae) has an evolutionary history of approximately 45 M.y., with findings dating back from the middle Eocene of Argentina (43 M.y.) (Acosta-Hospitaleche & Jones, 2024) to remains from Uruguay that support their presence in South America until the late Pleistocene (96,040 years ago) (Jones *et al.*, 2018). Similarly, the discovery of fossils in southern Texas and Florida (USA) has enabled the description of *Titanis*, which was approximately 2 meters in height. This evidence suggests that this group migrated to North America during the Pliocene (approximately 3 million years ago), thereby participating in the Great American Biotic Interchange (GABI), a pivotal event in the evolution of Neotropical biodiversity (Pelegrin *et al.*, 2018).

The evolutionary history of the terror bird lineage is characterised by remarkable diversity, with five subfamilies emerging over time. The subfamilies Psilopterinae, Mesembriornithinae, Patagornithinae, Physornithinae, and Phorusrhacinae exhibited considerable variation in size and body mass among their constituent species. Notably, Physornithinae and Phorusrhacinae lineages exhibited pronounced tendencies towards gigantism. In terms of time, the Phorusrhacinae lineage appeared after the extinction of the Physornithinae, indicating a process of species turnover in the context of the apex predator niche (LaBarge *et al.*, 2024). Consequently, during the Miocene, large Phorusrhacinae species coexisted with members of other subfamilies, such as Psilopterinae, which were of a smaller and medium size. This process suggests patterns of niche partitioning in the diversification of the terror birds (LaBarge *et al.*, 2024).

In south-central Colombia, the region known as the Tatacoa Desert, an area noted for its important paleontological richness, was recently recognized by UNESCO (2024) as a site of world interest for geological heritage. This site and its famous locality of La Venta have been investigated for more than 100 years, shedding light on a highly complex

structure of vertebrate communities in northern South America during the middle Miocene (ca. 13 M.y.). A large number of fossil finds have made it possible to document the presence of a diversity of endemic lineages of fish, caimans, turtles, and mammals (Carrillo *et al.*, 2023). However, knowledge is still limited regarding the prehistoric avifauna (Pelegrin *et al.*, 2023).

In the context of Neotropical avifaunal knowledge, the recent discovery of the first bird of terror for Colombia is of considerable significance as this is the first time that a member of this lineage has been reported for northern South America (Degrange *et al.*, 2024). The fossil specimen, designated MT 0200, was discovered in the Diomatal locality (Huila) by César Perdomo of the Museo Paleontológico La Tormenta and subsequently studied by a group of researchers from various institutions in Argentina, Colombia, the United States, and Perú. The discovered remains comprise the distal end of a left tibiotarsus and were recovered from the Chunchullo beds unit of the La Victoria geological formation (Figure 1). The anatomical element was then subjected to comparison and analysis with other species of Phorusrhacidae, including *Phorusrhacos longissimus*, *Devincenzia pozzi*, *Patagornis marshi*, *Llallawavis scagliai*, and *Mesembriornis milneedwardsi*. The analyses enabled the identification of the specimen within the subfamily Phorusrhacinae, which includes some of the larger species. In particular, the Colombian terror bird is identified as the largest specimen to date, with an estimated mass of 156 kg, a value that is considerably higher than previous estimates for other large forms, such as *Kelenken* or *Titanis* (Degrange *et al.*, 2024) (Figure 2).

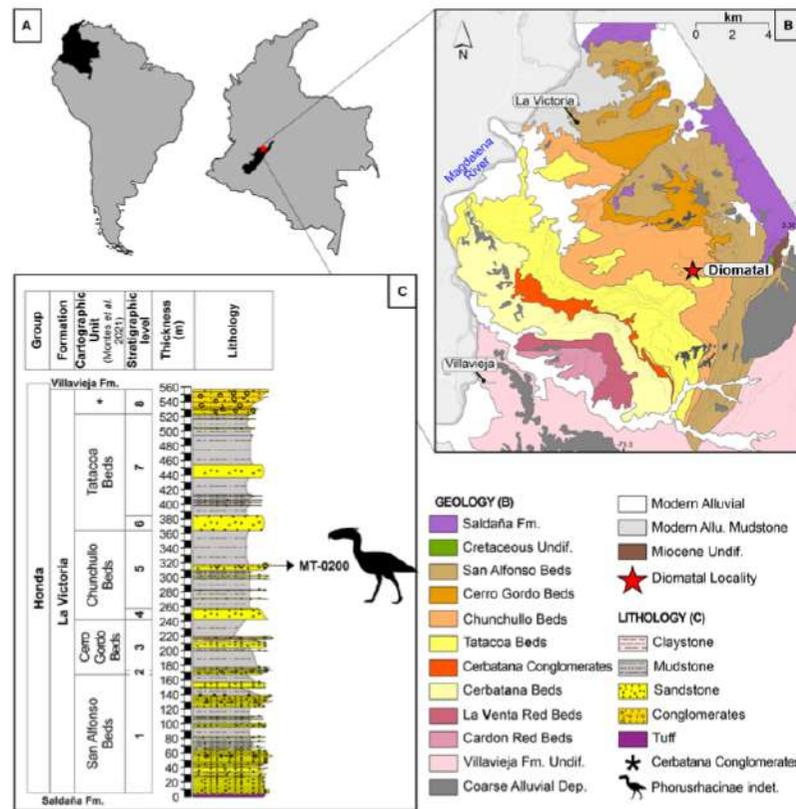


Figure 1. Geological context and stratigraphic occurrence of MT-0200 ('Phorusrhacinae' indet.). **A.** Maps of South America and Colombia indicating the Tatacoa Desert at Huila department. **B.** Geological map of the Honda Group highlighting the Diomatal locality. **C.** Stratigraphic column illustrating the provenance of MT-0200. The cartographic unit marked with an asterisk (*) denotes the Cerbatana Conglomerates (Degrange *et al.*, 2024).



Figure 2. Proposed paleontological scientific illustration of specimen MT0200 in its paleoenvironmental context (Illustrator: Andrés Bernal)

The pervasive occurrence of terror birds in southern South America, in contrast to their absence in the tropical region of the continent, has prompted speculation regarding the potential dispersal routes of these birds and the process of their colonization of North America. In light of this evidence, the recent discovery of specimen MT-0200 has implications for the paleobiogeographic context, suggesting that the terror birds may have fully expanded throughout South America during the middle Miocene. This epoch was pivotal in the emergence, expansion, and configuration of diverse open and semi-open environments that could have facilitated the dispersal of these organisms (Doláková *et al.*, 2021). Similarly, the hypothesis suggests that the Phorusrhacinae lineage may have migrated from present-day Colombia to North America via the Panama land bridge, which would have provided a potential pathway for the subsequent origin of the *Titanis* genus during the Pliocene.

The discovery of MT-0200 has significant implications for the paleoecology of the La Venta ecosystem during the middle Miocene. Thus far, the evidence suggests that the trophic structure would have been dominated by caimans of various sizes and predatory niches, such as those developed by Sebecid species (e.g. *Langstonia*) or giant caimans such as the large *Purussaurus* (Wilson & Parker, 2023). However, the new terror bird may indicate an important role as an apex predator in open and semi-open terrestrial environments in proximity to water bodies where it could encounter medium and large prey. In conclusion, the new terror bird record not only contributes to the knowledge of the Miocene avifauna of La Venta but also provides evidence of the enormous paleontological potential and the possibility of future discoveries in the Tatacoa Desert region.

Jonathan S. Pelegrin

Biologist, M.Sc. and Ph.D. in Evolutionary Biology and Paleontology

Professor and Leader of the Research Group in Ecology and Conservation of Biodiversity (EcoBio) and its Research Team in Paleobiology, Ecology and Evolution (PaleoEco), Universidad Santiago de Cali, Colombia

Professor at Universidad Pontificia Javeriana and Universidad del Valle, Cali, Colombia

Member of the Research Team in Paleoclimatology, Macroecology and Macroevolution of Vertebrates, Universidad Complutense de Madrid (Spain)

Co-author of the original article

References

- Acosta-Hospitaleche, C., Jones, W.** (2024). Insights on the oldest terror bird (Aves, Phorusrhacidae) from the Eocene of Argentina. *Historical Biology*, 1-9. <https://doi.org/10.1080/08912963.2024.2304592>
- Carrillo, J. D., Jaramillo, C., Abadía, F., Aguilera, O., Alfonso-Rojas, A., Billet, G., Benites-Palomino, A., Cadena, E.A., Cárdenas, A., Carlini, A.A., Carillo-Briceño, J., Carvalho, M., Cortés, D., Escobar, J., Herrera, F., Link, A., Luque, J., Martínez, C., Perez-Lara, D.K., Salas-Gismondi, R., Suarez, C., Stiles, E., Urrea-Barreto, F.J., Zapata, S.** (2023). The Miocene La Venta Biome (Colombia): A century of research and future perspectives. *Geodiversitas*, 45(26), 739-767.
- Degrange, F. J., Cooke, S. B., Ortiz-Pabón, L. G., Pelegrin, J. S., Perdomo, C. A., Salas-Gismondi, R., Link, A.** (2024). A gigantic new terror bird (Cariamiformes, Phorusrhacidae) from Middle Miocene tropical environments of La Venta in northern South America. *Papers in Palaeontology*, 10(6), e1601.
- Doláková, N., Kováčová, M., Utescher, T.** (2021). Vegetation and climate changes during the Miocene climatic optimum and Miocene climatic transition in the northwestern part of Central Paratethys. *Geological Journal*, 56(2), 729-743.
- Jones, W., Rinderknecht, A., Alvarenga, H., Montenegro, F., Ubilla, M.** (2018). The last terror birds (Aves, Phorusrhacidae): new evidence from the late Pleistocene of Uruguay. *PalZ*, 92, 365-372.
- LaBarge, T. W., Gardner, J. D., Organ, C. L.** (2024). The evolution and ecology of gigantism in terror birds (Aves, Phorusrhacidae). *Proceedings of the Royal Society B*, 291(2021), 20240235.
- Mayr, G.** (2016). *Avian evolution: the fossil record of birds and its paleobiological significance*. John Wiley & Sons.
- Pelegrin, J. S., Gamboa, S., Menéndez, I., Hernández-Fernández, M.** (2018). El Gran Intercambio Biótico Americano: una revisión paleoambiental de evidencias aportadas por mamíferos y aves neotropicales. *Ecosistemas*, 27(1), 5-17.
- Pelegrin, J. S., Acosta-Hospitaleche, C., Link, A., Cooke, S., Cortés, D., Jaramillo, C.** (2023). Ensamblaje de Aves del Mioceno Medio de La Venta (Desierto de la Tatacoa), Colombia: implicaciones paleoecológicas y paleobiogeográficas. 72. In II Congreso Colombiano de Paleontología: Libro de Resúmenes. Universidad del Rosario.
- Wilson, O. E. & Parker, A. K.** (2023). Low predator competition indicates occupation of macro-predatory niches by giant Miocene reptiles at La Venta, Colombia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 632, 111843.

Opinion

La amenaza silenciosa de la deforestación química en los países amazónicos: un nuevo desafío para la conservación y la legislación ambiental

The silent threat of chemical deforestation in Amazonian countries: a new challenge for conservation and environmental legislation

La Amazonía, la mayor selva húmeda tropical del planeta, con aproximadamente 7.5 millones de km², es el principal reservorio de biodiversidad y un elemento clave en el ciclo global del carbono. Sin embargo, enfrenta una presión insostenible debido a actividades humanas que están acelerando su transformación de manera alarmante (Armenteras, 2024). Entre las prácticas más documentadas de deforestación, como es el uso de motosierras o fuego, ha surgido recientemente un nuevo método, la deforestación química. Este tipo de deforestación utiliza compuestos tóxicos que afectan la vegetación de manera gradual, convirtiéndose en un método innovador y difícil de detectar que ha ganado terreno en los últimos años, principalmente en Brasil. En extensas áreas de Mato Grosso, Pantanal y en partes de la Amazonía se está enfrentando el uso de estos compuestos que se emplean para evadir los controles establecidos, como se ha denunciado en medios de prensa regionales e internacionales (Freitas, 2021; Nicas & Milhorance, 2024; Brown, 2024).

Además de su evidente impacto sobre los bosques, esta modalidad de deforestación plantea riesgos adicionales para la salud humana, la biodiversidad y los ecosistemas circundantes. Por ello se está convirtiendo en una preocupación más para la conservación de los bosques amazónicos en Brasil y una amenaza creciente para otros países de la cuenca. El método también afecta gravemente a las comunidades locales y el clima regional y global, y representa un problema emergente de potencial magnitud que exige respuestas coordinadas y efectivas en múltiples niveles.

¿Qué es entonces la deforestación química? La respuesta es simple: un método menos visible pero igual de destructivo para la conversión de la cobertura de bosque a otros tipos de cobertura. En el mundo, Brasil ocupa los primeros lugares en el consumo de herbicidas y pesticidas, pues aplica anualmente más de 800.000 toneladas en diversos biomas, desde el Amazonas hasta el Cerrado (Ghelfi *et al.*, 2024). La deforestación química consiste en el uso de estos compuestos para eliminar la vegetación de manera gradual, sin dejar señales visibles inmediatas, lo que, como quedó dicho, dificulta su detección en los sistemas de monitoreo convencionales. Se utilizan herbicidas potentes que al penetrar el sistema vascular de los árboles provocan una muerte progresiva y silenciosa que deja las áreas forestales aparentemente intactas, pero en estado de debilitamiento avanzado. Los herbicidas empleados suelen ser de amplio espectro, por lo que interfirieren tanto en la fotosíntesis como en la absorción de nutrientes, lo que agrava el deterioro gradual de la vegetación.

Lo que agranda el problema es que los efectos de la deforestación química no se limitan a la pérdida del follaje o a la mortalidad progresiva de los árboles. Por su naturaleza, esta técnica altera la composición del suelo, afecta el ciclo hídrico y contamina las corrientes de agua cercanas, dejando residuos tóxicos que afectan a las comunidades humanas y la fauna que dependen de estos ecosistemas (Terziev & Petkova-Georgieva, 2019). Existe una correlación entre el aumento del uso de agroquímicos y la disminución de la biodiversidad: el número de especies en peligro aumenta proporcionalmente al uso de pesticidas (Ghelfi *et al.*, 2024).

