



ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

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

ACADEMIA COLOMBIANA
DE CIENCIAS EXACTAS,
FÍSICAS Y NATURALES

Vol. 45 • Número 175 • Págs. 353-626 • Abril - Junio de 2021 • Bogotá - Colombia





ACADEMIA COLOMBIANA
DE CIENCIAS EXACTAS,
FÍSICAS Y NATURALES

ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

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

Vol. 45 • Número 175 • Págs. 353-626 • Abril - Junio de 2021 • Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editora

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

Asistente editorial Carolina Acosta

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

Editores asociados

Ciencias Biomédicas

-  Luis Fernando García, M.D., M. Sc.
Profesor emérito, Universidad de Antioquia,
Medellín, Colombia
-  Gustavo Adolfo Vallejo, Ph. D.
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia
-  Juanita Ángel, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
-  Manuel Franco, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
-  Alberto Gómez, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
-  John Mario González, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
-  Gloria Patricia Cardona Gómez, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
-  Ángela Restrepo Moreno, Ph. D.
Corporación para Investigaciones Biológicas,
Medellín, Colombia
-  Helena Groot de Restrepo, M.Sc.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Ciencias del Comportamiento

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

Ciencias Físicas

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

- 15 Ángela Stella Camacho Beltrán, Dr. rer. nat.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- 15 Edgar González, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- 15 Guillermo González, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia
- 15 Carlos Duque, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Ciencias Naturales

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

Ciencias Químicas

- 15 Sonia Moreno Guaqueta, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Myriam Sánchez de Gómez, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Fernando Martínez, Docteur en Chimie
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia
- 15 Luis Fernando Echeverry, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- 15 Carmenza Duque Beltrán, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Ligia Sierra García, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- 15 Luz Marina Jaramillo Gómez, Ph. D.
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Ciencias de la tierra

- 15 Carlos Alberto Vargas, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Carlos Alberto Jaramillo Muñoz, Ph. D.
Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá
- 15 José Daniel Pabón, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Alexander Correa, Ph. D.
Instituto de Geología, Universidad Nacional
Autónoma de México, Mexico
- 15 Ligia Estela Urrego, Ph. D.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- 15 Camilo Montes, Ph. D.
Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia
- 15 Germán Bayona, Ph. D.
Corporación Geológica Ares, Bogotá, Colombia
- 15 Hernando Dueñas Jiménez, Ph. D.
BIOSS SAS, Antioquia, Colombia

Matemáticas

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

Comité científico internacional

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

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Actualidad Iberoamericana
Agris
Dialnet
EBSCO
Historia Mathematica

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

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

Publindex, Colciencias (convocatoria 768 de 2018), categoría B

Periodicidad: trimestral
Fecha de inicio: 1936

Esta publicación se ha financiado mediante la transferencia de recursos del Gobierno Nacional a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

La Academia no es responsable de las opiniones aquí expresadas.

Reservados todos los derechos. El contenido de la presente publicación no puede ser reproducido, 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.

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Cra. 28 A no. 39A - 63 Bogotá D.C., Colombia, CP 111311 • **PBX:** +57(1)555-0470
Sitio web: www.raccefyn.co • **Correo electrónico:** revista@accefyn.org.co





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. 45 • Número 175 • Págs. 353-626 • Abril - Junio de 2021 • Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Editorial

COVID-19 y ética: visión de un psicólogo

COVID-19 and ethics: a psychologist's vision

Rubén Ardila, Ph.D. 361

Las mujeres en la pandemia y la ciencia

Estamos en la misma tormenta, pero no en el mismo barco

Women in the pandemic and science

We are in the same storm, but not in the same boat

Lorena Fernández Álvarez 363

Original article

Immunological detection in indoor environments of house dust mite allergens using avian antibodies - IgY: An innovative tool

Detección inmunológica de alérgenos de ácaros del polvo doméstico en ambientes interiores utilizando anticuerpos aviares - IgY: una herramienta innovadora

Dary Mendoza, Eduardo Egea, Gloria Garavito, Stephanie Saavedra, Ana Sofía Moreno, Angela Espejo, Luis A. Barrera 366

Artículo original

La inconmensurabilidad kuhniana y las generalizaciones simbólicas: un análisis a partir de la comparación de dos paradigmas teóricos de la física

Kuhnian incommensurability and symbolic generalizations:

A comparative analysis of the two theoretical paradigms of physics

Lina Marcela Cadavid-Ramírez, Mateo Arias Vélez 377

Ensayo

Francisco José de Caldas: ¿avatar de Humboldt? Reflexiones en torno a cinco cartas anónimas publicadas en el *Diario Político de Santafé de Bogotá* en 1810

Francisco José de Caldas: Humboldt's avatar? Reflections on five anonymous letters published in the *Diario Político de Santafé de Bogotá* in 1810

Alberto Gómez-Gutiérrez, José Gregorio Portilla 387

Ciencias Biomédicas Biomedical Sciences

Ciencias del Comportamiento Behavioral Sciences

Ensayo

La verdad es hija del tiempo

Truth is the daughter of time

Horacio Torres-Sánchez 405

Artículo original

Una nueva especie y nuevos registros de líquenes en Colombia y Suramérica en el bosque seco tropical de la cuenca media del río Cauca

A new species and new records of lichens for South America and Colombia from the tropical dry forest in the middle basin of the Cauca River

Edier Alberto Soto-Medina, Alejandro Castaño-Naranjo, Jonathan Granobles, André Aptroot 415

Artículo original

Rotíferos, copépodos y branquiópodos presentes en un humedal del departamento del Tolima, Colombia

Rotifers, copepods, and branchiopods present in a wetland of the Department of Tolima, Colombia

Helena Carranza-Castillo, Jonathan Gerardo Gordillo-Guerra, Gladys Reinoso-Flórez..... 421

Artículo original

Caracterización físicoquímica e hidrobiológica de tres ecosistemas cársticos de la cuenca del río Magdalena (Antioquia, Colombia) durante el ciclo hidrológico 2016-2017

Physical, chemical, and hydrobiological characterization of three karstic ecosystems of the Magdalena River Basin (Antioquia, Colombia) in the 2016 – 2017 hydrological cycle

Diana María Jiménez-González, Kathiana Murillo-García, María Isabel Ríos-Pulgarín 432

Original article

Early silvicultural performance of eucalypt species grown in environmental conditions of the tropical dry forest of Colombia

Desempeño silvicultural temprano de especies de eucalipto en las condiciones ambientales del bosque seco tropical de Colombia

Camila Andrea Báez-Aparicio, Ana Milena López-Aguirre, Alonso Barrios-Trilleras 449

Original article

On the distribution of three exotic geckos of genus *Hemidactylus* Gray, 1825 (Squamata, Gekkonidae), and an unusual record of the native lizard *Gymnophthalmus speciosus* (Hallowell, 1861) outside its elevational range in Colombia

Sobre la distribución de tres geckos exóticos del género *Hemidactylus* Gray, 1825 (Squamata, Gekkonidae) y un registro inusual del lagarto nativo *Gymnophthalmus speciosus* (Hallowell, 1861) fuera de su intervalo altitudinal en Colombia

Jose J. Henao-Osorio, Ana M. Pereira-Ramírez, Alexandra Cardona-Giraldo, Héctor Fabio Arias-Monsalve, Julián A. Rojas-Morales, José Rancés Caicedo-Portilla, Héctor E. Ramírez-Chaves 462

Artículo original

Mamíferos (Mammalia) de la Amazonía colombiana

Mammals (Mammalia) of the Colombian Amazon

Darwin M. Morales-Martínez 474

Artículo original

Dos nuevas especies de *Macropsychanthus* (Leguminosae, Papilionoideae) de Colombia

Two new species of *Macropsychanthus* (Leguminosae, Papilionoideae) from Colombia

Andrés Fonseca-Cortés 489

Artículo original

Nuevos registros de Pucciniaceae (Pucciniales, Fungi) para Colombia

New Records of Pucciniaceae (Pucciniales, Fungi) for Colombia

Carolina Zea-Fernández, María Camila Gutiérrez-Castaño, Mauricio Salazar-Yepes 500

Artículo original

Presencia de la especie invasora *Zaprionus indianus* Gupta, 1970 (Diptera: Drosophilidae) en Medellín, Colombia

Presence of the invasive species *Zaprionus indianus* Gupta, 1970 (Diptera: Drosophilidae) in Medellín, Colombia

Andrea Bustca 508

Original article

Notes on the genus *Eufriesea* in Colombia: Description of the female of *Eufriesea dressleri* (Kimsey, 1977) and extension of the distribution range of four species of the genus

Notas sobre el género *Eufriesea* en Colombia: descripción de la hembra de *Eufriesea dressleri* (Kimsey, 1977) y extensión del rango de distribución de cuatro especies del género

Carlos Andrés Londoño-Carvajal, Sandra Inés Uribe-Soto, Allan Henry Smith-Pardo 516

Artículo original

Tipos de leguminosas colombianas I. (Leguminosae: subfamilia Cercidoideae), con notas sobre el género *Schnella* en Colombia

Types of Colombian legumes I. (Leguminosae: Subfamily Cercidoideae) with notes on the genus *Schnella* in Colombia

Cesar Castellanos, Frank Vargas, Enrique Forero, William Guerrero-Salazar 527

Artículo original

Primer registro de *Campylocia araca* Gonçalves & Salles (Ephemeroptera: Euthyplociidae) en Colombia

First record of *Campylocia araca* Gonçalves & Salles (Ephemeroptera: Euthyplociidae) for Colombia

Laura Jimena Marín-Eslava, María del Carmen Zúñiga, Lucimar Gomes-Dias 541

Artículo original

Primer registro del camarón hada *Thamnocephalus venezuelensis* Belk & Pereira, 1982 (Anostraca, Thamnocephalidae) en Colombia con observaciones morfológicas adicionales

First record of the fairy shrimp *Thamnocephalus venezuelensis* Belk & Pereira, 1982 (Anostraca, Thamnocephalidae) in Colombia with additional morphological observations

Jorge D. Oliveros-Villanueva, Daniel J. Serna-Macias, Cesar E. Tamaris-Turizo, Pedro J. Eslava-Ejaiek 546

Artículo de revisión

Las especies paisaje como estrategia de conservación de la biodiversidad: evaluación cuantitativa de su efectividad

Landscape species approach for biodiversity conservation: a quantitative assessment of effectiveness

German Forero-Medina, Leonor Valenzuela, Carlos A. Saavedra-Rodríguez 555

Original article

Synthesis of nanostructured (Ti-Zr-Si)N coatings deposited on Ti6Al4V alloy

Síntesis de recubrimientos nanoestructurados de (Ti-Zr-Si)N depositados sobre aleación de Ti6Al4V

Leydi Julieta-Cardenas Flechas, Claudia Patricia Mejía-Villagrán, Miryam Rincon-Joya, Jhon Jairo Olaya-Florez 570

Artículo de revisión

- Estudio químico del aroma y bioactividad de la fruta del pepino dulce (*Solanum muricatum*)**
Flavor chemistry and bioactivity studies on sweet cucumber (*Solanum muricatum*) pulp fruit
Karen Nataly Díaz, Carmen Tatiana Cuadrado-Silva, Coralia Osorio 582

Artículo original

- Parámetros focales del terremoto del 28 de abril de 1894 en los Andes venezolanos usando datos macrosísmicos**
Focal parameters of the April 28, 1894 earthquake in the Venezuelan Andes using macrosismic data
Elkin de J. Salcedo-Hurtado, Franck A. Audemard, Nathalie García-Millán 591

In Memoriam

- Germán Domingo Amat García 607
Regino Enrique Martínez-Chavanz 609

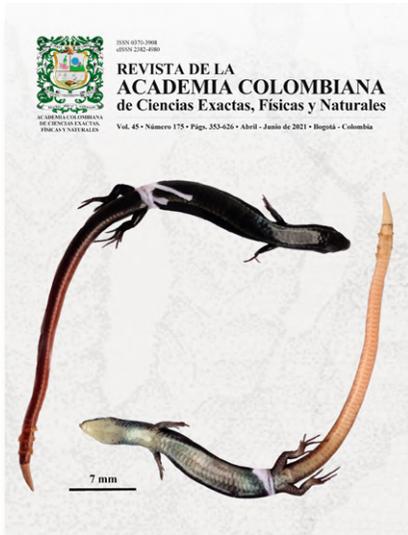
Comentario bibliográfico

- Bibliographic commentary 611

Enfoque y alcance

- Focus and Scope 613

Nuestra portada



En nuestra portada se observa la vista dorsal (arriba) y la vista ventral (abajo) de un ejemplar de la especie de lagartija *Gymnophthalmus speciosus* (familia Gymnophthalmidae) encontrado en el ecosistema de páramo en el Parque Nacional Natural de los Nevados en la Cordillera Central Colombiana y registrado en el trabajo de Henao-Osorio et al: **“Sobre la distribución de tres geckos exóticos del género *Hemidactylus* Gray, 1825 (Squamata, Gekkonidae) y un registro inusual del lagarto nativo *Gymnophthalmus speciosus* (Hallowell, 1861) fuera de su intervalo altitudinal en Colombia”**. Este es un registro novedoso e importante por cuanto, aunque esta especie es característica de las tierras bajas de Colombia y toda América tropical, este ejemplar se encontró cerca de 3000 metros por encima de su distribución altitudinal conocida. Asimismo, en el artículo se actualiza la distribución de tres especies de geckos invasores asiáticos en el territorio colombiano. Resalta el hecho de que este hallazgo en la distribución del lagarto gymnoftálmido y de la ampliación de la distribución de los geckos invasores puedan ser mediadas por transporte antropogénico accidental de la biota, del cual hay muy poca investigación para estas especies, así como sobre sus efectos en las comunidades y ecosistemas receptores.

El estudio no solo presenta los nuevos registros, sino que resume la distribución de las especies de interés en el país con base en todos los registros reportados en la literatura. Es también muy valioso que los autores definen en su trabajo algunos caracteres morfológicos adicionales para la distinción taxonómica entre las especies exóticas y, además, aportan datos temporales de los hallazgos de los especímenes registrados. De esta manera, este se convierte en un documento muy útil para las investigaciones futuras sobre estos grupos animales, sobre el flujo de la colonización, y sobre su impacto ecológico como especies invasoras.

Martha Patricia Ramírez Pinilla, Ph. D.

Miembro de número de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas,
Físicas y Naturales
Editora asociada

Editorial

COVID-19 y ética: visión de un psicólogo

La pandemia de COVID-19 no ha sido la primera epidemia que haya asolado a la humanidad a lo largo de su historia. Probablemente tampoco será la última. Por el contrario, se han registrado muchas que han afectado a millones de personas y dejado innumerables muertos. Entre las más mortales está la llamada “gripa española” de 1918 a 1920, que afectó a millones de personas y causó miles de muertes en Europa y América principalmente, y otras más recientes, como las causadas por el ébola (1976), el H1N1 (2009-2010), el Mers (2012), el Zika (2015-2016), y varias más cuyos efectos se han podido controlar y han sido menos desastrosos.

Lo más grave es que la pandemia causada por el virus SARS-CoV-2 (COVID-19), como lo mencionaba atrás, probablemente no será la última que padezca la humanidad. Como es sabido, los virus conviven con nuestra especie, lo han hecho desde siempre, en muchos casos con consecuencias positivas, en otros, con efectos negativos. Asimismo, en diversas ocasiones se ha documentado la transmisión a partir de una especie animal diferente a la humana. Las transformaciones de un virus pueden tomar mucho tiempo, durante el cual convive con nuestra especie, o ser rápidas y fulminantes con resultados destructivos para el hombre. Al parecer en el caso del SARS-CoV-2, el virus detectado a finales del 2019, uno de los factores desencadenantes pudo ser la destrucción del hábitat de una especie (posiblemente un tipo de murciélago) a causa de la intervención humana.

La sociedad ha desarrollado una gran preocupación por las implicaciones éticas de esta pandemia. Hemos presenciado alrededor del mundo verdaderas catástrofes a nivel sanitario, económico, social y cognitivo, y se ha tratado de entender la situación desde una perspectiva basada en la ética humanista, en el respeto por los derechos humanos, por el bienestar de las personas y por la naturaleza.

En muchos países se han creado consejos nacionales de bioética para enfrentar los problemas asociados con la COVID-19, y la UNESCO, por su parte, emitió el 6 de abril de 2020 la “Declaración sobre el COVID-19: consideraciones éticas desde una perspectiva global”, en la cual se destacan aspectos fundamentales como la necesidad de, 1) brindar información precisa, clara, completa y transparente a los periodistas, los científicos y el público en general sobre la COVID-19, sus orígenes, desarrollo, perspectivas de curación, vacunas, y las soluciones posibles a las crisis de salud, económicas, sociales y otras; 2) dar a conocer a nivel internacional los resultados de las investigaciones científicas que se llevan a cabo a nivel local, y 3) formar comités de investigación responsables de centralizar la información científica y compartirla a nivel mundial.

En el caso específico de las empresas y grupos dedicados a la investigación y la producción de conocimientos y de tecnologías de prevención, promoción y curación, como las universidades, los institutos de salud y las compañías farmacéuticas, se han enfatizado cuatro pilares: el respeto, la honestidad, la rectitud y el cuidado. Estos serían los fundamentos de una nueva ética, una ética humanista y de cuidado que nos lleve a considerar, como se ha afirmado, que nos salvamos todos o no se salva nadie.

Hemos entendido que el ser humano no está aislado, y que necesitamos unos de otros, lo que se hace evidente cuando se reflexiona acerca de problemas tales como las desigualdades en el acceso a la atención de salud, a las vacunas y a la educación sanitaria, desigualdades que se han hecho evidentes en el marco del contagio de la COVID-19 en el número de fallecimientos, la distribución de la información y de las vacunas, y en las actitudes hacia la enfermedad y la manera de enfrentarla. Las sociedades son muy desiguales y esta pandemia puso de manifiesto la falta de equidad y los déficits basados en las clases sociales, los niveles educativos, el acceso a los recursos, y un largo etcétera.

La vida de la mayor parte de las personas tuvo que modificarse después del 2 de marzo del 2020 cuando la Organización Mundial de la Salud (OMS) sentenció que estábamos en una pandemia de proporciones planetarias. Las ciudades decretaron cuarentenas, el trabajo cambió notablemente, y la educación pasó a ser virtual (o mixta) en todos los niveles, desde el preescolar hasta el universitario. Las relaciones familiares sufrieron tropiezos causados por el confinamiento, el trabajo en casa, la necesidad de pasar todo el día y todos los días (24/7) en espacios reducidos. En algunos casos este confinamiento sirvió para unificar a las familias, mostrar que los padres son maestros, pero en otros casos el resultado fue el opuesto, aumentó la violencia familiar, la depresión, el estrés, y salieron a flote problemas psicológicos que estaban latentes y que en ese ambiente se hicieron manifiestos.

Todo ello se vio acentuado por el aumento del desempleo, la desnutrición infantil y el malestar social. El consumo de bebidas alcohólicas y de sustancias psicotrópicas, así como otros problemas psicológicos, aumentaron en magnitud y se hicieron más visibles.

Por otra parte, además de los conflictos económicos, sociales y de salud, la incapacidad de muchas instituciones para hacer frente a la pandemia llevó a que la gente perdiera la fe en sus gobiernos y que la perspectiva del futuro se tornara incierta y desesperada.

En ese caldo de cultivo no es extraño que hayan surgido teorías conspirativas -que han existido desde siempre-, pero que se potencian al máximo en períodos de incertidumbre, de malestar, de conflictos cognitivos y de búsqueda de explicaciones a problemas que no hemos sido capaces de explicar y solucionar. Han abundado las noticias falsas (*fake news*): se ha especulado que la COVID-19 fue creada en un laboratorio de China para debilitar al mundo occidental, o, lo contrario, que se hizo en un laboratorio de Estados Unidos para acabar con China. La negación de la existencia misma de la enfermedad, los movimientos anti-vacuna, ahora más visibles que nunca antes, la creencia en “chips” que, absurdamente, se instalarían en el organismo con las vacunas, la creencia de que su producción está sujeta a una rebatiña económica, y muchas otras teorías tan absurdas como estas, son consideradas válidas y acogidas por cientos de miles de personas.

Una ética centrada en el ser humano, que permita realizar las potencialidades de los individuos y de las culturas, que se desprenda de la solidaridad y la reciprocidad, características que permitieron que nuestra especie evolucionara de forma adaptativa y produjera sociedades armónicas, es sin duda el camino para enfrentar el reto que hoy estamos viviendo.

Rubén Ardila, Ph.D.

Psicólogo

Universidad Nacional de Colombia

Editorial

Las mujeres en la pandemia y la ciencia

Estamos en la misma tormenta, pero no en el mismo barco

Esta pandemia que nos azota ha traído consigo numerosas enseñanzas y ha puesto de manifiesto nuestras luces y sombras como sociedad. Una de las sombras que más se ha acentuado es la brecha de género en la ciencia.

Un primer indicador es la reducción de la participación de mujeres en la producción científica. Según el análisis publicado en Vox EU, el porcentaje de mujeres que firmaron *papers* en los 4 primeros meses de 2020 fue similar al de 2019 (en torno a un 20%) Sin embargo, durante el confinamiento, la proporción bajó hasta el 12% (<https://voxeu.org/article/who-doing-new-research-time-covid-19-not-female-economists>). En la misma línea, *Nature Index* (clasificación centrada en la investigación publicada en una selección de revistas académicas de ciencias naturales del grupo *Nature*) nos dice que estamos en la misma tormenta, pero no en el mismo barco (<https://www.natureindex.com/news-blog/decline-women-scientist-research-publishing-production-coronavirus-pandemic>). Esto tendrá consecuencias a mediano y largo plazo en la progresión de las carreras profesionales de las investigadoras. Y es que el confinamiento ha tenido el efecto contrario al que cabría esperar de un teletrabajo planeado. Las diferencias en el tiempo dedicado por mujeres y hombres al cuidado y el trabajo doméstico se han agravado durante el encierro. Un cuestionario realizado por la Unidad Mujeres y Ciencia del Ministerio de Ciencia e Innovación de España a 1.563 investigadores e investigadoras sobre el impacto del confinamiento nos muestra que casi el 50% de las mujeres, frente al 20% de los hombres, se encargó en exclusiva de la limpieza del hogar, mientras que el 43,8% de las mujeres, frente al 18,3% de los hombres, asumió principalmente las tareas de cuidado de personas a su cargo. Una realidad que hasta ahora había quedado oculta en nuestros hogares (<https://www.agenciasinc.es/print/126430>).

El proyecto europeo SUPERA (*Supporting the Promotion of Equality in Research and Academia*) diseñó durante la pandemia una encuesta sobre condiciones laborales, uso del tiempo y rendimiento académico y en junio de 2020 se lanzó en la Universidad Complutense de Madrid (España). Tras recopilar casi 1.600 respuestas, muestra resultados preliminares muy significativos. Los roles de género en el trabajo académico no solo se confirmaron antes de la pandemia, sino que también se han agravado durante el confinamiento: las mujeres afirmaron dedicar más tiempo a la preparación de clases y a la atención de estudiantes, y los hombres a escribir y enviar a publicar trabajos / artículos (<https://www.superaproject.eu/working-conditions-time-usage-and-academic-performance-in-covid-19-times-preliminary-ucm-survey-results/>).

Esta, además, ha sido la pandemia de los médicos y las enfermeras. Así se nos ha presentado casi de manera constante en los medios de comunicación, a pesar de que ellas son mayoría tanto en medicina como en enfermería. Sin embargo, representan solo una pequeña parte de los altos cargos. En el sector farmacéutico el techo de cristal es evidente: según un estudio publicado por *Results Healthcare*, las mujeres apenas representan el 25% de los equipos de liderazgo y solo hay una directora entre las 10 principales empresas farmacéuticas, **Emma Walmsley** de GlaxoSmithKline (<https://resultshealthcare.com/insight/women-in-healthcare-leadership/>).

Las voces expertas que han sido protagonistas en los medios de comunicación tampoco han sido las de ellas. El *Global Institute for Women's Leadership* del *King's College* London ha analizado 146.867 artículos de prensa sobre la COVID-19 publicados entre el 1 de marzo y el 31 de julio de 2020 en medios de comunicación de Reino Unido, Australia y

Estados Unidos. Por cada mención de una experta en áreas STEM, hay 19 menciones de un experto. Por cada mención de una economista, hay cinco de un economista (<https://www.kcl.ac.uk/giwl/assets/covid-media-analysis.pdf>).

Todo esto en un momento en el que las mujeres han sido esenciales en la resolución de esta pandemia. Empecemos echando la mirada atrás y recuperando la figura de **June Almeida**, la primera persona que vio un coronavirus en un microscopio en 1964 y fue pionera en usar un método que visualizaba mejor los virus. Falleció en 2007, a la edad de 77 años. Ahora, 13 años después de su muerte, finalmente está obteniendo el reconocimiento que se merece porque gracias a su trabajo, la comprensión del virus que actualmente se está propagando por todo el mundo, se ha acelerado (<https://www.esciupfnews.com/2021/04/21/june-almeida-coronavirus/>).

Otra persona relevante y hasta ahora invisible es **Katalin Karikó**, quien puso la base de las vacunas ARNm tras más de 40 años de investigación. El ARN mensajero, descubierto por primera vez en 1961 en Caltech, ha sido llamado el “software de la vida”. A diferencia de las vacunas “clásicas” que inoculan el virus inactivo o proteínas virales, esta técnica envía un conjunto de instrucciones a las células que les enseñan a combatir enfermedades. Vemos ahora las implicaciones con la COVID-19 pero su aplicación en el futuro puede ser determinante en enfermedades como el cáncer, la malaria o la esclerosis múltiple. Fue Karikó, con la ayuda del inmunólogo de la Universidad de Pensilvania Drew Weissman, quien descubrió un método en 2005 para prevenir la respuesta inflamatoria en el cuerpo al ARNm sintético, lo que ha allanado el camino para las vacunas de BioNTech y Moderna. Sin embargo, como reconoció en una entrevista, a ella también le han hecho sentir alguna vez que no era suficientemente buena: *I felt many times that I am not good enough*. Fue humillada por la idea, se pasó la década de los 90 sin que nadie quisiera financiar sus investigaciones e incluso la Universidad de Pensilvania, donde trabajaba de adjunta, relegó la creación de su plaza de profesora y la echaron de su laboratorio (<https://thestoryexchange.org/kati-kariko-melissa-moore-kathrin-jansen-defied-all-odds-life-saving-vaccines/>).

Aquí no queda la historia de la invisibilidad y ninguneo al trabajo de muchas investigadoras. **Camilla Rothe**, médica alemana y especialista en medicina tropical incluida en la lista TIME de personas más influyentes de 2020, fue una de las primeras en documentar la transmisión asintomática del coronavirus, aunque inicialmente su descubrimiento fue recibido con negación y menosprecio por parte de sus colegas. Su descubrimiento ha salvado innumerables vidas, y si la hubieran escuchado antes, se podría haber evitado una mayor propagación. La lista de protagonistas es aún más larga: **Kizzmekia Corbett**, inmunóloga viral, ha liderado el equipo que ha desarrollado la vacuna de Moderna; **Sarah Gilbert**, vacunóloga, el de Oxford-AstraZeneca; **Özlem Türeci**, médica, inmunóloga y empresaria es cofundadora y directora médica de BioNTech.

Toca poner sus nombres y apellidos en los titulares y romper con aquello que decía Virginia Wolf de que “anónimo es nombre de mujer”.