La deforestación química que se practica en Brasil, haciendo un símil, se asemeja al uso del glifosato en la erradicación de cultivos de coca en otros países. Ambas prácticas buscan fines específicos, e.g. eliminar cierto tipo de coberturas, pero tienen graves efectos colaterales en el ecosistema y las comunidades. Usar estos herbicidas no solo elimina la vegetación deseada, sino que contamina el suelo y el agua, reduciendo la fertilidad del suelo y afectando a especies nativas. En este sentido, se han documentado desde malformaciones en anfibios (**Ferrante & Fearnside**, 2020) a riesgos para peces e invertebrados, así como problemas alimenticios en asentamientos humanos cercanos (o en aislamiento voluntario) por la contaminación del pescado, principal fuente de proteína de muchas comunidades amazónicas. También se han reportado problemas de salud como afecciones respiratorias y cáncer, entre otros (**Damiani et al.**, 2023; **Rico et al.**, 2022). Es por estos motivos que se necesita diseñar e implementar urgentemente políticas para mitigar el impacto de estas prácticas en la salud pública y el medio ambiente (**Coelho et al.**, 2019).

Desafíos para la detección y el monitoreo

A diferencia de las prácticas de deforestación “tradicionales”, la deforestación química opera discretamente, sin el uso de maquinaria pesada, talas masivas ni incendios visibles. Esto representa uno de los mayores desafíos técnicos para que las autoridades logren controlarla: su capacidad de evadir los sistemas de monitoreo satelital ampliamente utilizados para detectar y analizar la deforestación. Estos métodos, detectan la deforestación mediante cambios abruptos en la cobertura verde, como áreas taladas, quemadas o con presencia de humo. En el caso de la deforestación química, los árboles y arbustos se deterioran lentamente, por lo que no muestran signos de defoliación súbita fácilmente detectables en imágenes satelitales. Este cambio gradual dificulta que los sistemas convencionales detecten la pérdida de vegetación hasta que ésta ya está muy avanzada, obstaculizando así la detección y la alerta temprana y el escrutinio de las autoridades y del público.

En parte, este tipo de deforestación, resultado de un proceso progresivo de deterioro, también muestra similitudes con los procesos de degradación forestal en la Amazonía, donde las afectaciones no son inmediatas, sino que se extienden en el tiempo y son difíciles de detectar con precisión (**Lapola et al.**, 2023; **Silva Junior et al.**, 2021). Tal como ocurre con la degradación causada por incendios forestales, la extracción de madera y las sequías extremas —que también se caracterizan por ser graduales y afectan áreas extensas sin registrar una pérdida completa de cobertura boscosa—, la deforestación química sigue un proceso similar pero a una velocidad distinta. Existen avances, pero hoy todavía no contamos con métodos fiables para medir y cuantificar su impacto, ya que persisten las mismas dificultades que existen en la medición de la degradación forestal (**Silva Junior et al.**, 2021). La falta de indicadores visibles inmediatos en las imágenes satelitales y la superposición de múltiples factores de degradación aumentan la incertidumbre sobre el área, la velocidad y la intensidad de estos procesos, subestimando así su impacto real en el ecosistema.

Hacia una estrategia integral de conservación para la región

Sin duda, la deforestación química representa una amenaza emergente y de complejidad creciente para la conservación de la Amazonía, lo que agrega otra dificultad para el monitoreo y la adopción de normas ambientales que la contrarresten. La innovación tecnológica y la cooperación internacional serán esenciales para implementar métodos de detección avanzados capaces de detectar los signos tempranos de alerta. Otra cosa son los desafíos legales que entraña enfrentarla. A diferencia de la tala y los incendios, que de una forma u otra están regulados por leyes y políticas ambientales, el uso de químicos para eliminar vegetación en grandes extensiones no está adecuadamente regulado en muchos países amazónicos, empezando por Brasil (**Oliveira et al.**, 2021). Ello probablemente responde a que esta práctica aún no está plenamente documentada ni reconocida como una amenaza ambiental significativa. Por ejemplo, el marco regulador reciente de Brasil permitió un alarmante aumento en la aprobación de pesticidas, con 450 nuevos productos

sancionados en un solo año (Coelho *et al.*, 2019). Es por ello que el impacto acumulativo del uso de herbicidas exige una revisión urgente de las normativas existentes, de forma que se incorpore este tipo de deforestación en las legislaciones y haya penalizaciones efectivas para quienes recurran a ella. La urgencia de estas medidas se hace evidente, ya que enfrentar esta amenaza emergente requiere tanto voluntad política como una reestructuración (una más) en la percepción y el control de la deforestación en la región.

Dolors Armenteras, Ph.D.

Profesora titular

Laboratorio de Ecología del Paisaje y Modelización de Ecosistemas-ECOLMOD

Miembro de la Interfaz Ciencia-Política de la CNULD

Miembro del Comité Científico del Panel Científico para la Amazonia

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

Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia

Referencias

- Armenteras, D.** (2024). Fuego y agua: cambio global, resiliencia de los bosques y riesgo del punto de no retorno para la Amazonía. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 48(187), 438-444. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2645>
- Coelho, F. E. A., Lopes, L. C., Cavalcante, R. M. S., Corrêa, G. C., Leduc, A. O. H. C.** (2019). Brazil unwisely gives pesticides a free pass. *Science*, 365, 552-553. <https://doi.org/10.1126/science.aay3150>
- Damiani, S., Leite Montalvão, M. T., de Alcântara Mendes, R., Gomes da Costa, A. C., Sousa Passos, C. J.** (2023). Water and sediment pesticide contamination on indigenous lands surrounded by oil palm plantations in the Brazilian Amazon. *Heliyon*, 9(10), e19920. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19920>
- Ferrante, L. & Fearnside, P. M.** (2020). Evidence of mutagenic and lethal effects of herbicides on Amazonian frogs. *Acta Amazonica*, 50(4), 363-366. <https://doi.org/10.1590/1809-4392202000562>
- Freitas, H.** (2021). Fazendeiros jogam agrotóxico sobre Amazônia para acelerar desmatamento. *Repórter Brasil*, November 16.
- Ghelfi, A., Marimon Junior, B. H., Marimon, B. S.** (2024). O uso de agrotóxicos como uma ameaça à conservação nos diferentes biomas brasileiros. *Revista Foco*, 17(7), e5433. <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v17n7-089>
- Lapola, D. M., Pinho, P., Barlow, J., Aragão, L. E. O. C., Berenguer, E., Carmenta, R., Liddy, H. M., Seixas, H., Silva, C. V. J., Silva, C. H. L., Alencar, A. A. C., Anderson, L. O., Armenteras, D., Brovkin, V., Calders, K., Chambers, J., Chini, L., Costa, M. H., Faria, B. L., ... Walker, W. S.** (2023). The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, 379, 6630. <https://doi.org/10.1126/science.abp8622>
- Brown, S.** (2024, Septiembre 24). Report exposes meatpackers' role in recent chemical deforestation in Brazil. *Mongabay – Conservation News*. <https://news.mongabay.com/2024/09/report-exposes-meatpackers-role-in-recent-chemical-deforestation-in-brazil/>
- Nicas, J. & Milhorance, F.** (2024, Octubre 29). La nueva amenaza para los bosques brasileños: los productos químicos. *The New York Times*.
- Rico, A., de Oliveira, R., Silva de Souza Nunes, G., Rizzi, C., Villa, S., De Caroli Vizioli, B., Montagner, C. C., Waichman, A. V.** (2022). Ecological risk assessment of pesticides in urban streams of the Brazilian Amazon. *Chemosphere*, 291, 132821. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132821>
- Silva Junior, C. H. L., Carvalho, N. S., Pessôa, A. C. M., Reis, J. B. C., Pontes-Lopes, A., Doblas, J., Heinrich, V., Campanharo, W., Alencar, A., Silva, C., Lapola, D. M., Armenteras, D., Matricardi, E. A. T., Berenguer, E., Cassol, H., Numata, I., House, J., Ferreira, J., Barlow, J., ... Aragão, L. E. O. C.** (2021). Amazonian forest degradation must be incorporated into the COP26 agenda. *Nature Geoscience*, 14(9), 634–635. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00823-z>
- Terziev, V. & Petkova-Georgieva, S.** (2019). The Health and Safety Problems According to the Pesticides Usage in the Ecosystem. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3472055>

Opinion

Reflexiones sobre por qué no trascendemos en ciencia y tecnología

Reflections on why we do not transcend in science and technology

Resumen

Este artículo parte del análisis de los resultados de las investigaciones del ingeniero Jorge Álvarez Lleras y su referencia al estudio de Julio Garavito Armero recogido en su artículo “El clima de Bogotá”. Al ir de lo particular (el clima de Bogotá) a lo general y luego regresar a lo particular, Álvarez Lleras se basó en el método inductivo, científicamente aceptado por la comunidad académica internacional hoy en día. El autor trabajó durante cerca de dos décadas el tema de la meteorología y publicó en 1940 sus “Elementos de Meteorología tropical” en el número 12, volumen 3, de la revista de la Academia. A partir de sus hallazgos logró postular una teoría que conlleva una comprensión científica, rigurosa, sistemática y profunda del origen, características y variaciones de la meteorología en función de la latitud. Al revisar la bibliografía actual utilizando los modernos motores de búsqueda, el nombre de Álvarez Lleras y los resultados de sus investigaciones no aparecen referenciados. Se plantea, entonces, una pregunta fundamental: ¿por qué los resultados de una investigación científica rigurosa, sistemática y profunda, basados en principios físicos y modelos matemáticos de Meteorología tropical, no trascendieron a nivel mundial si estaban respaldados por una teoría y unos modelos pioneros del desarrollo posterior de la ciencia meteorológica? A partir de esta pregunta, se plantean aquí cinco reflexiones para la discusión académica.

Palabras clave: Meteorología tropical; Obstáculos epistemológicos.

Abstract

This article is based on the analysis of engineer Jorge Álvarez Lleras' research results and his reference to the studies by Julio Garavito Armero published in the article “The climate of Bogotá”. In his research, Álvarez Lleras went from the particular (Bogotá's climate) to the general and then back to the particular using the inductive method which the international academic community accepts today as scientifically sound. Álvarez Lleras worked for nearly two decades on the subject of meteorology and in 1940 he published his “Elements of Tropical Meteorology” in the Academy's journal number 12, volume 3, where he presented the results of his research. There he postulated a theory that led to a scientific, rigorous, systematic, and deep understanding of the origin, characteristics, and variations of meteorology based on latitude. Reviewing the current bibliography in different modern search engines, the name of Álvarez Lleras and his research results are not referenced. A fundamental question then arises: Why did the results of a scientific, rigorous, systematic, and in-depth investigation, based on physical principles and mathematical models on Tropical Meteorology, not transcend worldwide, when such results, theory, and models were the basis of the subsequent development of meteorological science? Around this question, five reflections for academic discussion are proposed here.

Keywords: Tropical Meteorology; Epistemological obstacles

Introducción

En el 2016, cuando se cumplieron 80 años de la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, su editora, la Dra. Elizabeth Castañeda, propuso a los editores asociados la excelente idea de seleccionar y reproducir artículos considerados

como clásicos o pioneros en los campos del conocimiento de su especialidad publicados en la revista entre 1936 y 1986, acogiéndose a la definición de clásico del Diccionario de la Real Academia Española: *perteneciente o relativo al momento histórico de una ciencia en el que se establecen teorías y modelos que son la base de su desarrollo posterior*.

En ese contexto se seleccionó el artículo del primer presidente de la Academia, el ilustre ingeniero Jorge Álvarez Lleras, titulado “Contribución a la meteorología colombiana” (Álvarez-Lleras, 1938), el cual se publicó en el número 6 del volumen 2 de la revista. El análisis que el doctor Daniel Pabón, editor asociado de la revista, hizo de este artículo fue claro, positivo y conciso (Pabón, 2017), pero lamentablemente en el artículo no se referencia la bibliografía consultada.

Este artículo clásico se tomó de la publicación que el ingeniero Álvarez Lleras había presentado en el Segundo Congreso Científico Panamericano, realizado en Washington en 1916 (Proceedings, 1917), en su calidad de encargado del Servicio Meteorológico del Observatorio Nacional de Colombia. En él se resumen con datos y gráficas las actividades del Observatorio Nacional de Bogotá en el campo de la Meteorología y se destacan los esfuerzos de José Celestino Mutis para dar inicio a las observaciones ordenadas de los fenómenos meteorológicos en el Virreinato de Nueva Granada. Asimismo, Álvarez Lleras presenta allí los primeros bosquejos de lo que luego se convertiría en la teoría de Meteorología tropical a partir de observaciones metódicas de los fenómenos meteorológicos y la propuesta de Mutis de estudiar el clima ecuatorial americano cuando en Europa Borda, Lavoisier y Laplace postulaban que era posible la previsión del tiempo mediante la observación de los fenómenos atmosféricos.

En el artículo presentó también los primeros resultados de la medición de las lluvias, la temperatura, la presión atmosférica y la humedad relativa con equipos de última generación para la época y las comparaciones con los resultados en otras latitudes como París, así como conclusiones que aportaban a los principios de lo que hoy se conoce como Meteorología tropical. Por ejemplo, al comparar la presión de Bogotá con la de París se argumenta que el barómetro pierde su importancia como instrumento meteorológico en la zona ecuatorial y la gana como instrumento de ingeniería, especialmente en países montañosos como Colombia.

Muchos de los datos presentados en el Congreso Panamericano de Washington ya los había investigado el ingeniero Julio Garavito con su estudio sobre el clima de Bogotá (Garavito, 1940)

Elementos de Meteorología tropical

Además de esa primera etapa de mediciones, análisis y clasificación realizadas por Garavito Armero en torno al clima de Bogotá, Álvarez Lleras trabajó el tema durante cerca de dos décadas hasta culminar en la publicación de los “Elementos de Meteorología tropical” (Álvarez-Lleras, 1940) en el número 12 del volumen 3 de la revista de la Academia. Con los resultados de sus investigaciones logró postular una teoría que conlleva una comprensión científica, rigurosa, sistemática y profunda del origen, características y variaciones de la meteorología en función de la latitud y constituye el sustento científico de la hipótesis sobre la variación espaciotemporal de las magnitudes de los parámetros del rayo (Torres, 2015a).