Lorena Fernández Álvarez

Universidad de Deusto

lorena.fernandez@deusto.es

Información suplementaria

1. Almeida, J.D., Tyrrell D.A.J. (1967). The morphology of three previously uncharacterized human respiratory viruses that grow in organ culture. *J. gen. Virol.* **1**: 175-178. Vea la información suplementaria 1 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1495/3061>

2. Karikó, K., Buckstein, M, Ni., Weissman, D. (2005). Suppression of RNA recognition by Toll-like receptors: The impact of nucleoside modification and the evolutionary origin of RNA. *Immunity.* **23**: 165-176. Vea la información suplementaria 2 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1495/3062>

- 3. Corbett, K.S., Edwards, D.K., Leist, S.R., Olubukola, M., Abiona, O.M., Boyoglu-Barnum, S., Gillespie, R.A., Himansu, S., Schäfer, A., Ziwawo, C.T., DiPiazza, A.T., Dinnon, K.H., Elbashir, S.M., Shaw, C.A., Woods, A., Fritch, E.J., Martinez, D.R., Bock, K.W., Minai, M., Nagata, B.M., Hutchinson, G.B., Wu, K., Henry, C., Bahl, K., Garcia-Dominguez, D., Ma, L., Renzi, I., Kong, W-P., Schmidt, S.D., Wang, L., Zhang, Y., Phung, E., Chang, L.A., Loomi, R.J., Altaras, N.E., Narayanan, E., Metkar, M., Presnyak, V., Liu, C., Louder, M.K., Wei Shi, W., Leung, K., Yang, E.S., West, A., Kendra, L., Gully, K.L., Steven, L.J., Nianshuang Wang, N., Wrapp, D., Doria-Rose, N.A., Stewart-Jones, G., Bennett, H., Alvarado, G.S., Nason, M.C., Ruckwardt, T.J., McLellan, J.S., Denison, M.R., Chappell, J.D., Moore, I.N., Morabito, K.M., Mascola, J.R., Baric, R.S., Carfi, A., Graham, B.S. (2020) SARS-CoV-2 mRNA vaccine design enabled by prototype pathogen preparedness. *Nature* **586**: 567-571 (2020). (<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2622-0>). Vea la información suplementaria 3 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1495/3063>**
- 4. van Doremalen, N., Lambe, T., Spencer, A., Belij-Rammerstorfer, S., Purushotham, J.N., Port, J.R., Avanzato V.A., Bushmaker, T., Flaxman, A., Ulaszewska, M., Feldmann, F., Allen, E.R., Sharpe, H., Schulz, J., Holbrook, M., Okumura, A., Meade-White, K., Pérez-Pérez, L., Edwards, N.J., Wright, D., Bissett, C., Gilbride, C., Williamson, B.N., Rosenke, R., Long, D., Ishwarbhai, A., Kailath, R., Rose, L., Morris, S., Powers, C., Lovaglio, J., Hanley, P.W., Scott, D., Saturday, G., de Wit, E., Gilbert, S.H., Munster, V.J. (2020). ChAdOx1 nCoV-19 vaccine prevents SARS-CoV-2 pneumonia in rhesus macaques. *Nature* **586**: 578-582 (2020). (<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2608-y>). Vea la información suplementaria 4 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1495/3064>**
- 5. Sahin, U., Muik, A., Derhovanessian, E., Vogler, I., Kranz, L.M., Vormehr, M., Baum, A., Pasca, K., Quandt, J., Maurus, D., Brachtendorf, S., Lörks, V., Sikorski, J., Hilker, R., Becker, D., Eller, A.K., Grützner, J., Boesler, C., Rosenbaum, C., Kühnle, M.C., Luxemburger, U., Kemmer-Brück, A., Langer, D., Bexon, M., Bolte, S., Karikó, K., Palanche, T., Fischer, B., Schultz, A., Shi, P.Y., Fontes-Garfia, C., Perez, J.L., Swanson, K.A., Loschko, J., Scully, I.L., Cutler, M., Kalina, W., Kyratsous, C.A., Cooper, D., Dormitzer, P.R., Jansen, K.U., Türeci, Ö. (2020). COVID-19 vaccine BNT162b1 elicits human antibody and TH1 T cell responses. *Nature* **586**: 594-599 (2020). (<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2814-7>). Vea la información suplementaria 5 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1495/3065>**
- 6. Rothe, C., Schunk, M., Sothmann, P., Bretzel, G., Froeschl, G., Wallrauch, C., Zimmer, T., Thiel, V., Janke, C., Guggemos, W., Seilmaier, M., Drosten, C., Vollmar, P., Zwirgmaier, K., Zange, S., Wölfel, R., Hoelscher, M. (2020). Transmission of 2019-nCoV Infection from an Asymptomatic Contact in Germany. *N. Engl J Med.* 2020 Mar 5; **382** (10): 970-971. doi: 10.1056/NEJMc2001468. Vea la información suplementaria 6 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1495/3066>**
- 7. CV de LFA la autora del editorial.** Vea la información suplementaria 7 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1495/3068>
- 8. Cátedra Saberes con sabor.** Vea la información suplementaria 8 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1495/3069>

Original article

Immunological detection in indoor environments of house dust mite allergens using avian antibodies - IgY: An innovative tool

Detección inmunológica de alérgenos de ácaros del polvo doméstico en ambientes interiores utilizando anticuerpos aviáres - IgY: una herramienta innovadora

✉ Dary Mendoza^{1,*}, ✉ Eduardo Egea², ✉ Gloria Garavito², ✉ Stephanie Saavedra¹,
✉ Ana Sofía Moreno¹, ✉ Angela Espejo³, ✉ Luis A. Barrera³

¹ Grupo de Investigación en Productos Naturales y Bioquímica de Macromoléculas, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad del Atlántico, Puerto Colombia, Atlántico, Colombia

² Grupo de Investigación en Inmunología y Biología Molecular, Departamento de Ciencias de la Salud, Universidad del Norte, Puerto Colombia, Atlántico, Colombia

³ Instituto de Errores Innatos del Metabolismo, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Colombia

Abstract

IgY technology has emerged as an alternative for antibody production with immunodiagnostic purposes. Recently, we produced avian antibodies (IgY) against group-1 dust mite allergens of *Dermatophagoides sp (Dsp)* and *Blomia tropicalis (Bt)*. These allergens are important sensitizing agents that contribute to the pathophysiology of allergy rhinitis and asthma in patients living in tropical areas. The purpose was to explore the utility of IgY for detecting dust mite allergens in indoor environments. We collected 100 samples of dust from mattresses of asthmatic individuals living in two cities on the Colombian Caribbean coast. We used an in-home indirect enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) to detect the mite allergens using two IgYs (IgY-PO2 and IgY-PO4). We determined the IgY detection limit using whole body extracts of *Dsp* and *Bt*; likewise, IgY specificity was probed against one crude extract of cockroach, as well as the precision and accuracy of measurements. Both antibodies recognized allergens in the mite extracts, even at the lowest tested concentration (0.05 µg/mL); none reacted with the cockroach extract demonstrating their specificity for mite allergens. On the other hand, IgY-PO4 showed the best precision (intra-assay: CV < 6.99%; inter-assay: CV ≤ 8.71%) and an accuracy: 80.62 – 100.39%. Allergen levels detected were consistent with the mite density present in the dust samples. We confirmed the usefulness of IgY-PO2 and IgY-PO4 for detecting dust mite pollution in indoor environments.

Keywords: Immunoassay; ELISA; IgY antibodies; House dust mites; Allergens.

Resumen

La tecnología de anticuerpos aviáres (IgY) ha surgido como una alternativa para la producción de anticuerpos con fines de inmunodiagnóstico. Recientemente produjimos IgY contra alérgenos de ácaros del polvo del grupo 1 de *Dermatophagoides sp (Dsp)* y *Blomia tropicalis (Bt)*. Estos alérgenos son importantes agentes de sensibilización que contribuyen a la fisiopatología de la rinitis alérgica y el asma en pacientes asentados en áreas tropicales. El propósito del presente estudio fue explorar la utilidad de los IgY para detectar alérgenos de ácaros en ambientes interiores. Se recolectaron 100 muestras de polvo de colchones de asmáticos residentes en dos ciudades de la costa Caribe colombiana. Se utilizó un ensayo inmunoabsorbente indirecto ligado a enzimas (ELISA) casero para detectar los alérgenos de ácaros usando dos IgY (IgY-PO2 e IgY-PO4). Se determinó el límite de detección de los IgY utilizando extractos de cuerpo entero de *Dsp* y *Bt*; asimismo, se indagó la especificidad de los IgY frente a un extracto crudo de cucaracha y

Citation: Mendoza D, Egea E, Garavito G, *et al.* Immunological detection in indoor environments of house dust mite allergens using avian antibodies - IgY: An innovative tool. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):366-376, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1304>

Editor: Luis Fernando García

***Corresponding autor:**

Dary Mendoza Meza;
dary_mendoza@yahoo.com;
darymendoza@mail.uniatlantico.edu.co

Received: September 19, 2020

Accepted: March 31, 2021

Published: June 17, 2021



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

se determinaron la precisión y la exactitud de las mediciones. Ambos anticuerpos reconocieron alérgenos en los extractos de ácaros, incluso en la concentración más baja probada (0,05 µg/mL), y ninguno reaccionó con el extracto de cucaracha, lo que demuestra su especificidad para los alérgenos de ácaros. Por otro lado, el IgY-PO4 tuvo los mejores resultados de precisión (intraensayo: CV<6,99%; interensayo: CV≤8,71%) y exactitud: 80,62 a 100,39%. Los niveles de alérgenos detectados fueron consistentes con la densidad de ácaros en las muestras. Este estudio destaca la aplicación de IgY-PO2 e IgY-PO4 para la detección de la contaminación por ácaros en ambientes interiores.

Palabras clave: Inmunoensayo; ELISA; Anticuerpos IgY; Ácaros del polvo doméstico; Alérgenos.

Introduction

Respiratory allergy frequency and etiological complexity are growing in Latin American countries. These allergies involve the interaction of genetic and environmental factors (Drake, *et al.*, 2008; Mukherjee & Zhang, 2011; Asher, *et al.*, 2020). Two transversal studies conducted in six Colombian cities have shown a clear increase in the cumulative prevalence of asthma symptoms over the last decade (Dennis, *et al.*, 2004; Dennis, *et al.*, 2012) reporting a total prevalence of 12.1% in the country and of 14.5% in the city of Barranquilla on the Caribbean coast (Dennis, *et al.*, 2012).

In tropical countries, asthma cases are strongly associated with exposure to indoor allergens whose main source is house dust mites such as *B. tropicalis* (*Bt*) and *Dermatophagoides sp* (*Dsp*) (Milián & Díaz, 2004; Andiappan, *et al.*, 2014). In fact, there is a dose-response relationship between exposure to those allergens and the risk of developing allergen sensitization (Marks, 1998; Huss, *et al.*, 2011). Epidemiological evidence shows that continual exposure to allergens is a risk factor for the development of asthma. Accordingly, the promotion of interventions to reduce allergen exposure, especially in indoor environments, has recently increased (Winn, *et al.*, 2016; Vojta, *et al.*, 2001; Paufler, *et al.*, 2001). In most cases, a reduction in allergen exposure has resulted in clinical benefits for asthma patients with a significant impact in terms of public health as well (Morgan, *et al.*, 2004; Halken, 2004).

Asthma poses a considerable social and economic burden on patients and their families (Kamble & Bharmal, 2009). A study based on the Medical Expenditure Panel Survey (MEPS) findings estimated asthma-related direct and indirect medical costs in the USA in 2007: Annual direct costs per person were estimated at US\$ 1,999.17, hospitalization costs at US\$ 703.39, and drug-prescription costs at US\$ 624.81 while average annual indirect costs per person amounted to another US\$ 628.84 (Rappaport & Bonthapally, 2012). In Colombia, studies on asthma-related direct and indirect costs have also shown the high economic burden associated with this disease (Londoño-Trujillo & Celis-Preciado, 2016; Rodríguez-Martínez, *et al.*, 2017).

The development of high-quality antibodies and detection reagents for immunoassays is of great importance for diagnosing allergic diseases such as asthma and allergic rhinitis as they can quickly identify specific allergen levels in home environments, a primordial step to control them adequately. The concept of “low allergen levels for life” is frequently used in Europe and many tools already exist in the market for allergen detection and monitoring (Portnoy, *et al.*, 2013). Unfortunately, the majority of these are not readily available for the asthmatic population of underdeveloped countries.

Blomia tropicalis (*Bt*) and *Dermatophagoides sp* (*Dsp*) are the most clinically important mite species in the tropic. Currently, commercially available antibodies for mite-allergen detection in indoor environments are mainly mouse and rabbit IgG class antibodies. Companies such as Indoor Biotechnologies (Charlottesville, Virginia) produce monoclonal and polyclonal IgG antibodies against the major allergens of *D. pteronyssinus* (Der p 1 and Der p 2), *D. farinae* (Der f 1 and Der f 2), and *B. tropicalis* (Blo t 5). Immunoassays based on IgG-antibodies (Multiplex Array for Indoor Allergens - MARIA® from Indoor Biotechnologies and Dust Mite Screen Check from Environmental

Diagnostics Laboratory, Clearwater, Florida) are also available for dust-samples analysis in the laboratory (**Portnoy, et al., 2013**). To the best of our knowledge, presently there are no commercially available IgY antibodies for the detection of house dust mite allergens.

Here, we show the utility of two polyclonal avian antibodies (IgY) for detecting *Dsp* and *Bt* allergens in house dust samples from two Colombian Caribbean cities. Our results evidenced that they may be used as immunoreagents for the primary detection of mite allergens. Future studies should explore the design and development of immunoassays for rapid and efficient detection of mite allergens based on IgY-PO2 and IgY-PO4 antibodies.

Materials and methods

Antibodies

Two polyclonal avian antibodies (IgY) from Hy Line Brown hen eggs were produced against non-glycosylated synthetic oligopeptides designed *in silico* based on sequences from dust mite group-1 allergens *Bt* (named PO2) and *Dsp* (named PO4) (Patent US9416163 B2) (**Barrera, et al., 2016**). We determined antibody titers by ELISA while in a previous study (**Egea, et al., 2018**), mite protein concentration and the ability of antibodies to recognize *Bt* and *Dsp* group-1 allergens had been determined by Western Blot.

Mite extracts

Whole body *Dsp* and *Bt* extracts were prepared from mite cultures done in the immunology and molecular biology laboratory at *Universidad del Norte* following the methodology previously described (**Mendoza, et al., 2011**) and then used to determine IgY-antibody detection limits and as a positive control in the ELISA assays. An allergenic extract from the cockroach *Periplaneta americana* (*Pa*) was used to evaluate IgY antibody specificity in the indirect ELISA (kindly donated by Dr. Enrique Fernández-Caldas, Scientific Director at Inmunotek, Spain). The total protein concentration in the *Dsp* extract was 1.42 mg/mL, in the *Bt* extract, 1.67 mg/mL, and in the *Pa* extract, 2.80 mg/mL. All extract concentrations were determined using the Quick Start™ Bradford Protein Assay kit from Bio-Rad.

House dust samples

Samples were obtained from asthmatic people's homes in the metropolitan area of Barranquilla and Santa Marta, two Colombian cities on the Caribbean coast with a high prevalence of asthma symptoms (**Dennis, et al., 2012; Mendoza, et al., 2008**). We took all the samples from the mattresses of the asthmatic individuals' wooden beds participating in the study. Housing characteristics met public health criteria and the patients' indoor conditions corresponded to those required in primary and secondary care.

We collected 100 samples between March and September 2016 (50 samples from Barranquilla and 50 from Santa Marta). For the sampling, we used a Eureka® Mite II vacuum hoover (The Eureka® Company, Bloomington, IL) placing a 19 x 90-mm nitro-cellulose extraction cartridge (Whatman International Ltd., Maidstone, UK) at the end of the hoover extension tube and sealing the joint with a rubber ring. We hoovered a 2-m² area in each mattress at 0.5 m²/min according to the US EPA 747-R-95-001.14 protocol (**Environmental Protection Agency - EPA, 1995**). Extraction cartridges containing dust samples were stored in labeled plastic bags, sealed, and finally stored at 4 °C until their processing. We sieved the samples using a 500-µm mesh and then analyzed them on the microscope to identify and quantify the mites as previously described (**Acuña, et al., 2015**). Briefly, 50 mg of each sample were treated for 2 hours with a PBS (1X, pH 7.2) solution (1:1, v/v) at 40°C. Afterwards, mites were visualized using a Nikon SMZ-1 (4X) microscope, isolated with a fine needle, and fixed on slides for their identification using taxonomic keys (**Colloff & Spieksma, 1992; Smiley & Gorham, 1991**). The number of *Bt* and *Dsp* (*D. pteronyssinus* and *D. farinae*) mites was determined by a standard method (**Arlan, et al., 1999**) and results were expressed as the number of mites per gram of dust (m.p.g).

Extraction of mite allergens from dust

To determine the optimal time for dust extraction, we used a randomized complete block experimental design with five treatments and three blocks. We analyzed two dust samples, one with a low density of mites (<300 m.p.g.) and the other with a high density of mites (>500 m.p.g.). We mixed 100 mg of dust in 1 mL of PBS 1X for each sample. The extraction was performed at room temperature on a Gemini twin Shaking Water Bath (Robbins Scientific®) at 60 rpm for 30, 15, 10, 5, and 2 min. Dust extracts were centrifuged for 10 min at 5,000 x g in a Beckman refrigerated centrifuge (GPR model). We collected the supernatants in Eppendorf vials and used them immediately to evaluate the mite allergen content by ELISA. The results were expressed in absorbance values at 450 nm. Once the extraction time was determined, the same procedure was set up using the 100 samples whose dust mite densities and compositions had been previously determined through microscopy analysis.

ELISA assay

We conducted an exploratory study to detect the usefulness of IgYPO2 and IgYPO4 in the detection of Bt and Dsp allergens in 100 house dust samples. Mite allergens were detected by an indirect ELISA test as previously described (Barrera, *et al.*, 2016; Egea, *et al.*, 2018). We coated polystyrene plates with 96 wells (Nunc Maxisorp®) with 100 µL of antigen (mite extracts or dust extracts) and incubated the plates in a wet chamber at room temperature for 18 hours. Unbound molecules were removed from the plate and each well was subsequently blocked with 200 µL of blocking solution (PBS 1X, 0.05 % v/v Tween-20, and 5 % w/v skimmed milk) for 2 hours. Each well was then washed three times with PBST (1X PBS, 0.05% v/v Tween-20) using an RT-2600C microplate dishwasher (Rayto®). Primary antibodies were then added for one hour (100 µL of IgY-PO2 or IgY-PO4 at 1 µg/well). We minimized non-specific binding using four PBST wash steps. We detected the IgY-allergen complex using 100 µl/well of secondary IgG anti-chicken antibody conjugated with horseradish peroxidase (Promega G1351). The secondary antibody was diluted 1/2,000 in antibody dilution buffer (1X PBS, 0.025% v/v Tween-20 and 2.5 % w/v skimmed milk). Subsequently, the plate was washed four times in PBST. The reaction was developed with 100 µL of the peroxidase substrate and 3,3',5,5'-tetramethylbenzidine (Sureblue Reserve™ TMB Microwell Peroxidase Substrate). After 15 min, the reaction was stopped with 1N HCl, and the yellow color read at a 450 nm wavelength in a Synergy HTX (BioTek® Instruments, Inc.) multimodal plate reader. We used mite extracts at 1 µg/mL (0.1 µg/well) as the positive control in the final dust samples analysis and a pool of dust samples obtained from new mattresses as the negative control. The cut-off point to differentiate between positive and negative samples was the arithmetic mean plus 3 standard deviations of negative controls. We diluted those samples with absorbance values ≥ 1.0 at 450 nm (A_{450}). All samples, including controls, were analyzed in triplicate.

Detection limit and specificity

We defined the detection limit as the smallest amount of allergen detected by each antibody above the noise of the ELISA test; in this regard, we included several reactions with PBS 1X (without extract) and pre-immune antibody (with extracts) in each plate to detect the noise (Supplement 1). Besides, we prepared two-fold serial dilutions of the mite extracts in PBS 1X (range of total protein from 0.05 - 20 µg/mL equivalent to 5 - 2000 ng/well) and then analyzed them. We also analyzed whole body *Pa* (cockroach) extracts to evaluate the specificity of the antibodies.

Calibration curve

We designed a standard curve in the ELISA linearity range for each antibody. For IgY-PO2, we used known concentrations of *Bt* whole body extract total protein while for IgY-PO4, we used the *Dsp* whole body extract and then we calculated allergens relative

concentrations in the dust samples through the standard curves, whereas allergen levels were calculated using equation 1 (**Eq. 1**), and expressed in μg of allergens per gram of dust ($\mu\text{g/g}$).

$$\text{Allergen levels } (\mu\text{g/g}) = \frac{C \times F \times V}{M} \quad \text{Eq. 1}$$

where C is the relative allergen concentration ($\mu\text{g/mL}$) calculated through the standard curve, F, the dilution factor of the dust extract in the ELISA test, V, the volume of dust extract (1 mL), and M, the amount of dust sample in the extract (0.1 g).

Precision and accuracy test

Precision was determined by measuring the allergen levels of the same sample during five days (intertest) in five replicates (intratest) applying the same experimental procedure under predetermined conditions. For this test, we selected three dust samples with different mite densities at random. We calculated the results, expressed as a coefficient of variation (CV), using the following equation (**Eq. 2**).

$$\% \text{ CV} = (\text{Standard deviation} / \text{arithmetic mean}) \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

The accuracy was evaluated through a recovery test in which three dust samples from new mattresses were spiked with a known concentration (1 $\mu\text{g/mL}$) of *Bt* and *Dsp* whole body extract for IgY-PO2 and IgY-PO4, respectively. We calculated the accuracy using the following equation (**Eq. 3**).

$$\text{Accuracy} = \frac{(X - Y)}{Z} = \frac{W}{Z} \times 100 \quad \text{Eq. 3}$$

where X is the allergen concentration ($\mu\text{g/mL}$) in spiked samples, Y, the allergen concentration ($\mu\text{g/mL}$) in unspiked samples, W, the difference between X and Y, and Z, the experimental concentration of mite extract added to the samples.

Data analysis

Results were expressed as averages, medians, standard deviations (SD), and minimum and maximum ranges. Differences between treatments were evaluated using a one-way variance analysis (ANOVA) with a significance level of 0.05. Multiple (pair-wise) comparisons were done by Tukey's honestly significant difference test (Tukey's HSD) and results were presented as 95% confidence intervals (95 % CI). All statistical tests and plots were performed with the free access Software "R" (<http://www.r-project.org>).

Ethical considerations

This study was conducted according to the guidelines expressed in 1993 Resolution N° 008430 issued by the Ministry of Health of Colombia and in Law 84 from 1989.

Results

Mite allergen extraction

Allergen extraction was not significantly influenced by the extraction time when considering samples with a mite density greater than 500 m.p.g. ($p > 0.05$). In contrast, when considering samples with a low mite density (< 300 m.p.g.), extraction times below 5 min significantly decreased allergen detection with IgY-PO2 (**Figure 1**). Therefore, the extraction time used for all the dust samples was 5 min.

Detection limit and specificity

Both IgY-PO2 and IgY-PO4 antibodies recognized allergenic proteins from *Dsp* and *Bt* extracts, even at the lowest tested concentration of 0.05 $\mu\text{g/mL}$ (equivalent to 500 ng/g of dust). On the other hand, a linearity range was observed between the allergen concentration and the absorbance values using IgY-PO2 (0.05 – 1.5 $\mu\text{g/mL}$ of *Bt* extract) and IgY-PO4 (0.05 – 2 $\mu\text{g/mL}$ of *Dsp* extract) (**Figure 2**). We used this result to establish the protein concentration range in the calibration curves for the allergen quantification in the dust samples.

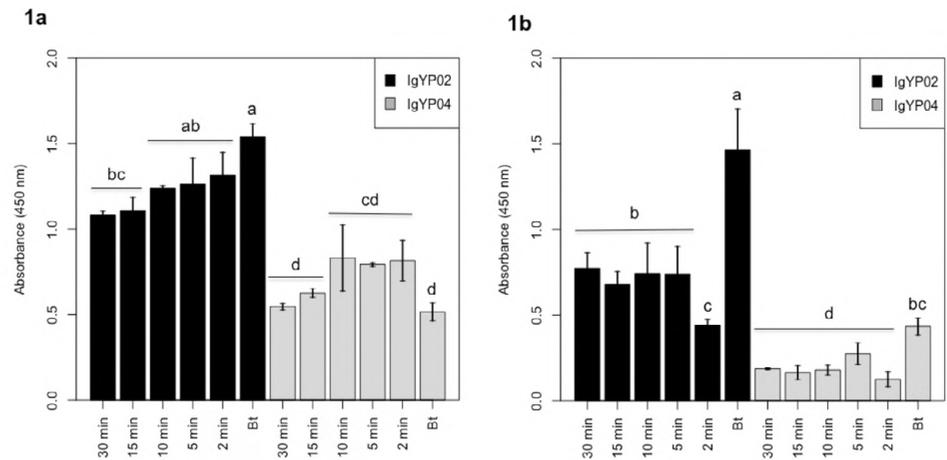


Figure 1. Extraction times of mite allergens proteins in dust samples with **(1a)** high densities of mites (> 500 m.p.g.) and **(1b)** low densities of mites (< 300 m.p.g.). Allergens were detected with the polyvalent IgY antibodies IgY-PO2 and IgY-PO4 using ELISA. Each bar represents a different protein extraction time. *Bt* extract was used as a positive control at 1 µg/mL. Results are expressed as average values ± 1 SD. Assays were performed in triplicate.

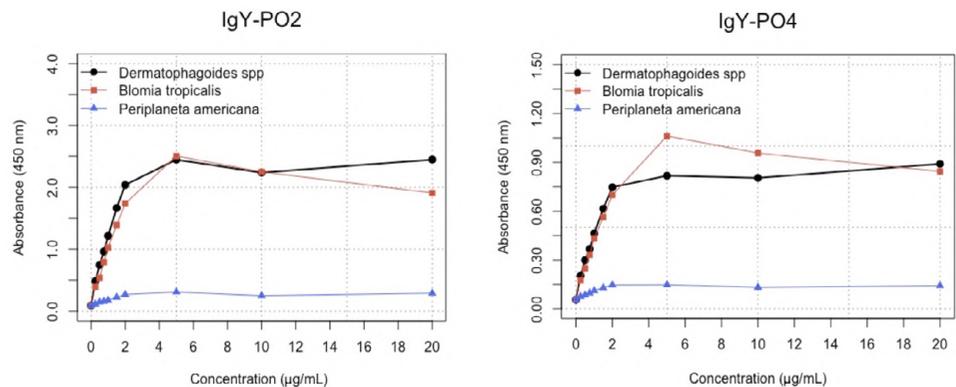


Figure 2. Detection limit of IgY-PO2 and IgY-PO4 antibodies. Different concentrations of *Blomia tropicalis*, *Dermatophagoides* sp, and *Periplaneta americana* extracts (0.5 – 20 µg/mL equivalent to 0.05 - 2 µg/well) were evaluated. Results are expressed as average values ± 1 SD.

An ANOVA showed a significant difference ($p < 0.005$) between the reactivity of the antibodies towards the three different allergenic extracts ($Bt > Dsp > Pa$). The low reactivity of both IgY-PO2 and IgY-PO4 towards the cockroach extract is indicative of relevant antibody specificity.

Allergen detection in dust samples

Both antibodies were able to recognize allergenic proteins of *Bt* and *Dsp* in the dust samples collected in indoor environments. The allergens levels in the dust samples were determined by standard calibration curves with *Bt* and *Dsp* whole body extracts using IgY-PO2 and IgY-PO4, respectively (Supplement 2). On the other hand, we used dust samples collected from new mattresses to define the cut-off point of positive and negative samples at $A_{450} \leq 0.145$ for IgY-PO2 and $A_{450} \leq 0.122$ for IgY-PO4.

Table 1 shows the ELISA assay global results according to the sampling site (Barranquilla or Santa Marta). The dust samples collected in Barranquilla displayed higher levels of mite allergens in the ELISA experiments with IgY-PO2 and IgY-PO4, which is consistent with the higher total density of mites in these samples compared with the

Santa Marta samples (mean difference = 378.57; 95% CI = 225.77 - 531.37, $p = 3.8E-06$). Furthermore, IgY-PO4 showed greater reactivity when the samples collected in Barranquilla were analyzed (mean difference = 9.66; 95% CI = 5.95 - 13.37, $p = 0.000$) compared with those from Santa Marta (mean difference = 1.86; 95% CI = 0.44 - 3.28; $p = 0.0107$).