Los resultados del desarrollo de dicha teoría fueron confrontados con la realidad concreta. En el proceso de partir de lo particular a lo general y luego regresar a lo particular, Álvarez trabajó, fundamentalmente, el método inductivo, cuya validez científica hoy acepta la comunidad académica internacional, proponiendo, a partir de la observación de sucesos específicos, una conclusión que resultara general para todos los eventos de la misma clase (Torres, 2017).

Esta investigación le permitió a Álvarez Lleras plantear una teoría fundamental que quienes investigan estos fenómenos naturales reconocen como un aporte fundamental al conocimiento mundial sobre la diferencia entre la meteorología en latitudes templadas (Estados Unidos, Europa, Asia) y las tropicales.

El planteamiento de Álvarez Lleras representa actualmente un aporte fundamental para el desarrollo tecnológico y su impacto en la vida diaria de las personas, por ejemplo, cuando se diseñan y construyen equipos cuya operación es muy diferente según la latitud en que se encuentren. En cuanto al tema tan actual de la transición energética, la confiabilidad de la matriz energética debe tener la capacidad de abastecer la demanda en todo momento, cumpliendo los requerimientos técnicos de calidad y suficiencia (UPME, 2020). En el caso de las fuentes no convencionales de energía renovable, se han desarrollado diversas tecnologías, entre ellas, los aerogeneradores (energía eólica), o las celdas fotovoltaicas (energía solar), que funcionan al aire libre, pero su diseño y fabricación responden a normas “internacionales” y magnitudes de parámetros atmosféricos propias de las latitudes templadas (Europa, EE.UU., Japón, China, etc.). Se requiere, entonces, aplicar los resultados de la investigación endógena de nuestro propio entorno tropical, que tiene la mayor actividad de rayos del planeta, para lograr equipos de un comportamiento confiable y compatible desde el punto de vista electromagnético (Torres, 2024).

Álvarez Lleras afirmaba en su primer artículo que el origen de muchos fenómenos meteorológicos permanecía en el territorio del misterio, a pesar de los trabajos de físicos eminentes por dilucidarlos. Ignoramos, por ejemplo, cómo se forma la lluvia en las nubes y cómo procede el rayo en las perturbaciones tempestuosas de la atmósfera. Con respecto a esto último, desde mediados del siglo XVIII se han llevado a cabo experimentos orientados a estimar la carga eléctrica contenida en las nubes de tormenta (Aranguren, 2011). Algunos de los primeros y más importantes fueron los realizados por Benjamín Franklin entre 1746 y 1762; con ellos comprobó definitivamente que las nubes de tormenta y el rayo eran fenómenos eléctricos (Kridler, 2004).

El primer estudio sistemático de los cambios del campo eléctrico producidos por rayos lo hizo en 1920 Wilson y después, en 1929, Whiple continuó explorando este campo. En 1916 Wilson proporcionó las bases matemáticas del modelo de carga puntual para la representación de descargas nube-tierra e intranube, e introdujo los conceptos relativos al momento de carga. Asimismo, presentó las mediciones hechas entre 1914 y 1915 en el Solar Physics Observatory en Cambridge, Inglaterra (Wilson, 1920), utilizando una placa de medida (*test plate*) instalada a nivel del suelo sobre un volumen cilíndrico de tierra que se conectaba con el resto del terreno a través de un electrómetro capilar. Para apantallar la placa de medida, el sistema contaba con un aparato mecánico que se podía operar mediante poleas desde una caseta ubicada a 14 m del lugar de medida.

Estos trabajos pioneros de mediados del siglo XVIII y principios del XX se enfocaron en la medición de parámetros eléctricos del rayo. En su artículo Álvarez Lleras planteaba cómo procede el rayo en las perturbaciones tempestuosas de la atmósfera y que, hasta esa fecha, la ciencia meteorológica había sido simplemente cualitativa e ignoraba el origen de muchos fenómenos en los cuales el movimiento del aire jugaba un papel importantísimo.

Entre 1917 y 1940 Álvarez Lleras desarrolló su teoría de Meteorología tropical y la expuso en tres capítulos: en los dos primeros discute de manera general las ecuaciones del movimiento de los fluidos, hace consideraciones sobre el equilibrio de la atmósfera y establece las ecuaciones de movimiento del aire para llegar a la conclusión de que el viento debe soplar hacia el este desde el polo hasta el paralelo $35^{\circ} 16'$ y desde allí hasta el ecuador. Para llegar a tal conclusión estudió el movimiento y la presión de la atmósfera asumiendo que la temperatura era uniforme y haciendo abstracción del roce contra la superficie terrestre, en lo que constituye un aporte importante al conocimiento meteorológico de principios del siglo XX.

El científico estableció que si se observa en diferentes lugares de la tierra el ángulo de la isobara (de igual presión atmosférica media) con la velocidad del aire, se concluye que dicho ángulo satisface las siguientes leyes:

- en cada latitud tal ángulo tiene un valor constante, siendo este mayor en la tierra que en el mar, y
- el ángulo crece en las mismas circunstancias con la latitud hasta aproximarse a los 90° en el ecuador.

A partir de estos análisis matemáticos y físicos, Álvarez Lleras planteó su teoría así:

... de los estudios realizados, ha ido saliendo un cuerpo de doctrina que puede llamarse Meteorología Tropical, y que presentamos en forma de lecciones, cuyo fundamento principal procede de las instrucciones que en alguna época anterior recibimos de nuestro antecesor el ilustre astrónomo Garavito...

Discusión y reflexiones

Al revisar la bibliografía actual sobre Meteorología tropical en diversos motores de búsqueda, los nombres de Álvarez Lleras y Garavito Armero no aparecen referenciados como tampoco los resultados de sus investigaciones. Se plantea, entonces, una pregunta fundamental: ¿Por qué los resultados de la investigación científica, rigurosa, sistemática y profunda sobre Meteorología tropical de Álvarez Lleras, basada en la física y en modelos matemáticos, no trascendieron a nivel mundial, siendo que tales resultados, la teoría y los modelos constituyen la base del desarrollo posterior de la ciencia meteorológica?

A partir de este interrogante, se proponen para la discusión académica las siguientes cinco reflexiones.

El obstáculo epistemológico

Uno de los grandes aportes del epistemólogo Gaston Bachelard a la moderna teoría del conocimiento fue, sin duda alguna, el concepto de obstáculo epistemológico, es decir, las dificultades psicológicas que impiden una correcta apropiación del conocimiento objetivo (Bachelard, 1987). Sir Francis Bacon, por su parte, argumentó vigorosamente en contra del método aristotélico de la adquisición de conocimiento, planteando que su principal debilidad consistía en partir de ideas preconcebidas (idealizaciones) y buscar pruebas que se ajustaran a ellas. Bacon plantea que hay cuatro clases de ídolos que asedian la mente del hombre, a los cuales asignó estos cuatro nombres: los ídolos de la tribu, los ídolos de la cueva, los ídolos del mercado y los ídolos del teatro (Bacon, 1984).

Una primera hipótesis que se propone para la discusión es que, aunque ni Gaston Bachelard ni Francis Bacon, ilustres epistemólogos, lo mencionan, se considera que hoy existe un obstáculo epistemológico adicional, producto del avance en el conocimiento de la naturaleza y la tecnología en los países llamados desarrollados, e incluso en los emergentes, de América, Europa o Asia. La comunidad científica de dichos países tiene verdadera dificultad a la hora de reconocer nuevos conocimientos y avances si estos no han sido enunciados o publicados previamente por sus propios representantes (Torres, 2021).

Esta hipótesis de los obstáculos epistemológicos puede enmarcarse en la tesis de los investigadores sociales y profesores eméritos colombianos Luis Eduardo Mora Osejo y Orlando Fals Borda, quienes publicaron un interesante manifiesto sobre la superación del eurocentrismo que sigue siendo válido hoy (Mora-Osejo & Fals-Borda, 2003). Una de las afirmaciones de este manifiesto de hace 22 años sigue siendo válida:

En nuestro país como en muchos otros es aceptada la validez del conocimiento científico originado en Europa y luego con gran éxito transferido a Norteamérica. Quizás en razón de tal éxito se llega al extremo de considerarlo también, suficientemente adecuado, tanto en su modalidad básica como aplicada, para explicar las realidades en cualquier lugar del mundo, incluidas las de los trópicos húmedos. Tan elevado aprecio por el conocimiento originado en Europa de frente a las realidades naturales, culturales y sociales de ese continente, impide percibir las consecuencias negativas que ello implica cuando se transfieren y se intenta utilizarlos para explicar realidades tan diferentes como las que son propias del medio tropical complejo y frágil, y sobre todo tan diferente al de las zonas templadas del planeta.

Este eurocentrismo produce anomia social y una incapacidad de la sociedad, en este caso la colombiana, para adquirir instrumentos de comprensión de su propia realidad y, por otro lado, demuestra ser destructivo para el medio ambiente natural y la biodiversidad.

Es indudable que la hipótesis aquí planteada debe ser en el futuro inmediato una bandera del Colegio Máximo de las Academias liderado por la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, con el fin de discutirla y poner el foco sobre el tema del eurocentrismo y la forma de superarlo.

Dificultad de la trazabilidad bibliográfica

Además de los obstáculos epistemológicos, en sus primeros volúmenes la revista de la Academia no mantenía una bibliografía rigurosa y sistemática, por lo que resulta muy difícil rastrear los antecedentes del contenido de los artículos. Por ejemplo, en los escritos de Garavito (**Figura 1**) se hace referencia a publicaciones de autores sin aclarar si se trata de revistas o libros, y sin mencionar las editoriales en las que fueron publicados, cuando en revistas de fechas anteriores a las publicaciones de Álvarez Lleras y Garavito aparecidas en otros países europeos o en Estados Unidos ya se presentaba sistemáticamente la bibliografía.

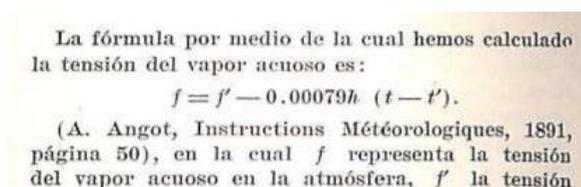


Figura 1. Ejemplo de un artículo de Julio Garavito donde la referencia se encuentra dentro del texto

Profesión Vs. disciplina

Es totalmente cierto que la formación en ingeniería se basa en la aplicación de las ciencias básicas, pero rara vez se analizan los importantes aportes que la ingeniería como disciplina ha hecho al avance del conocimiento de las ciencias básicas y cómo sus resultados se han ido integrando en la formación profesional. Un ejemplo paradigmático son las investigaciones de los ingenieros Garavito Armero y Álvarez Lleras. Hoy en día no hay una clara distinción entre los ingenieros y los científicos, posiblemente por la fuerte conexión que actualmente existe entre la ciencia y la tecnología.

Aunque según la epistemología el método ingenieril es diferente al método científico, y el ingeniero se desenvuelve en el ámbito del mundo real y concreto, es posible demostrar con ejemplos como los de los ingenieros Álvarez Lleras y Garavito Armero, que el método ingenieril aporta al método científico cuando se establece conceptualmente que la ingeniería no solamente es una profesión sino una disciplina.

El trabajo interdisciplinario de investigación

Colombia es un país muy joven en investigación científica sistemática, en tecnología e innovación, con una trayectoria de apenas un siglo, en tanto que en otras latitudes el desarrollo de la investigación científica abarca siglos.

Por otro lado, la educación superior en Colombia sigue teniendo la docencia como sustrato académico de una organización basada en facultades, con lo que no ha logrado independizar y coordinar las profesiones y las disciplinas en torno a la investigación científica y la formación de profesionales.

Históricamente, con anterioridad a 1965 y el predominio de las profesiones clásicas (Ingeniería, Medicina, Derecho, Artes y Agronomía), la cátedra universitaria fue un mecanismo que permitió que dos procesos de recontextualización, entendidos siguiendo a **Torres** (2015b) como procesos de *selección y jerarquización de conocimientos, formados en un contexto y adecuados para tener sentido y utilidad en otro contexto*, se coordinaran. Esos dos procesos eran, por un lado, el de la práctica en las empresas donde ejercía como profesional el eminente docente y, por otro, el que tenía lugar a través de las instituciones de educación como la universidad.

En 1965, con la reforma Patiño en la Universidad Nacional de Colombia y otras que se produjeron en América Latina por la misma época, esos dos procesos de recontextualización se separaron, con lo cual se ganó autonomía académica universitaria, pero se perdió la importante y necesaria relación con el llamado sector productivo, lo que aún sigue vigente cuando se revisan los reglamentos referentes al registro calificado o la acreditación de programas académicos en Colombia.

Engranajes necesarios para incentivar la investigación científica, la tecnología y la innovación propias

Colombia se ha caracterizado por ser un país consumidor de tecnologías foráneas y no ha logrado generarlas a partir de la aplicación de las ciencias básicas. Existen, sin embargo, excelentes ejemplos: en el sector energético se han desarrollado transformadores y motores eléctricos que constituyen aportes y soluciones tecnológicas basadas en la investigación de los parámetros del rayo en la zona tropical terrestre; en el área agrícola, en el centro de investigaciones de Cenicafe se han logrado semillas mejoradas más productivas, y en el campo de la metalmecánica se hacen autopartes y se ha desarrollado *software*, todo lo cual demuestra la gran capacidad y el talento colombiano.

Sin embargo, aún falta la decisión política que involucre los engranajes necesarios para incentivar la investigación y la innovación propias, ligándolas a la productividad sin eliminar el espíritu académico de los investigadores a nivel nacional. En las principales instituciones de educación superior del país se requiere un nuevo sustrato académico en ciencia y tecnología, así como espacios propios y autónomos de investigación científica, llámense centros, institutos, parques o ciudadelas, que potencialicen el trabajo interdisciplinario más allá de la organización docente.