The correlation analysis of mite density and allergen levels detected with IgYPO2 and IgYPO4 showed a linear relationship that can be explained by a simple linear model ($Y = \beta_0 + \beta_1 * X$), i.e., an increase in the mite density of a dust sample results in an average increase in allergen levels corresponding to the value of the regression coefficient (β_1) (Supplement 3). Additionally, a high correlation coefficient ($R^2 = 0.744$) was observed in *Bt* and *Dsp* allergen levels, which could be attributed to the cross-reactivity of *B. tropicalis* with *Dermatophagoides* species (*D. pteronyssinus* and *D. farinae*) (Cheong, et al., 2003; Liu, et al., 2019).

The results of the intertest and intratest precision experiments are presented in Table 2. The ELISA test with IgY-PO2 yielded coefficients of variation (CV) of 15.81 to 20.55% (intertest) and 3.05 to 10.94% (intratest). IgY-PO4 yielded CVs of 7.63 to 8.71% (intertest) and 6.18 to 6.99% (intratest).

The accuracy test confirmed that, regardless of the antibody used (IgY-PO2 or IgY-PO4), there was no significant difference between spiked and unspiked samples with the mite extracts ($p > 0.05$). Furthermore, the percentage of allergen recovery was between 86.12 and 102.90% for IgY-PO2 and between 80.62 and 100.39% for IgY-PO4 (Table 3).

Table 1. Mite density and mite allergen levels (*B. tropicalis* and *Dermatophagoides sp*) in dust samples collected in Barranquilla (N = 50) and Santa Marta (N = 50)

	Sampling site	Mean	Minimum value	Maximum value	Mean difference	LCL	UCL	p
Total mite density ^a	Barranquilla	638.02	50	1675	378.57	225.77	531.37	3.8e-06
	Santa Marta	259.44	25	1000				
IgY-PO2 (<i>Bt</i>) ^b	Barranquilla	7.11	0.40	20.43	1.86	0.44	3.28	0.011
	Santa Marta	4.48	0.047	8.45				
IgY-PO4 (<i>Dsp</i>) ^c	Barranquilla	16.77	0.39	45.53	9.66	5.95	13.37	0.000
	Santa Marta	6.34	0.074	20.07				

^a Numbers of mites per gram of dust (m.p.g.)

^b μg of *Blomia tropicalis* (*Bt*) allergens per gram of dust ($\mu\text{g/g}$)

^c μg of *Dermatophagoides sp* (*Dsp*) allergens per gram of dust ($\mu\text{g/g}$)

LCL: Lower confidence limit; UCL: Upper confidence limit

Table 2. Coefficients of variation (CV) in the ELISA assay using IgY-PO2 and IgY-PO4 antibodies

Samples	Mite density (m.p.g.)	Antibody (allergen)	Allergen levels ($\mu\text{g/g}$ of dust)			
			Mean ^a	SD ^b	CV ^c	CV ^d
1	Low	IgY-PO2 (<i>Bt</i>)	9.02	1.85	20.55	10.77
		IgY-PO4 (<i>Dsp</i>)	6.97	0.55	7.83	6.18
2	Average	IgY-PO2 (<i>Bt</i>)	15.10	2.67	15.81	3.05
		IgY-PO4 (<i>Dsp</i>)	9.91	0.76	7.63	6.28
3	High	IgY-PO2 (<i>Bt</i>)	26.58	5.01	16.84	10.94
		IgY-PO4 (<i>Dsp</i>)	16.21	1.41	8.71	6.99

^a Means of three replicates for each dust sample (n = 3)

^b SD: Standard deviation

^c CV: Coefficient of variation inter-test

^d CV: Coefficient of variation intra-test

Table 3. Accuracy of the allergen detection in dust samples using IgY-PO2 and IgY-PO4, and ELISA test

Antibody (Allergen)	Samples	Accuracy (%) ^a
IgY-PO2 (Bt)	A	94.65
	B	102.90
	C	86.12
IgY-PO4 (Dsp)	A	91.04
	B	80.62
	C	100.39

^a Means of three replicates for each dust sample (n = 3)

Discussion

Indoor dust mite contamination evaluations have been conducted for different sampling places and geographic sites. Typically, the most used technique for this type of allergen quantification is an enzymatic immunoassay based on IgG monoclonal antibodies (Platts-Mills, *et al.*, 1997; Mistrello, *et al.*, 1992). Although the ELISA test using IgG antibodies has shown good sensitivity and specificity (Liao, *et al.*, 2013; Chapman, *et al.*, 2001), the use of these type of antibodies has great limitations, among them, the high production cost of the assay, which limits its use in the routine indoor, workplace, and public sites monitoring and control of mite biological contamination. Developing alternative efficient, sensitive, and reproducible low-cost methods would be highly advantageous for the primary prevention of indoor mite contamination.

A method currently available on the market, the “Acarex®” test, is based on the semi-quantitative determination of guanine. It is very simple and easily performed by inexperienced staff in the patient’s house (Manjra, *et al.*, 1994; Haouichat, *et al.*, 2001). However, as guanine is a final product of purine digestion – a compound generally excreted by many arthropods including mites and spiders - this assay is not specific. Therefore, if spiders, for example, are present in the domestic environment, they could interfere with the assay (Mistrello, *et al.*, 1992; Saijo, *et al.*, 2007).

Recently, our group used IgY technology to produce polyclonal antibodies against dust mite group 1 allergens (cysteine protease). These antibodies showed high reactivity and sensitivity towards *D. farinae*, *D. pteronyssinus*, and *B. tropicalis* allergenic proteins including group-1 mite allergens (Egea, *et al.*, 2018; Egea, *et al.*, 2019). Here, we used two of these IgY antibodies (IgY-PO2 and IgY-PO4) to explore their applicability for detecting mite allergens in dust samples using an indirect ELISA test.

IgY technology has successfully been used in experimental allergology to produce antibodies against food allergens such as peanuts (*Arachis hypogaea L*) (Kiio & De Meulenaer, 2012; Iqbal & Ateeq, 2013). Moreover, other studies have applied IgY technology in the simultaneous detection of multiple food allergens such as oat proteins, Brazilian nuts, and peanuts obtaining detection limits between 1.0 and 0.1 µg/g and proving the viability of using them in immunochemical tests for multiple allergen detection (Blais, *et al.*, 2003).

Here we determined that the limit of detection of IgY-PO2 and IgY-PO4 antibodies was 0.05 µg of mite allergens per milliliter of extract (corresponding to 500 ng/g of dust). Our results with the dust samples showed significantly higher (47 ng/g - 45.53 µg/g) allergen levels than those previously reported in the Colombian Caribbean. In this respect, in a study conducted in Cartagena (Colombia), the maximum levels of the Der p 1 and Der f 1 allergens were 109.49 ng/g and 1,600 ng/g, respectively (Mercado, *et al.*, 1996), detected with a commercial sandwich ELISA test using IgG monoclonal antibodies. The IgY antibodies used in the present study were polyvalent in nature, which would explain their greater reactivity. Despite the use of specific synthetic peptides for

chicken immunization, IgY antibodies recognize both group-1 allergens and others present in mites' whole body extracts as reported in a previous study (Egea, *et al.*, 2018). It is clear to us that to establish the specific detection of mite group 1 allergens from dust it is necessary to perform calibration curves with standardized allergen extracts, which were not used in the present study.

The correspondence between the mite allergen levels (detected with the IgY antibodies) and the mite density present in the dust samples indicated that IgY antibody-based ELISA allergen measurements could be used to substitute the direct counting of mites considerably reducing analysis time. Moreover, higher intertest ($CV \leq 8.71\%$) and intratest ($CV \leq 6.99\%$) precision and accuracy (80.62 - 100.39 %) obtained with the ELISA test using IgY-PO4 substantially increase the reliability of the results. Prester, *et al.* (2007) reported similar results for precision (intra-assay $CV < 6.9\%$, inter-assay $CV < 13.3\%$) and accuracy (91% to 93%) using the enzyme immunoassay with two monoclonal antibodies for the detection group-1 mite allergens (Der f 1 and Der p 1). Consequently, the detection of mite allergens using IgY antibody-based immunoassays stands out as an alternative to the currently available guanidine method, since they are specific for mite allergens and not those of other arthropods (such as cockroaches).

Future studies will be focusing on the quantification of the major Der f 1, Der p1, and Blo t 1 allergens in dust samples using specific calibration standards. The diagnostic performance and the sensitivity of the ELISA assay will be determined and compared with other commercially available reference tests. At present, several studies comparing different methods based on IgG antibodies for the detection of mite allergens in indoor environments have been published showing differences in sensibility and specificity (Saijo, *et al.*, 2007; Rim, *et al.*, 2016). To the best of our knowledge, presently there are no studies comparing IgG- and IgY-based tests, which would be the next step in our research.

Conclusions

Our study showed that polyclonal avian antibodies (IgY-PO2 and IgY-PO4) directed against dust mite group-1 allergens were efficient in monitoring mite levels of intramural dust samples using an indirect ELISA assay. IgY-PO4 could be used for controlling mite infestation and prove beneficial to allergy-sensitive patients suffering from clinical asthma symptoms.

Acknowledgments

We would like to thank ACONDESA for supplying and donating the Hy Line Brown chickens and Elkin Navarro Quiroz for methodological support in hen immunization and development of laboratory activities. Financial support for this project was provided by the *Universidad del Norte* (Investigation, Development and Innovation department, DIDI), and by *Colciencias* (Grand 120370049094).

Authors' contributions

EE, LAB: Conception of the investigation, analysis, and interpretation of the data, critical review of the manuscript. DM: Acquisition and data analysis, writing, and critical review of the manuscript. GG: Analysis and interpretation of the data, critical review of the manuscript. SS: Acquisition and data analysis. AE: Acquisition and data analysis. ASM: Acquisition and data analysis.

Conflicts of interest

The Authors declares that there is no conflicts of interest.

References

- Acuña-Cantillo, L., Moreno, A.S., Garavito, G., Egea, E., Mendoza, D.L. (2015). Prevalencia y densidad de ácaros domésticos en comunidades marginadas de dos ciudades de Colombia. *Rev Cubana Invest Biomed.* **34** (1): 18-26.

- Andiappan, A.K., Puan, K.J., Lee, B., Nardin, A., Poidinger, M., Connolly, J., Chew, F.T., Wang, D.Y., Rotzschke O.** (2014). Allergic airway diseases in a tropical urban environment are driven by dominant mono-specific sensitization against house dust mites. *Allergy*. **69** (4): 501-509.
- Arlan, L.G., Morgan, M.S., Goelz, J.F.** (1999). Quantitation of dust mites and allergen in small dust samples. *J Allergy Clin Immunol*. **104** (3 Pt 1): 707-709. Doi: 10.1016/s0091-6749(99)70349-0
- Asher, M.I., Stewart, A.W., Mallol, J., Montefort, S., Lai, C.K., Ait-Khaled, N., Odhiambo, J., The ISAAC Phase One Study Group.** (2010). Which population level environmental factors are associated with asthma, rhinoconjunctivitis and eczema? Review of the ecological analyses of ISAAC Phase One. *Respir Res*. **11** (1): 8. Doi: 10.1186/1465-9921-11-8
- Barrera, L.A., Egea, E., Espejo, J., Sosa, C., Navarro, E., Garavito, G., Mendoza D.L.** (2016). Synthetic oligopeptides designed from mite cysteine proteases and methods for the production of polyclonal IgY antibodies for the detection of intradomiciliary mites. Patent US 9.416,163 B2. United States. Accessed on: August 2, 2018. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/af/d6/dd/b5456b9d46b5eb/US9416163.pdf>
- Blais, B., Gaudreault, M., Phillippe, L.M.** (2003). Multiplex enzyme immunoassay system for the simultaneous detection of multiple allergens in foods. *Food Control*. **14** (1): 43-47.
- Chapman, M.D., Tsay, A., Vailes, L.D.** (2001). Home allergen monitoring and control – improving clinical practice and patient benefits. *Allergy*. **56** (7): 604-610.
- Collof, M.J., Spieksma, F.** (1992). Pictorial keys for the identification of domestic mites. *Clin Exp Allergy*. **22**: 823-830.
- Dennis, R., Caraballo, L., García, E., Caballero, A., Aristizábal, G., Córdoba, H., Rodríguez, M.N., Rojas, M.X., Orduz, C., Cardona, R., Blanco, A., Egea, E., Verbel, C., Cala L.L.** (2004). Asthma and other allergic conditions in Colombia: a study in 6 cities. *Ann Allergy Asthma Immunol*. **93** (6): 568-574.
- Dennis, R.J., Caraballo, L., García, E., Rojas, M.X., Rondón, M.A., Pérez, A., Aristizábal, G., Peñaranda, A., Barragán, A.M., Ahumada, V., Jiménez, S.** (2012). Prevalence of asthma and other allergic conditions in Colombia 2009-2010: a cross-sectional study. *BMC Pulm Med*. **12**: 17. Doi: 10.2217/14622416.9.4.453.
- Drake, K.A., Galanter, J.M., Burchard, E.G.** (2008). Race, ethnicity and social class and the complex etiologies of asthma. *Pharmacogenomics*. **9** (4): 453-462.
- Egea, E., Mendoza, D., Garavito, G., Espejo, A., Lizaraso, L.M., Navarro, E., Barrera L.A.** (2018). IgY específicos anti-alérgenos del grupo 1 de ácaros del polvo doméstico inducidos por oligopéptidos sintéticos no glicosilados. *Biomédica*. **38**: 232-243. Doi: 10.7705/biomedica.v38i0.3689
- Egea, E., Mendoza, D., Garavito, G., Saavedra, S., Gómez, H., Sanjuan, M.** (2019). Nanogold - IgY antibodies. An immunoconjugated for the detection of house dust mite (*Dermatophagoides*) allergens. *J Immunol Methods*. **464**: 15-21. Doi: 10.1016/j.jim.2018.08.013
- Environmental Protection Agency (EPA).** Sampling House Dust for Lead: Basic Concepts and Literature Review, Final Report, EPA 747-R-95-007. Washington D.C., United States. 1995. Accessed on: October 25, 2015. Available at: www.epa.gov/sites/production/files/documents/r95-007.pdf
- Halken, S.** (2004). Prevention of allergic disease in childhood: clinical and epidemiological aspects of primary and secondary allergy prevention. *Pediatr Allergy Immunol*. **15** (Suppl 16): 9-32.
- Haouichat, H., Pauli, G., Ott, M., Bessot, J.C., de Blay, F., Verol, A., Bessot, J.C.** (2001). Controlling Indoor Mite Exposure: The Relevance of the Acarex Test. *Indoor Built Environ*. **10** (2): 109-115.
- Huss, K., Adkinson, N.F., Eggleston, P.A., Dawson, C., Van Natta, M.L., Hamilton, R.G.** (2001). House dust mite and cockroach exposure are strong risk factors for positive allergy skin test responses in the Childhood Asthma Management Program. *J Allergy Clin Immunol*. **107** (1): 48-54.
- Iqbal, A. & Ateeq, N.** (2013). Effect of processing on the detectability of peanut protein by ELISA. *Food Chem*. **141** (3): 1651-1654.
- Kamble, S. & Bharmal, M.** (2009). Incremental direct expenditure of treating asthma in the United States. *J Asthma*. **46** (1): 73-80.
- Kiio, J.N. & De Meulenaer, B.** (2012). Immunological detection of peanut (*Arachis hypogaea* L) proteins using chicken antibodies. *Food Agr Immunol*. **23** (3): 217-226.
- Liao, E.C., Lin, Y.H., Tsai, J.J.** (2013). Detection of group 2 *Dermatophagoides pteronyssinus* allergen for environmental monitoring of dust mite infestation. *Biosci Trends*. **7** (2): 82-88.