Hoy en día la gran mayoría de las instituciones de educación superior colombianas y latinoamericanas mantiene un modelo de organización por facultades idóneo para la formación de profesionales. En este sentido, resulta contradictorio que el artículo 20 de la **Ley 30 de 1992** reconoce únicamente este modelo de universidad para Colombia y en la actual propuesta de reforma no se plantea este aspecto fundamental. Así, el artículo mencionado, modificado por el artículo 263 del Decreto 1122 de 1999, considera como universidades aquellas instituciones que demuestren tener experiencia en investigación científica de alto nivel y programas académicos y de Ciencias Básicas que la sustenten. Sabemos muy bien que muy pocas instituciones pueden demostrar esto en Colombia. Resulta interesante anotar, además, que dichas exigencias claramente provienen de la reforma Patiño de 1965.

La investigación científica con resultados tecnológicos no le pertenece a la ingeniería, la medicina, la agronomía o las ciencias básicas por separado. Es cierto que los grupos de investigación en Colombia y sus estudios han nacido en la estructura de facultad, pero cuando se avanza hacia la generación de nuevo conocimiento, este deja de pertenecer a la facultad o escuela y se convierte en un trabajo de varias disciplinas que encuentra dificultades para su desarrollo por el estrecho esquema que actualmente ofrecen las escuelas o facultades.

Hay diversos factores que deben estudiarse sistemática y holísticamente a partir de categorías conceptuales de interdisciplinariedad para la acertada aplicación de tecnologías disruptivas. Dichas categorías conceptuales incluyen el ambiente sociopolítico, el desarrollo económico, la variedad de climas, la orografía, la geografía y, por supuesto, las instituciones, la cultura y la idiosincrasia. De ahí que los modelos de formación profesional del futuro no puedan ser uniformes y rígidos, sino adaptables a unas exigencias muy variadas y cambiantes.

El ejemplo paradigmático que se ha planteado aquí sobre el entorno tropical colombiano evidencia la importancia y la trascendencia de la adaptación de la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación a la realidad del país. Porque si en los países ubicados en la zona intertropical terrestre se aplican indiscriminadamente los conocimientos y las

soluciones difundidas a través de las revistas y los libros de otras latitudes en torno a temas como la biotecnología, la nanotecnología, los nuevos materiales, el abastecimiento de agua, la necesidad de fuentes no convencionales de energía, el cambio climático, y tantos otros asuntos neurálgicos aparentemente similares a los de otras regiones del planeta, las soluciones probablemente no serán las más beneficiosas, convenientes ni favorables para nuestro entorno porque “Todos los pueblos tenemos problemas similares, pero diferentes maneras de solucionarlos”, y la mejor manera de solucionar los problemas propios de nuestro entorno es invirtiendo en ciencias básicas y tecnología.

📍 **Horacio Torres Sánchez**

Profesor Emérito Universidad Nacional de Colombia, Miembro de Número Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Investigador Emérito MinCiencias

Referencias

- Álvarez-Lleras, J.** (2017). Contribución a la meteorología colombiana. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(Suplemento), 491-515. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.584>
- Álvarez-Lleras J.** (1940). Elementos de Meteorología Tropical. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 3(12), 439-447. <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/issue/view/48/179>
- Aranguren, D.** (2011). Desempeño de sensores de campo electrostático en sistemas de alerta de tormentas. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Bachelard, G.** (1987). *La formación del espíritu científico*. Editorial Siglo XXI.
- Bacon, F.** (1984). *Novum Organum Aforismos sobre la interpretación de la naturaleza y el reino del hombre*. Ediciones Orbis, S.A.
- Garavito A, J.** (1940). El clima de Bogotá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 3(12), 361-372.
- Krider E.P.** (2004). *Benjamin Franklin and the First Lightning Conductors*. International Commission on History of Meteorology.
- Ley 30 de 1992.** (1992). Por la cual se organiza el servicio público de la educación superior. Función Pública, Colombia.
- Mora-Osejo, L.E. & Fals-Borda, O.** (2003). *La superación del Eurocentrismo, Enriquecimiento del saber sistémico y endógeno sobre nuestro entorno tropical*. Libro manifiesto, Biblioteca Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Pabón, J.D.** (2017). Jorge Álvarez Lleras (1885-1952). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 41(Suplemento), 491. <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/584/374>
- Proceedings of the Second Scientific Pan American Congress.** (1917), Washington DC, USA, 1917.
- Torres, H.** (2024). Problemas en la confiabilidad eléctrica de aerogeneradores y celdas fotovoltaicas. *Revista Mundo Eléctrico. Bogotá*, 147,31-34.
- Torres, H.** (2021). The epistemological obstacle in electromagnetism. *Revista Dyna*, 88 (217). <https://doi.org/10.15446/dyna>.
- Torres, H.** (2017). La interdisciplinariedad en la ciencia del rayo. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(159), 174-186. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.475>
- Torres, H.** (2015a). *El rayo en el trópico, certezas temporales de investigación sobre el fenómeno del rayo*. Colección apuntes maestros, Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Torres, H.** (2015b). *La reforma que marcó a las universidades colombianas*. UN Periódico No. 185.
- Unidad de Planeación Minero-Energética, UPME.** (2020). *Plan Energético Nacional, 2020-2050*. Unidad de Planeación Minero-Energética, UPME
- Whipple, F.J.W.** (1929). On the association of the diurnal variation of electric potential in the weather with the distribution of thunderstorms over the globe. *Quaternarily Journal of the Royal Meteorologic Society*, 55, 1-17.
- Wilson, C.T.R.** (1921). III. Investigations on lighting discharges and on the electric field of thunderstorms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 221 (73-115). <http://doi.org/10.1098/rsta.1921.0003>

Opinion

Peixoto R, Voolstra CR, Stein LY, Hugenholtz P, Falcao Salles J, Amin SA, Häggblom M, Gregory A, Makhalanyane TP, Wang F, Agbodjato NA, Wang Y, Jiao N, Lennon JT, Ventosa A, Bavoil PM, Miller V, Gilbert JA. (2024). Microbial solutions must be deployed against climate catastrophe. *Nat Microbiol* 9, 3084-3085 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41564-024-01861-0>

This paper is a call to action. By publishing concurrently across journals like an emergency bulletin, we are not merely making a plea for awareness about climate change. Instead, we are demanding immediate, tangible steps that harness the power of microbiology and the expertise of researchers and policymakers to safeguard the planet for future generations.

This article has been co-published with permission in

- *Sustainable Microbiology* (<https://doi.org/10.1093/sumbio/qvae029>),
- *The ISME Journal* (<https://doi.org/10.1093/ismejo/wrae219>),
- *mSystems* (<https://doi.org/10.1128/msystems.01416-24>),
- *FEMS Microbiology Ecology* (<https://doi.org/10.1093/femsec/fiae144>),
- *Nature Microbiology* (<https://doi.org/10.1038/s41564-024-01861-0>),
- *Nature Reviews Microbiology* (<https://doi.org/10.1038/s41579-024-01123-0>),
- *Nature Reviews Earth and Environment* (<https://doi.org/10.1038/s43017-024-00611-4>),
- *Nature Communications* (<https://doi.org/10.1038/s41467-024-53680-w>),
- *Communications Biology* (<https://doi.org/10.1038/s42003-024-07108-2>),
- *Communications Earth and Environment* (<https://doi.org/10.1038/s43247-024-01817-6>),
- *npj Biodiversity* (<https://doi.org/10.1038/s44185-024-00066-2>),
- *npj Biofilms and Microbiomes* (<https://doi.org/10.1038/s41522-024-00591-9>),
- *npj Climate Action* (<https://doi.org/10.1038/s44168-024-00179-1>)
- *npj Sustainable Agriculture* (<https://doi.org/10.1038/s44264-024-00033-1>).

Microbial Solutions for Climate Change

News media are packed with warnings about climate change – those long-term shifts in temperature and weather patterns that today are largely attributed to human activities. Microbes, inextricably linked and key to planetary health, offer sustainable solutions.

The year 2024 promises to be the warmest one on record. During its 4.5-billion-year history, planet Earth has experienced changing climate conditions, but only during this last century has warming occurred so fast. Gases like carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O) naturally keep the atmosphere warm, a greenhouse effect necessary for life. However, our use of fossil fuels has overwhelmed our planet's capacity to regulate these gases, resulting in the steady increase of annual greenhouse gas (GHG) emissions in the last decades, reaching approximately 54 gigatons of CO₂ equivalents in 2023.

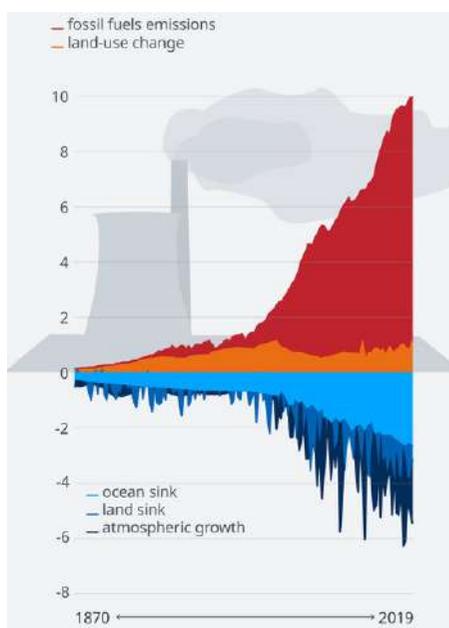


Figure 1. The global carbon budget. CO₂ emissions from human activities to the atmosphere and CO₂ absorbed by the natural carbon sinks. All values in billion tons of carbon per year. Source: <https://www.dw.com/en/fact-check-is-global-warming-merely-a-natural-cycle/a-57831350>

Nations recently met at the 29th session of the Conference of the Parties, COP29 in Baku, Azerbaijan, to negotiate initiatives and cooperation to tackle climate change. Since the first climate change COP in 1995 in Berlin, there have been advances, but there is still a long way to go. Public awareness has increased, and actions have been taken to reduce the use of fossil fuels and invest in renewable and sustainable practices. However, the reduction of GHG emissions has been uneven across nations, and policies to mitigate climate change have been slow. This means that we might be unable to meet the target of a 1.5°C increase in the world’s average surface temperature above pre-industrial levels by the year 2100. Temperatures above this threshold are predicted to alter ecosystems and lead to more extreme and irreversible climate effects.

Table. Examples of microbial strategies to tackle climate change. Source: <https://www.nature.com/articles/s41564-024-01861-0/tables/1>

Strategy	Mechanism of action	Benefits	Application
Carbon sequestration	Microbial enhancement of carbon sequestration in soils and oceans	Reduces atmospheric CO ₂ and enhances soil productivity	Agricultural and forestry sustainability and marine biosequestration
Methane oxidation	Use of methanotrophic bacteria to oxidize methane into less harmful compounds	Lowers methane emissions and can promote atmospheric removal; mitigates a potent greenhouse gas	Landfills; livestock management; inland freshwater bodies; wetlands
Bioenergy production	Cultivation of algae and other microbes for biofuel production	Provides renewable energy; reduces reliance on fossil fuels	Biofuel production; industrial applications
Bioremediation	Microbial breakdown of pollutants and hazardous substances	Improves environmental health; reduces toxin exposure	Industrial waste management; contaminated land and sediment restoration
Microbial therapies	Targeted microbiome management using microbial therapies (for example, probiotics, postbiotics, prebiotics); can mitigate harmful microbiomes and consequent environmental degradation; restoring beneficial microbiomes across hosts and ecosystems	Improves organismal and environmental health and can be applied to sustainable practices, which, in turn, minimizes greenhouse gas emissions	Wildlife and ecosystem restoration and rehabilitation; sustainable agriculture; human health
Nitrogen management	Engineering crops with symbiotic bacteria to fix atmospheric nitrogen or crops that produce biological nitrification inhibitors	Enhances soil fertility; reduces fertilizer use; increases plant nitrogen use efficiency; decreases eutrophication and greenhouse gas emissions	Sustainable agriculture; crop production

What can be done? A large group of scientists published an urgent call to action (appearing simultaneously in multiple journals) arguing for the use of microbial systems to confront this crisis. The proposal is to act now by harnessing microbial-based solutions and scientific expertise to help mitigate the escalating climate problems. Some examples of proposed solutions are shown in the table.

The authors suggest that the efficient implementation across borders of these microbiome-based approaches requires a decentralized yet globally coordinated strategy. They also propose the establishment of a global science-based climate task force, with representatives from scientific societies and institutions, to provide rigorous and evidence-based answers and solutions to relevant stakeholders such as country delegates and negotiators at the United Nations COP meetings. Science and researchers should be at the forefront, working together to assess strategies and responses required to curb the impacts of the current climate crisis and protect our planet for future generations.

María Mercedes Zambrano, Ph. D.

Directora Científica, Corporación Corpogen, Bogotá, Colombia
Dirección de Investigación y Transferencia de Conocimiento, Universidad Central,
Bogotá, Colombia

Small Things Considered

A blog for sharing appreciation of the width and depth of microbes and microbial activities on this planet. (<https://schaechter.asmblog.org/schaechter/>)

Links:

- <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>
- <https://cop29.az/en/home>
- <https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop>
- [https://www.ipcc.ch/sr15/#:~:text=Limiting%20warming%20to%201.5%C%20implies%20reaching%20net%20zero,particularly%20methane%20\(high%20confidence\)](https://www.ipcc.ch/sr15/#:~:text=Limiting%20warming%20to%201.5%C%20implies%20reaching%20net%20zero,particularly%20methane%20(high%20confidence))
- https://journals.asm.org/doi/10.1128/msystems.01416-24?_zs=51gpl&_zl=B0KA3

Soluciones microbianas para el cambio climático

Los medios de comunicación nos advierten constantemente sobre el cambio climático: los cambios a largo plazo en temperatura y patrones climáticos que hoy se atribuyen en gran medida a las actividades humanas. Los microorganismos, formas de vida claves para la salud planetaria, ofrecen soluciones sostenibles.

El año 2024 promete ser el más caliente jamás registrado. Durante sus 4.500 millones de años de historia, el planeta Tierra ha experimentado condiciones climáticas cambiantes, pero sólo durante este último siglo el calentamiento ha sido tan acelerado. Gases como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) calientan la atmósfera gracias a un efecto invernadero, el cual es necesario para la vida. Sin embargo, el uso de combustibles fósiles ha superado la capacidad del planeta para regular estos gases, resultando en un constante aumento de las emisiones anuales de gases de efecto invernadero (GEI) en las últimas décadas. Es así como en 2023 generamos aproximadamente 54 gigatoneladas de equivalentes de CO₂.