- Liu, X., Zheng, P., Zheng, S.G., Zhai, Y., Zhao, X., Chen, Y., Xiangwei, W.Z., Cai, C., Wu, Z., Huang, Z., Zou, X., Liao, C., Sun, B. (2019). Co-sensitization and cross-reactivity of *Blomia tropicalis* with two *Dermatophagoides* species in Guangzhou, China. *J Clin Lab Anal.* **33** (9): [e22981]. Doi: 10.1002/jcla.22981
- Londoño-Trujillo, D., Celis-Preciado, C.A. (2014). Medición de costos indirectos en pacientes colombianos con asma. *Revista Colombiana De Neumología.* **26** (1): 12-18. Doi: 10.30789/rcneumologia.v26.n1.2014.54
- Manjra, A., Berman, D., Weinberg, E.G., Gous, E., Potter, P.C. (1994). Comparison between the Acarex test and a Der p 1 ELISA for the detection of house-dust mites in the homes of asthma sufferers. *S Afr Med J.* **84** (4): 220-222.
- Marks, G.B. (1998). House dust mite exposure as a risk factor for asthma: benefits of avoidance. *Allergy.* **53** (48 Suppl): 108-114.
- Del Castillo-Castilla, L., Mendoza-Meza, D. L., Lozano-Socarrás, S., Jaimes-Sanabria, M. B., Pedrozo-Pupo, J., Abello-Gámez, L. (2008). Factores de riesgo asociados con asma alérgica en niños de 4 a 16 años de Santa Marta, Colombia. *Duazary.* **5** (1): 9-14. Doi: 10.21676/2389783X.55
- Mendoza, D.L., Ruiz, T., Lagares, A., Garavito, G., Egea, E. (2011). Caracterización de la actividad alérgica y enzimática de extractos somáticos producidos a partir de cultivos *in vitro* del ácaro *Dermatophagoides farinae*. *Salud Uninorte.* **27** (1): 11-21.
- Mercado, D., Puerta, L., Caraballo, L. (1996). Niveles de alérgenos de ácaros en el polvo de habitación en Cartagena, Colombia. *Biomédica.* **16**: 307-314.
- Milián, E., Díaz, A.M. (2004). Allergy to house dust mites and asthma. *PR Health Sci J.* **23** (1): 47-57.
- Mistrello, G., Roncarolo, D., Ottoboni, F., Rigamonti, I. (1992). Quantitative determination of Der p I allergen levels in allergenic extracts and house-dust samples. *Aerobiologia.* **8** (3): 429-434.
- Morgan, W.J., Crain, E.F., Gruchalla, R.S., O'Connor, G.T., Kattan, M., Evans, R. 3rd., Stout, J., Malindzak, G., Smartt, E., Plaut, M., Walter, M., Vaughn, B., Mitchell, H. (2004). Inner-City Asthma Study Group. Results of a home-based environmental intervention among urban children with asthma. *N Engl J Med.* **351** (11): 1068-1080.
- Mukherjee, A.B. & Zhang, Z. (2011). Allergic asthma: influence of genetic and environmental factors. *J Biol Chem.* **286** (38): 32883-32889. Doi: 10.1074/jbc.R110.197046
- Pauffer, P., Gebel, T., Dunkelberg, H. (2001). Quantification of house dust mite allergens in ambient air. *Rev Environ Health.* **16** (1): 65-80.
- Platts-Mills, T.A., Vervloet, D., Thomas, W.R., Aalberse, R.C., Chapman, M.D. (1997). Indoor allergens and asthma: report of the Third International Workshop. *J Allergy Clin Immunol.* **100** (6): S2-24.
- Portnoy, J., Miller, J.D., Williams, P.B., Chew, G.L., Miller, J.D., Zaitoun, F., ... Wallace, D. (2013). Environmental assessment and exposure control of dust mites: a practice parameter. *Ann Allergy Asthma Immunol.* **111**: 465-507. Doi: 10.1016/j.anai.2013.09.018
- Prester, L., Brcić Karaconji, I., Macan, J. (2007). Determination of mite allergens in house dust using the enzyme immunoassay. *Arh Hig Rada Toksikol.* **58** (4): 413-419. Doi: 10.2478/v10004-007-0034-2
- Rappaport, H. & Bonthapally, V. (2012). The Direct Expenditures and Indirect Costs Associated with Treating Asthma in the United States. *J Aller Ther.* **3** (2): 1-8.
- Rim, J.H., Park, B.G., Kim, J.H., Kim, H.S. (2016). Comparison and clinical utility evaluation of four multiple allergen simultaneous tests including two newly introduced fully automated analyzers. *Pract Lab Med.* **21** (4): 50-61. Doi: 10.1016/j.plabm.2016.01.002
- Rodríguez-Martínez, C.E., Sossa-Briceno, M.P., Castro-Rodríguez, J.A. (2017). Análisis de costo-utilidad de la administración de corticoesteroides inhalados una vs. dos veces al día para el tratamiento de pacientes pediátricos con asma persistente. *Rev.Medica.Sanitas.* **20** (3): 139-151.
- Saijo Y, Nakagi Y, Sugioka Y, Ito T, Endo H, Kuroda H, Yoshida, T. (2007). Comparative study of simple semiquantitative dust mite allergen tests. *Environ Health Prev Med.* **12** (5): 187-192.
- Smiley, R.L. & Gorham, J.R. (1991). Insect and mite pests in food: An illustrated key. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington, DC. **1**: 3-43.
- Vojta, P.J., Randels, S.P., Stout, J., Muilenberg, M., Burge, H.A., Lynn, H., Mitchell, H., O'Connor G.T., Zeldin, D.C. (2001). Effects of physical interventions on house dust mite allergen levels in carpet, bed, and upholstery dust in low-income, urban homes. *Environ Health Perspect.* **109** (8): 815-819.
- Winn, A.K., Salo, P.M., Klein, C., Sever, M.L., Harris, S.F., Johndrow, D., Crockett, P.W., Cohn, R.D., Zeldin, D. (2016). Efficacy of an in-home test kit in reducing dust mite allergen levels: results of a randomized controlled pilot study. *J Asthma.* **53** (2): 133-138.

Artículo original

La inconmensurabilidad kuhniana y las generalizaciones simbólicas: un análisis a partir de la comparación de dos paradigmas teóricos de la física

Kuhnian incommensurability and symbolic generalizations: A comparative analysis of the two theoretical paradigms of physics

 Lina Marcela Cadavid-Ramírez*, Mateo Arias Vélez

Universidad Católica Luis Amigó, Medellín-Colombia

Resumen

Dado que las teorías son léxicos cuyos términos no pueden traducirse asertivamente, la relación existente entre ambas sería de inconmensurabilidad, pero ¿dicho supuesto se extiende a las generalizaciones simbólicas de una teoría? Para dar respuesta a esta cuestión en los términos de la propuesta de la inconmensurabilidad local tal como la concibe Thomas Kuhn, en este artículo se comienza analizando qué términos de las formulaciones de la física clásica y la física einsteniana son conmensurables o inconmensurables, para poder examinar luego la incompatibilidad en las generalizaciones simbólico-matemáticas de las teorías en cuestión. Se concluye que ambas teorías son inconmensurables tanto en su taxonomía conceptual como en el ámbito matemático.

Palabras clave: Inconmensurabilidad local; Mecánica newtoniana; Física relativista; Taxonomía lexical; Generalización simbólica.

Abstract

Since theories are lexicons whose terms cannot be translated assertively, the relationship between the two would be that of incommensurability but, does this assumption extends to the symbolic generalizations of a theory? To answer this question in terms of the concept of local incommensurability as conceived by Thomas Kuhn, in this article I initially analyze which terms of the formulation of classical and Einsteinian physics are commensurable and which, incommensurable, to then examine the incompatibility of the symbolic-mathematical generalizations of the theories in question. The conclusion is that the two theories are incommensurable both from the standpoint of their conceptual taxonomy and the mathematical field.

Keywords: Local incommensurability; Newtonian mechanics; Relativity theory; Lexical taxonomy; Symbolic generalizations.

Introducción

En el ensayo que escribe Ian Hacking para conmemorar el 50 aniversario de la publicación de *La estructura de las revoluciones científicas*, el filósofo e historiador de la ciencia canadiense señala que, posiblemente, Kuhn continuó, en vez de disolver de manera definitiva, la filosofía de la ciencia del Círculo de Viena. La afirmación, ya de por sí sugestiva, se hace justamente en el apartado sobre el término inconmensurabilidad, el cual, según (Gentile, 1996), encontraría antecedentes en la filosofía de Carnap. Según la autora, Kuhn exagera su distancia con los postulados de la “concepción heredada” en filosofía de la ciencia, incluso el mismo Carnap (Gentile, 1996) plantea su acuerdo con Kuhn en cuanto a las consideraciones lingüísticas de su teoría sobre la posibilidad o la imposibilidad de traducir sin pérdida los términos entre teorías científicas.

Citación: Cadavid-Ramírez LM, Arias-Vélez M. La inconmensurabilidad kuhniana y las generalizaciones simbólicas: un análisis a partir de la comparación de dos paradigmas teóricos de la física. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):377-386, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1258>

Editor: Rubén Ardila

***Correspondencia:**

Lina Marcela Cadavid-Ramírez;
lina.cadavidra@amigo.edu.co

Recibido: 2 de julio de 2020

Aceptado: 10 de marzo de 2021

Publicado: 17 de junio de 2021



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

Ahora bien, si como señala **Moulines** (2011) el libro de Kuhn representó una revuelta historicista y la delineación de una filosofía histórica de la ciencia, que puso bajo otra perspectiva problemas de la lógica de la investigación científica, también es cierto que ciertos aspectos de este reconocido libro no lograron llevar hasta las últimas consecuencias su talante historiográfico - un ejemplo podría reconocerse en la misma noción de inconmensurabilidad, cuyo carácter global se abandona privilegiando uno local (**Durán**, 1996) -, que termina por ser el interés de Kuhn años después de su planteamiento original en *La estructura*.

El filósofo estadounidense se acoge a la metáfora lingüística en los textos de la década de los 80 (**Lorenzano & Nudler**, 2012), dando lugar a la denominada versión débil de la inconmensurabilidad, cuyas tesis se centran en los problemas de traducción entre diferentes comunidades lingüísticas, acercándose con ello, según (**Gentile**, 1996) a las ideas desarrolladas por Carnap en su obra *Verdad y confirmación*.

La inconmensurabilidad local kuhniana supone que las teorías científicas son como léxicos conformados por términos vinculados entre sí por un tipo de holismo local, que impide que uno de ellos pueda individualizarse del resto del entramado conceptual para traducirse de una teoría a otra. Con el advenimiento de una revolución científica, las piezas de una teoría “encajan para formar un todo integral que tuvo que romperse y reformularse en el camino hacia” otra teoría (**Kuhn**, 1989, p. 71). Así, no hay ningún modo de corregir las ideas de una teoría sin reconstruir la mayor parte de su vocabulario y leyes. Los científicos aprenden a reconocer objetos en el mundo según un criterio de similitud-disparidad que clasifica y discrimina a partir de características comunes, por tanto “son pocos los términos o expresiones [de un vocabulario científico] con referente que se aprenden separadamente, o del mundo o uno de otro” (**Kuhn**, 1989, p. 130).

Una de las causas de la inconmensurabilidad sería la recategorización de un término en el paso de una teoría a otra, ya que después de una revolución, con el cambio de las categorías y los referentes, el nuevo vocabulario no puede contener el anterior. Así, cuando una teoría no logra explicar un fenómeno surgen anomalías locales, una vez que el científico fracasa en su intento de hacer pequeños ajustes en las discrepancias, se hace necesario un cambio general que consiste en alterar el significado de las categorías que componen el vocabulario de una teoría.

En contraste, autores como **Popper** (1975) o **Einstein** (1983; 1986; 1999), han afirmado que, aunque los términos de dos taxonomías sean diferentes, los símbolos matemáticos que usan sí pueden ser equiparables, pero según **Kuhn** (2002), los símbolos que parecen ser iguales en dos taxonomías en realidad no se relacionan del mismo modo con el mundo, pues sus significados son distintos. Ahora bien, el propósito de este artículo es revisar este aspecto de la inconmensurabilidad local con respecto a las generalizaciones simbólicas entre dos teorías científicas para evaluar si, incluso en este aspecto, es posible sostener la postura kuhniana, cuestión que señalaría la novedad que se introduce en la visión local y que podría restarle debilidad e, incluso, darle un cariz más audaz que el de un problema de taxonomía entre términos devenidos intraducibles tras una revolución.