Recientemente se realizó la Conferencia de las Partes de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (COP29) en Bakú, Azerbaiyán. Esta conferencia pretende negociar iniciativas y cooperación para abordar el cambio climático. Desde la primera COP sobre cambio climático en 1995 en Berlín, ha habido avances, pero todavía queda un largo

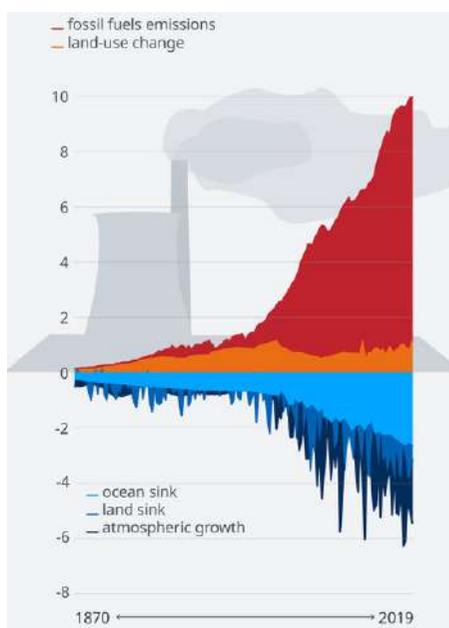


Figura 1. El presupuesto global de carbono. Emisiones de CO₂ a la atmósfera procedentes de actividades humanas y CO₂ absorbido por los sumideros naturales de carbono. Todos los valores en miles de millones de toneladas de carbono por año. Fuente: <https://www.dw.com/en/fact-check-is-global-warming-merely-a-natural-cycle/a-57831350>

camino por recorrer. La conciencia global del problema ha aumentado notablemente y se han tomado medidas para reducir el uso de combustibles fósiles e invertir en prácticas renovables y sostenibles. Sin embargo, la reducción de las emisiones de GEI ha sido desigual entre países y las políticas para mitigar el cambio climático han sido lentas. Esto significa que quizás no se logre cumplir la meta de aumentar en tan solo 1,5°C la temperatura media de la superficie del mundo por encima de los niveles preindustriales para el año 2100. Se prevé que las temperaturas por encima de este umbral alterarán los ecosistemas y conducirán a un clima más extremo e irreversible.

Tabla. Ejemplos de estrategias microbianas para mitigar el cambio climático. Fuente: <https://www.nature.com/articles/s41564-024-01861-0/tables/1>

Strategy	Mechanism of action	Benefits	Application
Secuestro de carbono	Mejora microbiana del secuestro de carbono en suelos y océanos	Reduce el CO ₂ atmosférico y mejora la productividad del suelo	Sostenibilidad agrícola y forestal y biosecuestro marino
Oxidación del metano	Uso de bacterias metanotróficas para oxidar el metano en compuestos menos dañinos	Reduce las emisiones de metano y puede promover su eliminación atmosférica; mitiga un potente gas de efecto invernadero.	Vertederos; gestión ganadera; masas de agua dulce continentales; humedales
Producción de bioenergía	Cultivo de algas y otros microbios para la producción de biocombustibles	Proporciona energía renovable; reduce la dependencia de combustibles fósiles	Producción de biocombustibles; aplicaciones industriales
Biorremediación	Descomposición microbiana de contaminantes y sustancias peligrosas	Mejora la salud ambiental; reduce la exposición a toxinas.	Gestión de residuos industriales; restauración de suelos contaminados y sedimentos
Terapias microbianas	La gestión específica del microbioma mediante terapias microbianas (por ejemplo, probióticos, posbióticos, prebióticos) puede mitigar los microbiomas dañinos y la consiguiente degradación ambiental; restaurando los microbiomas beneficiosos en todos los huéspedes y ecosistemas.	Mejora la salud de los organismos y del medio ambiente y puede aplicarse a prácticas sostenibles, lo que, a su vez, minimiza las emisiones de gases de efecto invernadero.	Restauración y rehabilitación de la vida silvestre y los ecosistemas; agricultura sostenible; salud humana
Gestión del nitrógeno	Ingeniería de cultivos con bacterias simbióticas para fijar el nitrógeno atmosférico o cultivos que produzcan inhibidores biológicos de la nitrificación.	Mejora la fertilidad del suelo; reduce el uso de fertilizantes; aumenta la eficiencia del uso de nitrógeno por parte de las plantas; disminuye la eutrofización y las emisiones de gases de efecto invernadero.	Agricultura sostenible; producción de cultivos

¿Qué se puede hacer? Un grupo de científicos publicó un llamado a actuar de forma urgente (que aparece simultáneamente en varias revistas) argumentando el uso de sistemas microbianos para enfrentar esta crisis. La propuesta es aprovechar los microorganismos y las soluciones que proveen, así como la experiencia científica, para mitigar los problemas generados por el cambio climático. Algunos ejemplos de soluciones propuestas se muestran en la tabla.

Para la implementación eficiente y amplia de enfoques basados en microbiomas, la comunidad de microorganismos que existen en un entorno particular, los autores sugieren una estrategia descentralizada pero coordinada a nivel global. También proponen el establecimiento de un grupo de trabajo científico e internacional, con representantes de sociedades e instituciones científicas, para proporcionar respuestas y soluciones rigurosas y basadas en evidencia a las partes interesadas, como los delegados de los países y los negociadores en las reuniones de la COP de las Naciones Unidas. La ciencia y los investigadores deben estar a la vanguardia, trabajando juntos para evaluar las estrategias y respuestas necesarias para frenar los impactos de la crisis climática actual y proteger nuestro planeta para las generaciones futuras.

María Mercedes Zambrano, Ph. D.

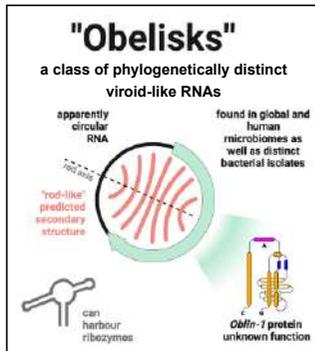
Directora Científica, Corporación Corpogen, Bogotá, Colombia
Dirección de Investigación y Transferencia de Conocimiento, Universidad Central,
Bogotá, Colombia

Enlaces:

- <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>
- <https://cop29.az/en/home>
- <https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop>
- [https://www.ipcc.ch/sr15/#:~:text=Limiting%20warming%20to%201.5%C%20implies%20reaching%20net%20zero,particularly%20methane%20\(high%20confidence\)](https://www.ipcc.ch/sr15/#:~:text=Limiting%20warming%20to%201.5%C%20implies%20reaching%20net%20zero,particularly%20methane%20(high%20confidence))
- https://journals.asm.org/doi/10.1128/msystems.01416-24?_zs=51gpl&_zl=B0KA3

Club de revistas/Journal Club

Graphical abstract



Reseña sobre el artículo

Zheludev, I.N., Edgar, R.C., Lopez-Galiano, M.J., de la Peña, M., Babaian, A., Bhatt, A.S., Fire, A.Z. (2024). Viroid-like colonists of human microbiomes. *Cell*, 187(23),6521-6536.e18.

Explorando la materia oscura microbiana

Exploring microbial dark matter

El mundo microbiano, invisible al ojo, es amplio y misterioso. Parte de él está compuesto por partículas virales cuyo material genético puede ser ADN o ARN (Koonin *et al.*, 2021). Los virus son ubicuos y abundantes y participan en la transferencia de genes entre organismos, por lo cual son importantes en su evolución. Las primeras descripciones a finales del siglo 19 definieron los virus como partículas infecciosas minúsculas capaces de atravesar los filtros que retienen las células de mayor tamaño. Luego se describieron como parásitos intracelulares dependientes de una célula hospedera para su crecimiento y replicación. Hoy se sabe que el mundo de los virus, la virósfera, es extenso y diverso (Edgar *et al.*, 2022; Zayed *et al.*, 2022) y, en muchos casos, desafía las descripciones iniciales (Koonin *et al.*, 2021).

A los virus se le suman otros elementos microscópicos como las moléculas de ADN o ARN satelital y los viroides. Estos últimos consisten en ARN cortos de entre 220 y 450 nucleótidos y, a diferencia de los virus, no codifican para proteínas, pues su replicación depende de la ARN polimerasa de la célula hospedera. En un trabajo reciente, Zheludev y colaboradores, de la Universidad de Stanford en Estados Unidos, evidenciaron que el conjunto de elementos microscópicos es todavía más extenso y desconocido de lo esperado (Zheludev *et al.*, 2024). Utilizando herramientas bioinformáticas y bases de datos sólidas y abiertas, identificaron un nuevo grupo de elementos microscópicos cuyo material genómico es el ARN, al cual llamaron obeliscos (*obelisks*).

El equipo de investigadores se propuso identificar posibles viroides y agentes similares cuyos pequeños genomas contienen poca información. En comparación con los virus de ARN (Riboviria), se conocen pocas partículas del tipo viroides debido, en gran medida, a que son difíciles de identificar. La ausencia de moléculas esenciales para su replicación, como las ARN polimerasas, hace inviable su identificación mediante búsquedas basadas en la homología. Por lo tanto, los investigadores procedieron a diseñar una nueva aproximación bioinformática independiente de la homología a la que llamaron *Viroid Nominator* o *VNom*, capaz de identificar secuencias con características deseadas, como genomas pequeños e formación de secuencias circulares, a partir de datos de secuenciación del ARN (RNA-seq).

La búsqueda inicial de elementos del tipo viroides se hizo utilizando *VNom* para analizar los metatranscriptomas, o de ARN metagenómico, proveniente de muestras longitudinales de heces de 104 donantes humanos. Con este análisis encontraron 15 secuencias novedosas, es decir, sin homología con secuencias presentes en las bases de datos. Estos ARN estaban presentes en siete de las 104 muestras analizadas; tenían aproximadamente 1.000 nucleótidos (nt) de longitud y una estructura secundaria predicha en forma de vara extendida (*rod*) debido al apareamiento de bases, motivo por el que se les dio el nombre de *obelisk-alpha* (*obelisk-α*). El ARN del *obelisk-α* codifica para dos proteínas, *oblina-1* y *oblina-2*, de 202 y 53 aminoácidos, respectivamente, que tampoco tenían secuencias homólogas en las bases de datos de referencia. Estas características sugieren que el *obelisk-α* es un tipo de viroide novedoso presente en microbiomas humanos.

Pero ¿en dónde más podrían encontrarse este tipo de elementos? Se hizo entonces una búsqueda más extensa utilizando k-meros (subsecuencias de longitud k) para indagar 3,2 millones de secuencias metagenómicas de la base de datos SRA (Sequence Read Archive,

el repositorio público más grande de secuenciación de alto rendimiento). De esta manera se identificaron 21 ARN adicionales de características similares, incluido un elemento con leves diferencias que denominaron *obelisk beta* (*obelisk-β*). Estos elementos se encontraron únicamente en bases de datos de ARN, y no de ADN, lo cual confirma que sus genomas son de ARN, al igual que los viriones. Ambos elementos, el *obelisk-α* y el *obelisk-β*, tienen genomas pequeños que forman estructuras de vara y contienen las proteínas *obli-1* y *-2*. Al buscar homólogos de estas dos proteínas en otros repositorios, en este caso de ensamblajes de virus de ARN (*RNA deep virome assemblage*, RDVA), identificaron 38.500 posibles obeliscos. Con esta información ampliada volvieron a sondear la base de datos SRA usando modelos de Markov (pHMM) y encontraron obeliscos con una o ambas de las proteínas *obli-1* y *obli-2*. Por último, hicieron una búsqueda para identificar ribozimas, moléculas de ARN que actúan como enzimas y participan en el ciclo de replicación de los viroides, y encontraron 339 obeliscos con ribozimas. Así pues, estos elementos codifican para una o dos proteínas y, en algunos casos, para ribozimas. Como resultado de las múltiples búsquedas bioinformáticas utilizando datos de diversos ambientes y geografías, el grupo de investigadores identificó 29.959 obeliscos únicos presentes en diferentes nichos ecológicos además del microbioma humano. En resumen, estos elementos no tienen homología con virus u otros elementos descubiertos anteriormente, forman un grupo filogenético propio, son diversos y de distribución global.

Con el fin de determinar características distintivas en las recién identificadas proteínas *obli-1* y *obli-2* codificadas por los obeliscos, las dos se sometieron a predicciones estructurales utilizando ColabFold (Mirdita *et al.*, 2022), una implementación de AlphaFold (Jumper *et al.*, 2021), que es un desarrollo basado en inteligencia artificial cuya capacidad para predecir estructuras proteicas fue merecedora del Premio Nobel de Química en 2024. A pesar de sus variaciones, las diferentes *obli-1* contienen una región conservada que carece de estructura terciaria evidente y otro dominio que forma una estructura globular. Por su parte, las *obli-2* poseen una α -hélice con un motivo llamado cremallera de leucina (*leucine zipper*) que sirve para reunir y generar oligomerización de proteínas. Los autores especulan que, en conjunto con las ribozimas presentes en algunos obeliscos, dichas proteínas podrían participar en la replicación.

Si bien los análisis bioinformáticos revelan que estos elementos están presentes en diversas muestras depositadas en bases de datos, es importante identificar células que los alberguen y, si posible, verificar las predicciones bioinformáticas en el laboratorio. Con este fin, los investigadores se centraron en microbiomas menos complejos e identificaron una bacteria comensal del microbioma oral, *Streptococcus sanguinis*, que contenía un elemento con características de obelisco (tamaño, estructura secundaria, homología con las *obli-1* y complementariedad de secuencia). Utilizando RT-PCR lograron amplificar la secuencia del obelisco, verificando así su presencia en un hospedero bacteriano. También encontraron que algunos cultivos perdían el obelisco durante el crecimiento. Sin embargo, la falta del obelisco no alteró el crecimiento de *S. sanguinis*, lo que sugiere que no es esencial para su hospedero. El hallazgo de un sistema hospedero-obelisco permite realizar estudios en el laboratorio para entender aspectos como los mecanismos de replicación y su posible transmisión entre células.