El análisis comparativo basado en los supuestos kuhnianos que se presenta a continuación está sustentado en un estudio de los elementos conceptuales y las generalizaciones simbólicas de las teorías físicas de Newton y de Einstein a la luz de la noción de inconmensurabilidad tal como fue desarrollada por Kuhn en textos como *La estructura de las revoluciones científicas* (2013), *Cambio de teoría como cambio de estructura: comentarios sobre el formalismo de Sneed* (1977), *Conmensurabilidad, Comparabilidad y Comunicabilidad en ¿Qué son las revoluciones científicas?* (1989), y los capítulos *Lógica del descubrimiento o psicología de la investigación* (1975), *Algo más sobre paradigmas y Objetividad, juicios de valor y elección de teorías*, de su libro *La tensión esencial* (1993). Para contrastar las teorías de Newton y de Einstein, se han tenido en cuenta los escolios de los *Principios matemáticos de la filosofía natural* (2011) de **Newton** y *Sobre la teoría de la relatividad* (1999) de **Einstein**, lecturas que fueron complementadas con el estudio de

la *Relatividad para principiantes* (2012) y *Los hoyos negros y la curvatura del espacio-tiempo* (2014) de Shahen Hacyan, la *Teoría clásica de los campos* del *Curso de física teórica* (1992) de Landáu y Lifshitz y, por último, los relatos de **Barbara Lovett Cline** en *Los creadores de la nueva física* (1980).

Discusión

La mecánica clásica y la teoría de la relatividad

La física newtoniana quedó consignada en la obra *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, cuya primera versión fue publicada en 1687 bajo la supervisión de Edmond Halley. Los *Principia* se inauguran con las definiciones de materia, masa, inercia, fuerza centrípeta, movimiento, espacio y tiempo, y se hace “la distinción entre las nociones «absolutas, verdaderas y matemáticas» de espacio, tiempo, lugar y movimiento, y las nociones «relativas, aparentes y comunes»” (Maudlin, 2014, p. 40). Esta distinción será crucial en el desarrollo de la física hasta Einstein. A diferencia de la mecánica actual, las demostraciones matemáticas de los *Principia* son de corte puramente geométrico y no algebraico, y la carencia de técnicas algorítmicas complicó, posteriormente, su análisis detallado. Aún en algunas demostraciones de los dos primeros libros hay rasgos de cálculos de curvaturas, métodos de integración o series infinitas mediante el método de fluxiones, sin embargo, Newton no ofreció detalle alguno sobre “técnicas altamente algorítmicas” (Guicciardini, 2007, p. 78). Durante el siglo XVIII se intentó aplicar matemáticas algorítmicas a la mecánica newtoniana con el fin de simplificarla, el resultado fueron dos líneas: la británica, con una metodología de corte geométrico muy al estilo estrictamente newtoniano y la francesa, que trató de alejarse del método geométrico y apostó al cálculo analítico. La obra de Newton llegó a Francia a través de Voltaire, quien, fascinado por los hallazgos de los *Principia*, se encargó de convencer a la marquesa de le Chatelet, “una de las mujeres matemáticas más destacadas de la historia” (Hacyan, 2014, p. 15), de traducir los *Principia*. Luego, “tanto ella como sus colegas Maupertuis, D’Alembert y otros contribuyeron a propagar la nueva ciencia. Era necesario, sin embargo, reescribir a Newton en un lenguaje matemático más claro y manejable” (Hacyan, 2014, p. 15). El trabajo por renovar los postulados dinámicos de Newton a un lenguaje matemático más simple y general atrajo la atención de muchos de los matemáticos y geómetras más ilustres de la época.

Así surge la llamada mecánica analítica, una versión algebraica de la mecánica newtoniana que permite estudiar los sistemas inerciales en igualdad de términos sin cambiar las leyes de Newton, y cuyo objetivo sería postular principios generales para deducir algebraicamente ecuaciones diferenciales de movimiento y lograr describir los fenómenos dinámicos con mayor precisión. La mecánica de Newton y las formulaciones de la analítica se agrupan todas en la denominada mecánica clásica (Poggi-Varaldo, et al., 2006). El primero en trabajar una nueva mecánica fue el matemático Leonhard Euler, quien desarrolló un enfoque de la dinámica analítica con funciones que representan expresiones analíticas, dando paso a la ‘desgeometrización’ del cálculo en favor de funciones simbólico-matemáticas, como la fórmula $f = ma$ para la segunda ley.

Jean Le Rond D’Alembert también contribuyó a la transformación aritmética de la mecánica newtoniana. D’Alembert estableció, a partir de la segunda ley de Newton, que el conjunto de fuerzas externas e inerciales forman un estado total de equilibrio dinámico (Romero, 2007). Con ello, Euler y D’Alembert introducen la mayoría de las ecuaciones de la mecánica clásica y sus notaciones matemáticas, sin embargo, estas solo encontrarían su versión definitiva 45 años más tarde con la mecánica de Joseph Louis Lagrange. En su obra *Mécanique Analytique* (1788), reformuló y complementó los avances en mecánica realizados desde los *Principia* hasta sus días. Esta formulación desarrolla, por primera vez, un modo matemático, general y uniforme de la mecánica newtoniana que resolvía todos los problemas relacionados con el movimiento de los cuerpos. Otro físico destacado en el desarrollo de la matematización de la mecánica mediante el método analítico fue Pierre-

Simon Laplace, quien introdujo los últimos descubrimientos de su época que explicaban los fenómenos anómalos en el movimiento lunar o en las órbitas de Saturno. Entre sus aportes se cuenta la famosa ecuación de Laplace reformulada luego por Poisson.

Ahora bien, la formulación lagrangiana de la mecánica newtoniana no fue la única que se hizo. William Rowan Hamilton se dedicó al estudio de las obras de Newton y Laplace para aplicar sus hallazgos en óptica a la mecánica. Hamilton se dio cuenta de que los sistemas físicos y ópticos obedecen a un principio variacional común que da como resultado una nueva formulación de la mecánica analítica, diferente de la de Lagrange y caracterizada por la denominada función hamiltoniana ($H(pq) = p \cdot q' - L$), posteriormente desarrollada por Jacobi y Poisson, quienes introducen una estructura geométrica en el espacio de fases de la mecánica lagrangiana. Los resultados alcanzados por Hamilton hicieron posible su aplicación a la mecánica cuántica años más tarde. Así pues, la mecánica analítica posee dos formulaciones diferentes (lagrangiana y hamiltoniana) fundadas en la mecánica newtoniana que logran describir un mismo fenómeno a partir de métodos distintos.

Esta fue la mecánica que Einstein recibió y de la cual se apartó en aspectos esenciales. Einstein publica en 1905 la teoría de la relatividad especial o restringida. Según esta, cuando se estudia un suceso en dos sistemas de referencia distintos que se trasladan en línea recta y con un movimiento uniforme, se puede determinar objetivamente dicho suceso por medio de las transformaciones de Lorentz, es decir, las leyes de la mecánica son las mismas sin importar el sistema de referencia. En este sentido, la teoría de la relatividad restringida no dispone de un sistema de referencia privilegiado, esto es, un espacio absoluto (Lovett-Cline, 1980).

La teoría de la relatividad está sustentada sobre dos principios: el principio de relatividad (todos los sistemas inerciales son equivalentes por medio de transformaciones) y el principio de constancia de la velocidad de la luz (esta se mueve siempre a la misma velocidad en cualquier sistema de referencia inercial) (Einstein, 1983). El establecimiento de estos dos principios trajo consigo una nueva visión del espacio y el tiempo. Pocos años después, con los aportes de Minkowski, se unifican ambas categorías en un solo concepto: el espacio-tiempo. Según Einstein (1983), este se corresponde con una estructura cuasi-euclidiana de la realidad conformada por tres coordenadas espaciales y una temporal.

Desde 1908 Einstein comenzó a trabajar en la generalización del principio de relatividad con el propósito de extender la teoría restringida a una que tuviera en cuenta los cambios en las aceleraciones y los efectos gravitatorios. El problema que introdujo la teoría de la relatividad general cuestionaba la distinción de la mecánica clásica entre masa pesante o gravitatoria y masa inercial, según la cual las aceleraciones horizontales dependen de la inercia de un cuerpo, en tanto que las aceleraciones verticales efectuadas por la fuerza de gravedad son siempre constantes; así, todos los cuerpos, sin importar su material o tamaño, caen siempre a la misma velocidad en ausencia de la fricción que supone el aire. Esta distinción era incompatible con el principio de relatividad, razón por la cual Einstein propuso alcanzar una equivalencia entre los dos tipos de masa.

Se comenzó la elaboración de una teoría general de la relatividad que explicara el movimiento de un cuerpo expuesto a un campo gravitatorio. De este modo, el espacio-tiempo casi euclidiano de la primera formulación se reemplazó por un espacio curvo (riemmeniano) en el que los objetos afectados por un campo gravitacional no describen líneas rectas sino geodésicas determinadas por la estructura del espacio-tiempo. Esto permitió que “las ecuaciones que expresan las leyes de la naturaleza [fueran] covariantes con respecto a todas las transformaciones continuas de las coordenadas. Este es el principio de *relatividad general*” (Einstein, 1983, p. 158). Según Einstein (1983) la velocidad de la luz marca un límite al movimiento y velocidad de los cuerpos que, si es sobrepasado, acarrea cambios en el cuerpo que se traslada. La masa es también una medida de la energía de un cuerpo, por ello, cuando una partícula se mueve a una velocidad cercana a c (velocidad de la luz) comenzará a aumentar sus cantidades de energía.

Inconmensurabilidad y generalizaciones simbólicas

En términos generales, los elementos intraducibles entre ambas teorías son de dos clases: los términos homónimos, cuyas relaciones y significados han cambiado o han sido reformulados por completo, y los términos nuevos, que no poseen traducción directa de una teoría a otra. Entre los términos reformulados por la relatividad están la noción de fuerza, reemplazada por la idea de campo gravitatorio –según **Maudlin** (2014), la idea de fuerza newtoniana no es la misma que la usada en la actualidad, aquella se corresponde “más bien con lo que hoy se llamaría un “impulso”, es decir, la acción de una fuerza a través de un cierto intervalo de tiempo” (p. 46)–.

Otro ejemplo puede evidenciarse en la reformulación de la noción de masa, la cual es constante en la mecánica clásica, en tanto que en la einsteniana es variable (**Kuhn**, 2013), ya que una de las modificaciones esenciales que realizó Einstein a los fundamentos de la física clásica fue la coincidente “correspondencia entre la masa de un cuerpo, considerada como fuente de gravedad en la ley de la gravitación de Newton, y la masa de un cuerpo como medida de la inercia en las leyes del movimiento de Newton” (**Lovett-Cline**, 1980, p. 291). Según **Einstein** (1983) “la teoría de la relatividad debe su existencia al hecho empírico de la igualdad numérica entre la masa inerte y el peso de los cuerpos, un hecho fundamental para el que la mecánica clásica no proporciona ninguna interpretación” (p. 55), de modo que fue necesaria la reformulación de este principio para hacer general la teoría de la relatividad especial, para lo cual Einstein introdujo modificaciones que, desde la perspectiva kuhniana, son recategorizaciones teóricas que permitan vincular la inercia y la gravedad.

Un tercer ejemplo lo encontramos en el término aceleración: para la relatividad “la aceleración de un cuerpo que cae no es independiente de su velocidad horizontal o energía interna del sistema” (**Einstein**, 1983, p. 95), de tal forma que la aceleración, a diferencia de lo que ocurre en la mecánica newtoniana, no es solo una relación entre la masa y la fuerza sino que hay una relación con la gravedad, con el principio de equivalencia de las masas y con el presupuesto de un espacio continuo y relativo.

Entre los términos intraducibles está el de energía. Según la relatividad, la cantidad de energía siempre será equivalente a la masa cuando la velocidad del cuerpo se acerque a la de la luz. Así, para aumentar la velocidad de un cuerpo hay que proporcionarle energía, lo que se manifiesta en un aumento de la masa del cuerpo, lo cual contrasta con las relaciones taxonómicas de la mecánica newtoniana, en las que para aumentar la velocidad de un cuerpo es necesario imprimirle una fuerza, lo que no modifica en modo alguno su masa. De este modo, el holismo local del elemento masa, como lo señala **Kuhn** (2002), impide que este concepto pueda ser individualizado y luego conservado dentro de la relatividad. En el paso de la taxonomía newtoniana a la einsteniana el concepto de masa se ha visto alterado y redefinido tanto en las relaciones con otros términos de la misma categoría como con los referentes del mundo.

Pero el cambio más radical entre la mecánica de Newton y la relatividad de Einstein se efectuó sobre las concepciones de tiempo y espacio y, por ende, sobre las estructuras generales de ambas teorías. Según **Kuhn** (2002) “para la transición de Newton a Einstein, el cambio de léxico más significativo reside en el vocabulario cinemático anterior para el espacio y el tiempo” (p. 95). Recuérdese que la noción de «absoluto» pasó a la mecánica relativista con la connotación de inmóvil, inactivo o compartido por todos los puntos, relación inexistente en la primera formulación de la mecánica de Newton. Cabe resaltar que el espacio-tiempo relativista también es abstracto y matematizable, rasgos que le otorgan naturaleza absoluta al tiempo y al espacio newtoniano. A partir de esta caracterización, las nociones newtonianas y einstenianas parecen relacionables o deducibles entre sí. Pero en sentido estricto no son iguales.

Con la formulación de la teoría de la relatividad especial, el tiempo y espacio absolutos pierden precisión empírica; por otra parte, “con el descubrimiento de la relatividad de la simultaneidad, el tiempo y el espacio fueron fusionados en un único continuo [...] Así el espacio físico fue extendido a un espacio de cuatro dimensiones que también incluye la

dimensión del tiempo” (Einstein, 1983, p. 90). En síntesis, la mecánica relativista restringida hace uso de sistemas de coordenadas para especificar el sistema de referencia que estudia, sin embargo, estas nociones —sistemas de coordenadas y sistemas inerciales— se encuentran ausentes en la formulación inicial de la mecánica newtoniana. La necesidad de un sistema de coordenadas lo introduce por la mecánica analítica para que las leyes de la teoría clásica “puedan enunciarse en forma algebraica” (Maudlin, 2014, p. 63), como en la mecánica analítica posterior de Euler; por otra parte, la noción de un marco de referencia desaparece casi completamente con la relatividad general y es reemplazada por ecuaciones diferenciales.