Quedan muchas preguntas por resolver sobre estos obeliscos. Por ejemplo, ¿cuáles son los hospederos en ambientes naturales? ¿Cómo interactúan con diversas formas de vida? ¿Cómo se replican y transmiten entre organismos y qué funciones cumplen? Dada la dificultad para detectar elementos novedosos, es posible que este estudio subestime la diversidad real de los obeliscos. También es probable que existan otros tipos de elementos de ARN aún por descubrir. Lo que sí es indudable es que la creatividad para desarrollar estrategias bioinformáticas aunada a la exploración sistemática de la información depositada en bases de datos abiertas, hace posible descifrar la información genómica y

revelar nuevos componentes de nuestra biósfera (**Hou et al.**, 2024). El estudio de Zheludev y colaboradores revela la existencia de elementos invisibles al ojo cuya simple existencia implica procesos evolutivos e interacciones que aún desconocemos, pero que pueden ser relevantes en diversos procesos y formas de vida en nuestro planeta.

María Mercedes Zambrano, Ph. D.

Directora Científica, Corporación Corpogen, Bogotá, Colombia
Dirección de Investigación y Transferencia de Conocimiento, Universidad Central,
Bogotá, Colombia

Referencias

- Edgar, R.C., Taylor, B., Lin, V., Altman, T., Barbera, P., Meleshko, D., Lohr, D., Novakovsky, G., Buchfink, B., Al-Shayeb, B., Banfield, J.F., de la Peña, M., Korobeynikov, A., Chikhi, R., Babaian, A. (2022). Petabase-scale sequence alignment catalyses viral discovery. *Nature*, 602(7895),142-147.
- Gou, Q.Y., Xin, G.Y., Le, S.J., Xia, Y.Y., Zhou, Y.L., Hui, F.M., Pan, Y.F., Eden, J.S., Yang, Z.H., Han, C., Shu, Y.L...Shi, M. (2024). Using artificial intelligence to document the hidden RNA virosphere. *Cell*, 187, 1-14
- Hou, X., He, Y., Fang, P., Mei, S.Q., Xu, Z., Wu, W.C., Tian, J.H., Zhang, S., Zeng, Z.Y., Gou, Q.Y., Xin, G.Y., Le, S.J., Xia, Y.Y., Zhou, Y.L., Hui, F.M., Pan, Y.F., Eden, J.S., Yang, Z.H., Han, C., Shu, Y.L...Shi, M. (2024). Using artificial intelligence to document the hidden RNA virosphere. *Cell*, 187, 1-14
- Koonin, E.V., Dolja, V.V., Krupovic, M., Kuhn, J.H. (2021). Viruses defined by the position of the virosphere within the replicator space. *Microbiology Molecular Biological Review*, 85, e00193-20.
- Mirdita, M., Schütze, K., Moriwaki, Y., Heo, L., Ovchinnikov, S., Steinegger, M. (2022) ColabFold: making protein folding accessible to all. *Nature Methods*, 19(6), 679-682.
- Jumper, J., Evans, R., Pritzel, A., Green, T., Figurnov, M., Ronneberger, O., Tunyasuvunakool, K., Bates, R., Židek, A., Potapenko, A., Bridgland, A., Meyer, C., Kohl, S.A.A., Ballard, A.J., Cowie, A., Romera-Paredes, B., Nikolov, S., Jain, R., Adler, J., Back, T... Hassabis, D. (2021). Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature*, 596(7873), 583-589.
- Zayed, A.A., Wainaina, J.M., Domínguez-Huerta, G., Pelletier, E., Guo, J., Mohssen, M., Tian, F., Pratama, A.A., Bolduc, B., Zablocki, O., Carradec, Q., da Silva, C., Labadie, K., Poulain, J., Ruscheweyh, H.J., Salazar, G., Shatoff, E., Coordinators, T.O., Bundschuh, R., Fredrick, K., ..., Sullivan, M.B. (2022). Cryptic and abundant marine viruses at the evolutionary origins of Earth's RNA virome. *Science*, 376(6589),156-162.
- Zheludev, I.N., Edgar, R.C., Lopez-Galiano, M.J., de la Peña, M., Babaian, A., Bhatt, A.S., Fire, A.Z. (2024). Viroid-like colonists of human microbiomes. *Cell*, 187(23),6521-6536.e18.

Club de revistas/Journal Club

Reseña sobre el artículo

Nguyen, D.C., Hentenaar, I.T., Morrison-Porter, A. *et al.* (2024). SARS-CoV-2-specific plasma cells are not durably established in the bone marrow long-lived compartment after mRNA vaccination. *Nature Medicine*. <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03278-y>

La persistencia de la memoria

The persistence of memory



<https://openverse.org/image/300f16ea-ac18-45f1-bbaa-40656fcf8662?q=Salvador+dali>

En una de sus fantásticas pinturas surrealistas, *La Persistencia de la Memoria*, Salvador Dalí retrata la maleabilidad del tiempo usando imágenes de relojes afectados por fenómenos como la temperatura y la gravedad. Esta metáfora pictórica, tan surrealista como la pandemia de COVID-19 que llegó en el siglo XXI, evoca la fragilidad frente al cambio de variables que consideramos inmodificables en nuestra vida.

Desde los primeros estudios inmunológicos sobre el virus SARS-CoV-2, se determinó que la respuesta inmune humoral, mediada por linfocitos B y anticuerpos, se desvanecía rápidamente, incluso antes de seis meses desde la infección, en tanto que la respuesta de los linfocitos T contra el virus resultaba más estable a lo largo del tiempo. En ambos tipos de respuesta adaptativa, la humoral y la celular, se genera una memoria inmune específica tras la exposición a los antígenos, en este caso virales, que debe protegernos de futuras infecciones con el mismo microorganismo, asegurando la persistencia de una memoria antigénica. La respuesta mediada por anticuerpos es esencial para neutralizar la entrada del virus a las células en las etapas iniciales de la infección, sin embargo, la generación de anticuerpos tiene duración limitada. Esta característica de la inmunidad humoral, además de la aparición de variantes del SARS-CoV-2, complicaron el panorama de la respuesta inmune protectora frente a la infección por el virus y la efectividad de las vacunas contra este agente.

Las células encargadas de la persistencia de la respuesta humoral de memoria específica son conocidas como células plasmáticas de vida larga (*long-lived plasma cells*, LLPC) derivadas de linfocitos B maduros y activados por antígenos en los nódulos linfáticos, las cuales migran y se localizan en la médula ósea. En estudios de inmunización con la vacuna de ARN mensajero que codifica la proteína de espícula (S) del virus SARS-CoV-2, se demostró la inducción de las LLPC, pero este fenómeno no estaba directamente asociado con la persistencia de los anticuerpos.

En el estudio que se comenta, publicado en *Nature Medicine*, se determinaron las células plasmáticas secretoras de anticuerpos (*antibody-secreting cells*, ASC) específicas para la proteína de la espícula del SARS-CoV-2 en muestras de médula ósea hasta 33 meses después de la vacunación contra el virus con ARN mensajero. Las células ASC evaluadas correspondían tanto a células de vida corta (*short-lived plasma cells*, SLPC) como a LLPC. Además, se comparó esta respuesta con la inducida por la vacunación contra el tétanos, cuya respuesta humoral puede perdurar hasta 10 años, y con la vacunación contra el virus de la influenza, cuyos anticuerpos también decaen en un período de meses. Se estudió la respuesta inmune con células humanas en un modelo de cultivo *in vitro*, la detección puntual de dicha respuesta en un grupo de individuos y el seguimiento en el tiempo en dos donantes.

Se identificaron los patrones de células ASC específicas para IgG de influenza, tétanos y SARS-CoV-2 según la subpoblación de plasmocitos. En el compartimiento de las SLPC se encontraron altas frecuencias de células específicas para los tres antígenos vacunales, con valores muy similares. En cambio en el compartimiento de las LLPC solo se detectaron células específicas para el virus de la influenza y el tétanos, pero no para el SARS-CoV-2. La no detección de estas células específicas para SARS-CoV-2 en el ELISPOT estuvo acompañada de una baja producción de anticuerpos específicos identificados por ELISA en los sobrenadantes del cultivo.

De forma interesante, en una cohorte pequeña de donantes se demostró que la presencia de LLPC específicas para SARS-CoV-2 no se asoció a variables como la edad, el número de dosis de la vacuna ni la presencia o ausencia de infección en respuesta a la vacunación. Los anticuerpos séricos IgG contra SARS-CoV-2 disminuyeron entre los tres y los seis meses después de la inmunización, mientras que los niveles de anticuerpos séricos contra la influenza y el tétanos fueron más estables en el tiempo. Esto se asoció con una mayor frecuencia de LLPC en la médula ósea con estas mismas vacunas, pero no con la vacuna de SARS-CoV-2. El seguimiento de dos individuos mediante aspirado repetido de médula ósea y medición sérica de anticuerpos arrojó resultados similares, con una caída en los anticuerpos IgG anti-SARS-CoV-2 y una presencia ocasional de LLPC específicas para este virus.

En este modelo las ASC recién generadas por la vacunación con ARN mensajero contra SARS-CoV-2, y las probablemente producidas durante la infección, no habrían logrado alcanzar su estatus de vida larga, incluso después de haber llegado a la médula ósea tras la vacunación. Un posible defecto desconocido en el programa de diferenciación o mantenimiento impide que se logren LLPC tras la inmunización contra SARS-CoV-2.

Los dos factores fundamentales en el desarrollo de este tipo de respuesta inmune son el humano y el virus. En el humano la respuesta inmune puede ser diferencial, no obstante, con la vacuna contra el SARS-CoV-2 se observa inicialmente una alta producción de anticuerpos asociada a la reactividad del centro germinal en los nódulos linfáticos. Allí una subpoblación de linfocitos T ayudadores (Th), conocida como T folicular (ThF), produce citocinas para inducir y mantener la diferenciación de linfocitos B. Es de resaltar que los linfocitos ThF se encuentran alterados durante la infección aguda por SARS-CoV-2, aparentemente debido a la acción directa del virus, lo que lleva a una caída de anticuerpos en el tiempo. Al migrar del ganglio linfático a la médula ósea, los linfocitos B específicos no encuentran el ambiente adecuado para generar LLPC. Por otro lado, se cuestiona la

capacidad de las proteínas de los virus ARN, como los coronavirus, de tener estructuras organizadas y repetitivas que permitan mantener una respuesta humoral. Por último, la mayoría de las vacunas contra el SARS-CoV-2, excepto la del virus completo inactivado, están compuestas por la proteína S, ya sea en el ARN mensajero, la proteína recombinante o el vector de adenovirus. Sería interesante investigar si dicha proteína S, natural o vacunal, puede afectar la diferenciación de linfocitos B a plasmocitos de vida larga, lo que podría representar una ventaja del virus frente a la respuesta inmune.

Así como Dalí transformó la percepción del tiempo con una visión surrealista que cuestiona la realidad, la pandemia nos llevó a reconsiderar nuestra comprensión del sistema inmunológico, sus limitaciones y sus capacidades de adaptación frente a nuevos retos como lo fueron el SARS-CoV-2 y la COVID-19.

John M. González MD, Ph. D.

Profesor Titular - Universidad de los Andes
Miembro Correspondiente ACCEFYN

Agradecimientos - Acknowledgements

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Volumen 48, números 186, 187, 188 y 189.

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 2024, en la valoración crítica de los artículos presentados a la revista, por su valiosa contribución, esfuerzo y tiempo dedicado.

Ada Acevedo	Guillermo Páramo	Lily O. Rodríguez
Adriana Kloster	Harold José Camargo Ávila	Luis Carlos Arboleda Aparicio
Aida Elena Baca	Harrie Sipman	Luis Germán Naranjo Henao
Álvaro Idárraga-Piedrahíta	Héctor Ramírez-Chávez	María Cristina Carrasquilla Ferro
Andrea Morales-Rozo	Helena Luisa Brochero	María Eugenia Morales
Ashley Sharpe	Hernán Alberto Revelo Cuaspu	María Gladis Rosero Alpala
Camilo Younes Velosa	Hugo López	María Sánchez de Staf
Carlos Alberto Parra Osorio	Hugo Mantilla	María Teresa Alarcón
Carlos Arturo Navas	Humberto Sarria	Mariana Brea
Carlos Augusto Molina	Ires Paula de Andrade Miranda	Martha Lucia Palacios Peñaranda
Carlos Castañeda-Posadas	Ismael Piñeres	Mary Lee Berdugo
Carlos Molineri	Ivanklin Soares Campos-Filho	Mauricio Aguilar
Carlos Pinilla	Jaime Aguirre Ceballos	Miguel Ángel Méndez-Galeano
César Augusto Aguilar Puntriano	Jaime Roberto Muñoz Luque	Natalia J. Pérez-Amaya
Cesar Tamaris Turizo	James Montoya	Natalia Ramírez-Zamudio
Cristian Goetz Theran	Javier Colmenares	Nataly Castelblanco-Martínez
David Brito Zapata	Jeison Lenis Chaparro-Cárdenas	Néstor García
Diana Karina Rojas Briñez	Jesús Eduardo Ortega	Néstor Mancera
Diógenes Campos Romero	Jesús Orlando Rangel Churio	Oscar Riaño
Eduardo Brieva	Joaquín Pelkowski	Patricia Chacón de Ulloa
Edwin Andrés Quintero Salazar	Jorge Alberto Molina Escobar	Paula Beatriz Araujo
Edwin Roza Albarracín	Jorge Enrique García Melo	Pedro Ricardo Dueñas Ramírez
Eliana Marcela Barrios Vásquez	Jorge Iván Zuluaga	Reiner Palomino Lemus
Enrique Javier Peña Salamanca	José Alberto Tlacuilo Parra	Ricardo Álvarez-León
Euler Eugenio Coral Escobar	José Daniel Pabón Caicedo	Roberto Enrique Martínez
Felber J. Arroyave B	José Julián Tavera	Martínez
Felipe Guhl	José Luis Cántaro Segura	Roberto José Guerrero
Fernando Zalamea	José Murillo-A.	Rocío del Pilar Cortés
Francisco Alejandro Sánchez Barrera	Juan Camilo Ríos-Orjuela	Samuel Serna Otálvaro
Francisco Antonio Villa	Juan Carlos Narváez	Santiago Vargas Domínguez
Frank Rodolfo Fonseca	Juan Manuel Carvajalino Fernández	Víctor Hugo Serrano Cardozo
Germán Antonio Pérez Alcázar	Juan Sebastián Trujillo	Xavier Cornejo
Germán Chaparro Molano	Julián Andrés Aguirre S.	Xiomara Legarda
Guido Fabián Medina Rangel	Leslie Landrum	Zuleyma Mosquera Murillo

Índice de autores - Index of Authors

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Volumen 48, números 186, 187, 188 y 189.

- Agustín E. Bravo-Rodríguez, 606
Alberto Gómez-Gutiérrez, 178
Alejandro Bernal-Vélez, 723
Alejandro Peña, 871
Álvaro A. Cogollo-Pacheco, 354
Amanda Subalusky, 397
Andrea C. Sarmiento-Toro, 491
Andrea Carolina Ramos-Hernández, 752
Andrés Felipe Grajales-Andica, 281
Andrés Pérez-Uribe, 957
Ángel Alejandro Salazar-Vega, 551
Ángel M. Sánchez, 7
Ángel Martín Rodríguez del-Castillo, 551
Angela Zapata, 491
Aracely del Carmen García-Cuan, 65
Azubuike S. Ekwere, 131
Bibiana Moncada, 831
Bruno D'Amore, 195
Camila Martínez, 922
Camila Pizano, 922
Camilo Ernesto Angarita-Yanes, 314
Camilo Hurtado, 768
Camilo Loaiza, 564
Carlos A. Nisperuza-Pérez, 606
Carlos A. Parra-Vargas, 474
Carlos A. Rivera, 491
Carlos Jaramillo, 424, 922
Carlos Mario López-Orozco, 606
Carlos Parra-O, 298, 307
Carlos Silvera-Redondo, 65
César Román-Valencia, 582
Clemente Forero Pineda, 695
Dámaso W. Ramírez, 595
Daniel Alejandro Gómez, 723
Daniel Alfonso-Santiesteban, 671
Daniel R. Molina-Velasco, 65
Darwin M. Morales-Martínez, 404
David A. Landínez Téllez, 474, 742
David Echeverri López, 407
David Santamaría-Castiblanco, 397, 564
Delly Rocío García-Cárdenas, 281
Diana C. Villamil-Pasito, 491
Diana Karen Pérez-Lara, 922
Diego A. Barrera-Moscoso, 595
Diego Bogarín, 424
Diego Casallas-Pabón, 341
Diego Giraldo-Cañas, 298
Diego Rincón-Murillo, 831
Diego Simijaca, 831
Dirley Cortés, 216
Dolors Armenteras, Ph.D., 210, 438, 967
E. Hanz Rodríguez-Cabrera, 551
Edgar Cristancho, 523
Edgar Chaparro, 623
Edgardo Londoño-Cruz, 79
Edison D. Bonilla-Liberato, 94, 508
Edmon Castell-Ginovart, 7
Eduardo Alexander Sarmiento-Téllez, 7
Edwin O. López-Delgado, 94, 508, 886
Edwin Trujillo-Trujillo, 86, 298
Eliana M. Vargas-Pineda, 742
Elisabeth Jiménez-Carmona, 491
Elizabeth Anderson, 397
Elliot Doornbos, 413
Ernesto Campos-Pineda, 897
Esperanza Ruiz-Marín, 871
Fabian L. Mesa-Roberto, 491
Fabio Andrés Ávila, 537
Fausto Moreno Bonilla, 307
Felipe Cárdenas-Arroyo, 723
Felipe Cervantes-Sodi, 431
Felipe Ortiz-Ferreira, 638
Francisco Barahona, 852
Gabriel Merizalde, 109
Gean Carlos Arteaga-Arroyo, 752
Germán A. Prieto, 205
Germán Jiménez, 397
Gian Paolo Daguer, 307
Gina A. Romero-Galindo, 491
Gina Diaz-Rodríguez, 564
Giulia Raunelli, 368
Grecia Torres-Ccasani, 595
Gustavo A. López-Saldaña, 25
Guy Louarn, 752
Héctor E. Ramírez-Chaves, 404
Héctor Esquivel, 831
Hernán Ortega, 368
Horacio Torres Sánchez, 970
Hugo Díez-Santaolalla, 7
Hugo F. López Arévalo, 564
Humberto Garcés B., 852
Ibrahim Torres-Mahmud, 742
Indra Candanedo, 852
Indry M. Saavedra-Gaona, 474
Isabella Gonzalez-Gamboa, 491
J Orlando Rangel-Ch, 807
J. Alejandro Martínez, 145
J. Gregorio Portilla, 784
J. Leonardo Soto-Summano, 25
Jaime E. Forero-Romero, 638
Jaime Ricardo Rosero-Noguera, 859
Jairo H. Pinto-Z, 807
Jairo Roa-Rojas, 474, 742
James L. Luteyn, 807
Jaume Pellicer, 445
Javier Cuellar, 86
Jean Christian Guy-Bernede, 752
Jhonatan Gutiérrez-Garaviz, 383
Jhoynner Tapia, 551
Joan Sebastián Joya-Mesa, 7
Joel Bernal O., 658
Johans Restrepo, 271
John M. González MD, Ph. D., 226, 985
Johnny Cano-Guevara, 551
Jonathan Romero-Atencio, 752
Jonathan S. Pelegrin, 963
Jorge A. Quirós-Rodríguez, 606
José Aguilar-Cano, 537
José Apaza, 368
José Barba-Ortega, 483
Jose Iván Campos-Rozo, 658
José L. Cendejas-Valdez, 25
José Luis Fernández-Alonso, 38, 354, 897
José Murillo-A., 417
Josué David Hernández-Varela, 431
Juan Bory-Reyes, 671
Juan Esteban Agudelo, 658
Juan Guillermo McEwen MD. Ph.D., 955
Juan Reyes-Larico, 623
Juliana Poveda-Cantini, 523
Karlene Yupe-Rosero, 551
Katia Aylas, 368
Kember Mejía, 551
Laura J. Nova-León, 564
Laura Vanessa Parra-Mesa, 474
Leidy P. Alfonso A., 658
Lelia Quispe-Huamán, 169
Lenin D. Chumbe-Nolasco, 368
Lina F. Mora Ballen, 491
Lina M. García-Loaiza, 564
Lina María Pachón-Blanco, 871
Linda Cattin Guenadez, 752
Lisa Pokorny, 445
Lucero Stephany Amézquita-Bejar, 368

- Lucimar Gomes-Dias, 582
Luis F García, 109, 691
Luis Gonzalo Salinas-Jiménez, 582
Luisa Consiglieri, 254
Luisa F. Buriticá-Ruíz, 145
Ma. Elena Benítez-Ramírez, 25
Mabel G. Pimiento-Ortega, 491
Magaly Alejandra Brousett-Minaya, 623
María Alejandra Perdomo-Gaitán, 7
María Fernanda Bustos-Hernández, 7
María Fernanda Cardona-Gutiérrez, 79
María Fernanda González, 658
María L. Rendón, 145
María Mercedes Zambrano, Ph. D., 208, 222, 977, 982
María P. Bapstiste, 564
María Paula Silva-Arévalo, 638
Marie Jöelle Giraud-López, 7
Mario Alberto Romero-Colange, 752
Mario H. Londoño-Mesa, 79
Marlon Peláez-Rodríguez, 383
Martha Patricia Ramírez Pinilla, 396
Masashi Takatsuka, 325
Melissa F. Forero-Castellanos, 508
Miguel Bobadilla Álvarez, 623
Miryam Rincón-Joya, 483
Moisés Wasserman, Ph.D., 952
- Natalia Acevedo Gómez, 723
Nathaly Calvo-Roa, 271, 341
Nelly Rodríguez-Eraso, 871
Néstor Hernando Campos-Campos, 606
Néstor Roncancio-Duque, 404
Nicolás Piragua-Ortiz, 742
Nilmar Gómez, 86
Nubia León-Lopez, 491
Odete Rocha, 383
Olga L. Montenegro-Díaz, 564
Orlando Vargas-Ríos, 871
Oscar A. Pérez-Escobar, 424
Oscar Agredo-Jiménez, 383
Oscar Perdomo, 86
Paola A. Arias, 145
Paola A. Niño-Muñoz, 638
Pedro Fernández de Córdoba,
Rafael Moreno-Arias, 401, 564
Rafael Muñoz-Tamayo, 859
Ramón Morales, 449
Ricardo Abreu-Blaya, 671
Ricardo Gutiérrez-De Aguas, 65
Robert Lücking, 831
Román Castañeda, 768
Sabina Alejandra Hernández-Abril, 871
Salomón Kalmanovitz, 961
Salomón M. Ramírez-Jaramillo, 797
- Samuel Valdés-Díaz, 852
Sandra Lucía Posada-Ochoa, 859
Sandra V. Flechas, 687
Santiago Giraldo-Cárdenas, 145
Santiago Vargas-Domínguez, 658
Sebastián Escobar, 551
Silvia Valenzuela, 368
Simón Ulloa-Rengifo, 7
Skarleth Estefanía García-Trujillo, 431
Sofía Fernández Africano, 407
Sofía Guevara-Montoya, 638
Tania Marisol González, 210
Tania Moreno-García, 671
Tatiana E. Lozano-Suárez, 94, 508
Valentina I. Burbano A., 658
Valentina Ramos-Mosquera, 886
Víctor González-Fernández, 723
Víctor M. Castaño, 451
Victor Peña-Macías, 936
Victor Vásquez, 922
William Alexander Aperador-Chaparro, 483
William Armando Tapie, 859
William Villamil, 491
Yaneth Muñoz-Saba, 7, 341
Yuli Dulcina Espinoza-Rojas, 368

Índice de artículos - Index of Articles

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Volumen 48, números 186, 187, 188 y 189.

Ciencias del Comportamiento Behavioral Sciences	Artículo original
	Imaginario colectivo y conflicto entre humano y animal feral en el Páramo del Almorzadero (Santander, Colombia)
	Collective imaginaries and human-feral animal conflict in the Páramo del Almorzadero (Santander, Colombia) 7
	Artículo original
Primeras fechas arqueológicas tempranas en la sierra de Nariño (Colombia): asentamientos humanos y actividad del volcán Galeras	
First early archaeological dates in the Sierra of Nariño (Colombia): Human settlements and activity of the Galeras volcano 723	
Artículo original	
Estudio del índice de radiación ultravioleta en la zona Centro Occidente de México, su asociación con el riesgo de cáncer de piel y propuesta tecnológica para la difusión y prevención del riesgo	
Study of the ultraviolet radiation index in the Central Western area of Mexico, its association with the risk of skin cancer, and a technological proposal for the dissemination of the problem and its prevention 25	
Original article	
Analytical solutions in the modeling of the endovenous laser ablation	
Soluciones analíticas en la modelación de la ablación endovenosa con láser 254	
Artículo original	
Respuesta dinámica de la magnetización de una nanopartícula de magnetita a un campo magnético alterno	
Dynamic response of the magnetization of a magnetite nanoparticle to an alternating magnetic field 271	
Original article	
Ca₂TiFeO₆ ordered perovskite: A comprehensive study of its structure and magnetic attributes	
Perovskita ordenada Ca ₂ TiFeO ₆ ; un estudio exhaustivo de su estructura y atributos magnéticos 474	
Original article	
Optimizing corrosion resistance of anodized TiO₂ coatings through controlled calcination parameters	
Optimización de la resistencia a la corrosión de recubrimientos de TiO ₂ anodizados mediante parámetros controlados de calcinación 483	
Original article	
Effect of granularity on the superconducting parameters of the YBa₂Cu₃O_{7-δ} superconducting material	
Efecto de la granularidad en los parámetros superconductores del material superconductor YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} 742	

Artículo original	
Desarrollo y evaluación de celdas fotovoltaicas orgánicas nanoestructuradas	
Development and evaluation of nanostructured organic photovoltaic cells	752
Original article	
Quantum operator for non-paraxial single photon interference	
Operador cuántico para la interferencia no-paraxial con fotones individuales	768
Artículo original	
Cuatro nuevas especies de <i>Quararibea</i> “grupo grandifolia” (Malvaceae) de Colombia y Ecuador	
Four new species of <i>Quararibea</i> “grandifolia group” (Malvaceae) from Colombia and Ecuador	38
Artículo original	
Obtención y caracterización estructural de β-D-glucanos de la seta comestible <i>Pleurotus pulmonarius</i>	
Obtention and structural characterization of β -D-glucan from the edible mushroom <i>Pleurotus pulmonarius</i>	65
Original article	
First Record of <i>Parasphaerosyllis malimalii</i> (Polychaeta: Syllidae) from Gorgona Island (Colombian Pacific)	
Primer registro de <i>Parasphaerosyllis malimalii</i> (Polychaeta: Syllidae) en la isla Gorgona (Pacífico colombiano)	79
Artículo original	
<i>Epidendrum chloronanum</i> (Orchidaceae): primer registro en la flora de Colombia	
<i>Epidendrum chloronanum</i> (Orchidaceae): first record for the flora of Colombia	86
Artículo original	
¿Cómo ha evolucionado el tráfico ilegal de fauna en el Tolima? Análisis multitemporal de una amenaza para la biodiversidad	
How has the illegal wildlife trade evolved in Tolima? Multi-temporal analysis of a threat to biodiversity	94
Artículo original	
El efecto del complejo mayor de histocompatibilidad sobre el olfato y la selección sexual en aves	
The effect of the major histocompatibility complex on olfaction and sexual selection in birds	109
Artículo original	
Diversidad taxonómica de hormigas en áreas verdes urbanas en una ciudad de tamaño medio en los Andes centrales de Colombia	
Taxonomic diversity of ants in urban green areas in a medium-sized city in the Central Andes of Colombia	281
Artículo original	
Una nueva especie de <i>Souroubea</i> (Marcgraviaceae, Ericales) de Colombia	
A new species of <i>Souroubea</i> (Marcgraviaceae, Ericales) from Colombia	298
Artículo original	
<i>Myrcia coquiensis</i> (Myrtaceae), una nueva especie de los bosques húmedos tropicales del Chocó, Colombia	
<i>Myrcia coquiensis</i> (Myrtaceae), a new species from the tropical humid forests of Chocó, Colombia	307

Artículo original

Nuevos registros de la marmosa grácil duende *Gracilinanus dryas* (Marsupialia: Didelphidae) en la cordillera Oriental de Colombia, con notas sobre su biología reproductiva y ontogenia

New records of the wood sprite gracile mouse opossum *Gracilinanus dryas* (Marsupialia: Didelphidae) from the Colombian Eastern Cordillera with notes on its reproductive biology and ontogeny 314

Artículo original

La ecología dinámica del hábito alimentario de alevines de bocachico (*Prochilodus magdalenae*) en condiciones controladas

Dynamic ecology of bocachico (*Prochilodus magdalenae*) fingerlings' feeding habits under controlled conditions 325

Artículo original

Murciélagos devoradores de insectos de El Tuparro: nuevas revelaciones sobre su distribución

Insect-eating bats from El Tuparro (Vichada, Colombia): New revelations about their distribution 341

Artículo original

***Cordia nicandroides*, una llamativa nueva especie de Cordiaceae del norte de Colombia**

Cordia nicandroides, a striking new species of Cordiaceae from northern Colombia 354

Artículo original

Los peces desérticos del bajo río Pisco, costa del Pacífico, Ica, Perú

Desert fishes of the Lower Pisco River, Pacific coast, Ica – Perú 368

Artículo original

Ephemeroptera (Insecta) en un gradiente altitudinal de la región andino-amazónica colombiana: validación de una regla de Rapoport

Ephemeroptera (Insecta) in an altitudinal gradient in the Colombian Andean-Amazonian region, Caquetá: validating a Rapoport's rule 383

Artículo original

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

Approach to the biology of *Procambarus clarkii* in the Tibitoc plant dock (Zipaquirá, Colombia) 491

Artículo original

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

Impact of illegal mammal trade in Colombia with a focus on biodiversity analyses 508

Artículo original

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

Metabolic modulation under increasing temperatures: an ontogenetic approach in the high mountain tropical frog *Dendropsophus molitor* (Hylidae) 523

Artículo original

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

A new species of *Ageratina* (subg. *Andinia*, Eupatorieae, Compositae), and taxonomic novelties in *Ageratina gynoxoides* (Wedd.) R.M.King & H.Rob 537

Artículo original

- Morfología vegetativa de *Phytelephas macrocarpa* en el noroeste de la Amazonía peruana**
Vegetative morphology of *Phytelephas macrocarpa* in the northwest of the Peruvian Amazon 551

Artículo original

- Un megaherbívoro invasor al descubierto: ecología de la población de hipopótamos (*Hippopotamus amphibius*) en Colombia**
Uncovering an invasive mega-herbivore: the ecology of the hippos population
(*Hippopotamus amphibius*) in Colombia 564

Original article

- Three new species of *Nanomis* Lugo-Ortiz and McCafferty, 1999 (Ephemeroptera: Baetidae) from Colombia**
Tres nuevas especies de *Nanomis* Lugo-Ortiz and McCafferty, 1999
(Ephemeroptera: Baetidae) de Colombia 582

Artículo original

- Primer reporte de anfibios y reptiles en el Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa (Lima-Perú)**
First report of amphibians and reptiles in The Pantanos de Villa Wildlife Refuge (Lima-Peru) 595

Artículo original

- Ampliación del ámbito geográfico de isópodos terrestres (Oniscidea) para el Caribe colombiano y primer registro de *Nagurus nanus* (Trachelipodidae) para Colombia**
Geographic range extension of terrestrial isopods (Oniscidea) for the Colombian Caribbean
and first record of *Nagurus nanus* (Trachelipodidae) for Colombia 606

Artículo original

- Determinación de los parámetros orbitales subyacentes en las efemérides solares de Abraham Zacuto**
Determination of the underlying orbital parameters in Abraham Zacuto's solar ephemerides 784

Artículo original

- Notas sobre la ecología poblacional de *Pholidobolus montium* (Sauria: Gymnophthalmidae) en una localidad de Mulaló, Ecuador**
Notes on the population ecology of *Pholidobolus montium* (Sauria: Gymnophthalmidae)
in a locality of Mulaló, Ecuador 797

Artículo original

- La vegetación de los páramos de Chile y del nevado del Quindío, Colombia**
The vegetation of the páramos of Chile and Nevado del Quindío (Colombia) 807

Original article

- Diversity and phorophyte preferences of lichens in the Cerro Machín volcano cloud forest (Tolima, Colombia)**
Diversidad y preferencias de forófito de los líquenes en el bosque de niebla del
volcán Cerro Machín, Tolima, Colombia 831

Artículo original

- Condición de la población de *Ageneiosus pardalis* (Siluriformes: Auchenipteridae) en el río Tuira, Panamá**
Condition of the *Ageneiosus pardalis* (Siluriformes: Auchenipteridae)
population in the Tuira River, Panama 852

**Ciencias
Naturales**
Natural Sciences

**Sección
especial: los
hipopótamos
invasores en
Colombia**

Special section: Invasive
hippos in Colombia

Artículo original

Desarrollo de un modelo dinámico mecanicista para predecir el crecimiento de cuyes (*Cavia porcellus*) machos del genotipo Perú

Development of a mechanistic dynamic model to predict the growth of male Perú genotype guinea pigs (*Cavia porcellus*) 859

Artículo original

Escenarios y alternativas de restauración ecológica en paisajes andinos degradados: el caso de la cuenca alta del río Bogotá (Suesca, Cundinamarca)

Scenarios and alternatives for ecological restoration in degraded Andean landscapes: the case of the upper basin of the Bogotá River (Suesca, Cundinamarca) 871

Artículo original

Análisis multitemporal de la frecuencia de observación de *Phimosus infuscatus* (Threskiornithidae) en Colombia

Multi-temporal analysis in observation frequency of *Phimosus infuscatus* (Threskiornithidae) in Colombia 886

Artículo original

Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XII. Nuevas especies de *Matisia* de Colombia y Panamá

Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XII. New species of *Matisia* from Colombia and Panamá 897

Original article

A Late Holocene Lecythidaceae wood record from Valle del Cauca, Colombia

Registro de madera de Lecythidaceae del Holoceno tardío en el Valle del Cauca, Colombia 922

Presentación

Sección especial: los hipopótamos invasores en Colombia

Special section: Invasive hippos in Colombia 396

Opinión

Breve recuento histórico y una reflexión sobre los hipopótamos del Magdalena Medio colombiano

Brief historical account and a reflection on the hippos in the Colombian Magdalena Medio region 397

Opinión

Reflexiones sobre el manejo de la invasión de hipopótamos en Colombia: deber, virtud y consecuencias

Reflections on the management of the hippos invasion in Colombia: Duty, virtue, and consequences 401

Opinión

Los hipopótamos introducidos en Colombia: una oportunidad para los estudios biológicos y la educación ambiental

Introduced hippos in Colombia: a chance for biological studies and environmental education 404

<p>Sección especial: los hipopótamos invasores en Colombia Special section: Invasive hippos in Colombia</p>	<p>Opinión</p> <p>Acciones de la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare para atender la problemática de los hipopótamos invasores en Colombia Actions undertaken by the Autonomous Negro and Nare Rivers Basin Regional Corporation (Cornare) to address the problem of invasive hippos in Colombia 407</p>
	<p>Opinion</p> <p>In the interest of hippos: Reflecting on the interests of the Colombian hippo population and their management Por el interés de los hipopótamos: reflexión sobre los intereses de la población colombiana de hipopótamos y su manejo 413</p>
<p>Ciencias Químicas Chemical Sciences</p>	<p>Original article</p> <p>Arsenic geochemical species modeling, prediction, and bioavailability in groundwaters of the Oban Massif, southeastern Nigeria Modelación, predicción y biodisponibilidad de especies geoquímicas de arsénico en aguas subterráneas del macizo de Oban, sureste de Nigeria 131</p>
	<p>Artículo original</p> <p>Actividad larvica de extractos y fracciones proteicas de <i>Annona muricata</i> L. en <i>Culex quinquefasciatus</i> (Diptera: Culicidae) Larvicidal activity of extracts and protein fractions of <i>Annona muricata</i> L. on <i>Culex quinquefasciatus</i> (Diptera: Culicidae) 623</p>
<p>Ciencias de la Tierra Earth Sciences</p>	<p>Artículo original</p> <p>Pronóstico de la precipitación en los Andes tropicales: lecciones de las simulaciones de convección permitida Forecasting precipitation over the tropical Andes: Lessons from convection-permitting simulations 145</p>
	<p>Artículo original</p> <p>Análisis del índice de claridad atmosférica diaria en la ciudad de Puno, 2014-2021 Analysis of the daily atmospheric clarity index in the city of Puno, 2014-2021 169</p>
	<p>Artículo original</p> <p>Prehistoria del Observatorio Astronómico Nacional. Registros meteorológicos y astronómicos de José Celestino Mutis y Francisco José de Caldas entre 1772 y 1802 Prehistory of the National Astronomical Observatory. Meteorological and astronomical records of José Celestino Mutis and Francisco José de Caldas between 1772 and 1802 178</p>
<p>Artículo original</p> <p>Astronomía en Colombia: una perspectiva bibliométrica Astronomy in Colombia: a bibliometric perspective 638</p>	
<p>Original article</p> <p>Quantifying Colombian blue carbon sinks from coastal mangroves Cuantificación de sumideros de carbono azul en Colombia a partir de manglares costeros 658</p>	

Matemáticas
Mathematics

Artículo de revisión invitado

Algunos elementos históricos específicos sobre la evolución de la Educación matemática como disciplina de investigación

Some specific historical elements on the evolution of ‘Mathematics Education’ as a research discipline 195

Artículo original

Reconstrucción de campos multivectoriales a partir del análisis de Clifford

Reconstruction of multivectorial fields in Clifford analysis 671

Artículo original

Una nota acerca del método de la función inversa de codificación de redes

A note on the inverse function method for network coding 936

Ensayo/ Essay

Un espacio propio compartido

A Shared Space of One's Own 208

Repensando la gestión de incendios forestales en Suramérica: un enfoque integrado en la era del cambio climático

Rethinking forest fire management in South America: an integrated approach in the era of climate change 210

El impacto de las mujeres colombianas en la Paleontología

The impact of Colombian women in Paleontology 216

Nobel 2024 en Fisiología o Medicina para los microARN

Nobel 2024 in Physiology or Medicine for microRNAs 952

Premio Nobel de Química 2024

Nobel Prize in Chemistry 2024 955

El camino hacia una memoria asociativa del conocimiento humano

The road to an associative memory of human knowledge 957

El Nobel de Economía concedido a Daron Acemoglu y Simon Johnson, del Instituto Tecnológico de Massachussets, y James A. Robinson, de la Universidad de Chicago

The Nobel Prize in Economics was awarded to Daron Acemoglu and Simon Johnson of the Massachusetts Institute of Technology and James A. Robinson of the University of Chicago 961

The first terror bird of Colombia: a giant rewriting the paleoecology and palaeobiogeography of La Venta Miocene

La primera ave del terror de Colombia: se reescribe la paleoecología y paleobiogeografía del Mioceno de La Venta 963

Opinión/ Opinion

Tracing the origin and evolution of the orchid family through genes and trees

El origen y la evolución de la familia de las orquídeas a través de genes y árboles 424

Las rotaciones en la escala nanométrica: el efecto Moiré en los materiales 2D	
Rotations at the nanoscale: the Moiré effect in 2D materials	431
Fuego y agua: cambio global, resiliencia de los bosques y riesgo del punto de no retorno para la Amazonía	
Fire and water: global change, forest resilience, and the risk of the point of no return for the Amazon	438
Un helecho diminuto desafía los límites de la expansión genómica en eucariotas	
A tiny fern defies the limits of genome expansion in eukaryotes	445
La amenaza silenciosa de la deforestación química en los países amazónicos: un nuevo desafío para la conservación y la legislación ambiental	
The silent threat of chemical deforestation in Amazonian countries: a new challenge for conservation and environmental legislation	967
Reflexiones sobre por qué no trascendemos en ciencia y tecnología	
Reflections on why we do not transcend in science and technology	970
Microbial Solutions for Climate Change	
Soluciones microbianas para el cambio climático	977
Comentario bibliográfico/Bibliographic commentary	
Prólogo Inmunología de Rojas, 19ª. ed.	
Prologue Rojas Immunology, 19th Edition	226
A monograph of the genus <i>Geranium</i> L. (Geraniaceae).	
Una monografía del género <i>Geranium</i> L. (Geraniaceae)	449
La tesis que me parió. Manual para abordar, elaborar y terminar un trabajo académico	
The thesis that bore me. Manual to approach, elaborate and conclude an academic work	451
Club de revistas/Journal Club	
La Sierra Nevada de Santa Marta, una topografía dinámica	
The Sierra Nevada de Santa Marta, a dynamic topography	205
Enigmática planta fósil con arquitectura tridimensional de crecimiento arborescente del Carbonífero temprano de New Brunswick, Canadá	
Enigmatic fossil plants with three-dimensional, arborescent growth architecture from the earliest Carboniferous of New Brunswick, Canada	417
Aprovechando las debilidades de un hongo patógeno	
Exploiting the weaknesses of a pathogenic fungus	687
De ardillas y hombres: lepra en la Edad Media	
Of squirrels and men: Leprosy in the Middle Ages	691
Explorando la materia oscura microbiana	
Exploring microbial dark matter	982

La persistencia de la memoria	
The persistence of memory	985
Vida de la Academia	
Enlightened by Microbial Rhodopsins	
Iluminados por las rodopsinas bacterianas	222
Palabras de Clemente Forero Pineda en el homenaje de ACCE-ACCEFYN a Enrique Forero González - Agosto 12 de 2024	
Clemente Forero Pineda at ACCE-ACCEFYN's tribute to Enrique Forero Gonzalez - August 12, 2024	695
Obituario/Obituary	
Jaime Ignacio Lesmes Camacho	229
Gabriel Toro González	231
Fabio Antonio Cediel Melo	700

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.