Ahora, con respecto a los métodos de transformación que usan ambas teorías, el principio de relatividad se hace efectivo gracias a que las coordenadas entre dos sistemas de referencia pueden relacionarse entre sí a través de las transformaciones de Lorentz; sin embargo, tal principio y tales transformaciones son inexistentes en la formulación de los *Principia*, al igual que el uso mismo de coordenadas, que solo fueron introducidas por la mecánica analítica del siglo XVIII. Esta, por su parte, relaciona coordenadas espaciales y temporales a través de otro conjunto de transformaciones, las denominadas galileanas, que no son aplicables para la relatividad.

Después de esta presentación general, este análisis se centra, justamente, en las generalizaciones simbólicas o simbología matemática usada para expresar el mundo. Afirma Kuhn:

En las ciencias, particularmente en la física, las generalizaciones suelen encontrarse ya en forma simbólica: $f = ma$, $I = V/R$ o $\nabla^2\psi + \frac{8\pi^2m(E-V)\psi}{h^2}$ o $8\pi^2 m (E - V)\psi/h^2 = 0$. Otras se expresan en palabras: “la acción es igual a la reacción”, “la composición química está en proporciones fijas por peso”, o “Todas las células provienen de células”. Nadie negará que los miembros de una comunidad científica emplean por costumbre expresiones como éstas en su trabajo [...] sin un compromiso compartido respecto de un conjunto de generalizaciones simbólicas, la lógica y las metamatemáticas aplicarían rutinariamente en el trabajo de una comunidad (1993, p. 322).

Según lo anterior, la equivalencia matemática no sería un argumento a favor de la conservación léxica entre teorías, pues “sería posible hallar núcleos estructurales que fueran simbólicamente idénticos para las dos teorías, pero la identidad de las mismas sería sólo aparente. Es decir, las dos utilizarían teorías distintas del espacio-tiempo para especificar sus funciones teóricas” (Kuhn, 1977, p. 156). El autor también afirma que con las anomalías las leyes de una teoría son revisadas y modificadas para tratar de superarla, sin embargo, tras este escrutinio el científico puede hacer ecuaciones que parecen versiones examinadas, pero en realidad las nuevas secuencias de símbolos se conectan con el mundo de una manera muy diferente a las ecuaciones precedentes. En palabras de Kuhn:

Tras una revisión de este tipo —digamos la transición al vocabulario einsteniano— uno puede escribir secuencias de símbolos que parecen versiones revisadas de la segunda ley [de Newton] o de la ley de la gravedad. Pero la semejanza es engañosa, porque en las nuevas secuencias algunos símbolos se conectan a la naturaleza de un modo diferente del que los símbolos correspondientes lo hacían en las antiguas, diferenciando así situaciones que, en el vocabulario anterior, eran las mismas. Son los símbolos utilizados para términos cuya adquisición implicaba leyes que han cambiado de forma con el cambio de teoría: las diferencias entre las viejas leyes y las nuevas se reflejan en los términos adquiridos con ellas. Cada uno de los léxicos resultantes, entonces, da acceso a su propio conjunto de mundos posibles y los dos conjuntos son disjuntos. Las traducciones que involucran términos introducidos con las leyes alteradas son imposibles (2002, p. 95).

En la relatividad de Einstein, la generalización simbólica de la segunda ley de Newton ($f = ma$) (introducida en realidad por Euler) aunque se usará ya no representaría lo mismo que en la mecánica clásica, ya que la segunda ley de Newton, al igual que la mayoría de las generalizaciones simbólicas, es una solución estándar a problemas aprendidos por los estudiantes en su formación científica, en este sentido:

Esta expresión simbólica es, sin embargo, más un esquema de ley que una ley. Hay que volverla a escribir en una forma simbólica diferente para cada problema físico antes de que la deducción lógica y matemática se apliquen a ella. Para la caída libre se convierte en $mg = \frac{m d^2 z}{dt^2}$ para el péndulo es $mg \sin \theta = -ml \frac{d^2 \theta}{dt^2}$ para los pares de osciladores armónicos toma la forma de dos ecuaciones, la primera de las cuales se puede escribir así: $m^1 \frac{d^2 s_1}{dt^2} + k_1 s_1 = k_2 (d + s_2 - s_1)$; y así sucesivamente (**Kuhn**, 1977, p. 442).

En efecto, la segunda ley de Newton es un esquema flexible que permite el hallazgo de relaciones de similitud que dotan con una estructura al mundo o, en palabras de Kuhn, una “*gestalt* newtoniana”. La ecuación de la segunda ley se volvió el centro y el fundamento de la mecánica clásica, y, desde la perspectiva de la lógica, esta puede situarse en el núcleo de la teoría. Con la introducción de la mecánica relativista esta ecuación sufre cambios que modifican esa estructura del mundo newtoniana. Por ejemplo, a partir del principio de equivalencia —que afirma la igualdad entre la masa inerte y la masa gravitatoria— Einstein modifica la segunda ley del movimiento newtoniano para hacerla consistente con la idea de campo gravitatorio. Esta reformulación no solo descubre nuevas relaciones para el término masa, también redefine la noción de aceleración de un cuerpo. Según **Einstein**:

La ecuación de Newton del movimiento en un campo gravitatorio desarrollada completamente es: (Masa inerte). (Aceleración)= (Intensidad del campo gravitatorio). (Masa gravitatoria). Es evidente que sólo en el caso de ser numéricamente iguales las masas gravitatoria e inerte resulta la aceleración independiente de la naturaleza del cuerpo (1986, p. 114).

De ahí que en la relatividad la segunda ley de Newton sea sustituida por una ecuación de campo gravitatorio. Autores como **Popper** (1975) sostienen que ambas teorías poseen puntos en común, por ejemplo, la ecuación de Poisson, sin embargo, para Kuhn dicha ecuación no es newtoniana, sino que es introducida por la mecánica analítica del siglo XVIII. Sin embargo, como lo afirma **Einstein** (1983), esta ecuación tuvo que ser complementada para llegar a la ecuación general de campo, es decir, cuando se está en una condición de $v < c$ (velocidad inferior a la de la luz) la ecuación general de campo de la relatividad puede reducirse a la ecuación de Poisson usada en la mecánica clásica analítica. No obstante, la ecuación de Poisson es modificada conceptualmente en la taxonomía relativista, ya que “la estructura del campo gravitatorio difiere fundamentalmente de la que está de acuerdo con la teoría de Newton. La diferencia reside en el hecho de que el potencial gravitatorio no posee un carácter escalar sino tensorial” (**Einstein**, 1986, p. 151). Por ello, en la ecuación general de campo Einstein introduce tensores como el de Ricci (R_{mv}), el de energía (T_{mv}) o el métrico (G_{mv}), que son incompatibles con las ecuaciones de la mecánica clásica. Es cierto que la ecuación de Poisson sirve como modelo para la ecuación general del campo de la relatividad, pero, con las alteraciones introducidas en este, los referentes que se toman en ambas ecuaciones varían notablemente.

Podría afirmarse, por otra parte, que al compartir la constante de gravitación universal —escrita como $G = 6,67 \cdot 10^{-8}$ —, ambas teorías gozan de un aspecto conmensurable, no obstante, **Einstein** (1986) argumenta que con la introducción de esta constante la estructura de la gravedad descrita en la ecuación general de campo no es la misma que en la mecánica newtoniana, razón por la cual acuña una nueva constante que lleva su nombre y que se expresa como $G_E = \frac{8\pi G}{c^2}$, la cual relaciona el tensor de curvatura del campo gravitatorio y el tensor de energía provocado por la materia que genera al campo.

Así, aunque las ecuaciones de Einstein parezcan reformulaciones de las de Newton, estas ya no se relacionan de la misma manera con el mundo (**Kuhn**, 1977) y, en consecuencia, la relatividad no contendría matemáticamente la mecánica newtoniana. No obstante, Einstein cree que la teoría de la relatividad no modifica *grosso modo* las ecuaciones matemáticas usadas en la mecánica clásica y, en este sentido, la teoría de Newton podría estar contenida como aproximación matemática en la relatividad. Pero **Kuhn** (1977) considera esto como un argumento circular que se basa en el afán de ratificar

una traducibilidad completa, pues, aunque desde el punto de vista matemático las teorías se conserven, desde un punto de vista conceptual no son consistentes entre sí. El mismo **Einstein** sostiene que:

Desde el punto de vista cuantitativo [la relatividad] solo modifica la teoría de Newton en forma mínima, pero desde el punto de vista cualitativo, en cambio, la modificación es profunda. La inercia, la gravitación y el comportamiento métrico de los cuerpos y relojes fueron reducidos a una única cualidad del campo. Dicho campo, a su vez, fue reducido como dependiente de los cuerpos (1983, p. 68).

Por consiguiente, y en consonancia con la tesis de Kuhn, la teoría de la relatividad es inconmensurable con los términos básicos de la mecánica clásica, a pesar de que muchos como **Lakatos** (1975), **Popper** (1983), **Rivadulla** (2003) y el mismo **Einstein** (1986) sostengan que los términos compartidos por dos teorías sucesivas y separadas por una revolución científica son idénticos y, por lo tanto, no son inconmensurables. Por otra parte, **Kuhn** (1989) no ha negado la existencia de términos homónimos entre dos taxonomías, su punto es más bien considerar los términos intraducibles que no comparten las teorías separadas por una revolución científica.

Conclusión

La noción de inconmensurabilidad captó la atención de Kuhn en el campo de la filosofía de la ciencia y le granjeó muchas críticas por parte de sus contemporáneos. Sus detractores no estaban convencidos de una postura que consideraban irracional e introducía el relativismo en la comprensión de la ciencia hasta asemejarla a una empresa lejana a la lógica. Uno de sus mayores críticos, Popper, sostuvo una fuerte disputa con Kuhn sobre la racionalidad de la ciencia, aquel pensaba que las teorías, luego de falsadas, pueden servir como aproximaciones para las teorías que las reformulan y además contienen. Kuhn, por su parte, alegó que entre dos teorías separadas por una revolución científica no puede haber diálogo coherente, dado que los partidarios de ambas teorías hablan lenguajes distintos y ven el mundo desde visiones diferentes. La disputa entre ambos tuvo como eje el parangón entre la mecánica clásica (Newton) y la teoría de la relatividad (Einstein).

Pero uno de los críticos más acérrimos de Kuhn fue Imre Lakatos, quien también tildó su postura como irracional al considerar que la inexistencia de criterios lógicos hacía de un “cambio científico [...] una especie de cambio religioso” (**Lakatos**, 1975, p. 205), y sin causas racionales para las revoluciones científicas, estas solo podrían ser explicadas por la psicología de masas (**Lakatos**, 1975). Para Lakatos, dentro de una revolución científica una nueva teoría se caracteriza por poseer más contenido empírico y verificado que la anterior, predecir nuevos hechos, explicar los hechos de la teoría rival y añadir conocimiento corroborado. Según esto, las teorías anteriores no son inconmensurables con las nuevas e, incluso, se conservan hasta que haya una teoría más explicativa.

Otras críticas destacadas las recibió Kuhn de autores como **Philip Kitcher** (1993) y **Larry Laudan** (1977). Kitcher revive la imagen clásica de la ciencia, a la que llama *La Leyenda* y, que, a su juicio, tuvo nobles objetivos relacionados con la verdad. El trabajo de Kuhn, sostiene Kitcher, ha planteado muchas preguntas sobre la verdad en la ciencia hasta llegar a cuestionar la existencia de reglas lógicas de inferencia que respalden adecuadamente los hechos, de ahí que para Kuhn la racionalidad sea un producto de la capacidad de la historia de la ciencia de reescribirse. No obstante, para Kitcher no hay un buen sustituto para *La Leyenda*, razón por la cual es necesario justificar el progreso de la ciencia de forma realista. En su opinión, la idea del progreso de la ciencia apela a una imagen de la verdad como relación de representación semántica entre un enunciado y el mundo, es decir, tal enunciado será verdadero si representa adecuadamente el mundo. Es clara pues la oposición de Kitcher a la postura de Kuhn, para quien la ciencia no se desarrolla gracias a que las representaciones científicas del mundo se correspondan con este. Pero Kitcher insiste en que la teoría de la verdad como correspondencia está basada en la vida cotidiana y que esta justifica el comportamiento exitoso de las personas en muchos asuntos. Pero es claro, por

los múltiples ejemplos que Kuhn ofrece en una obra como *La estructura*, que cualquier descubrimiento científico, más que lograr un acercamiento a la realidad de manera absoluta, requiere y a la vez genera un cambio en la forma en que el científico percibe el mundo. Kitcher, como buen realista, sostiene que los descubrimientos científicos solo modifican el sistema cognitivo del hombre de ciencia gracias a sus constantes interacciones con la naturaleza, hasta lograr tener creencias que coinciden mejor con el mundo.

Por otra parte, Laudan dirige sus críticas a las ideas de revolución científica y de inconmensurabilidad. Según él, la revolución científica como fenómeno histórico ha sido un descubrimiento importante, pero Kuhn exagera el carácter significativo de los periodos revolucionarios. En cuanto a la inconmensurabilidad, cuestiona la hegemonía de un paradigma como Kuhn la presenta, en la medida en que, si se revisa con detalle, la historia muestra que pueden darse dos tradiciones de investigación en una misma área y, por lo tanto, no habría inconmensurabilidad. Con respecto a esto, **Laudan** (1977) señala que la mecánica newtoniana no gozó de aceptación, por el contrario, muchos filósofos y pensadores criticaron los fundamentos tanto metodológicos como ontológicos de esta teoría; algo similar habría ocurrido con la revolución lyelliana, dado que el trabajo de Charles Lyell fue altamente criticado en principio. Por esta razón Laudan arguye que es mejor no confiar en la división de la ciencia por periodos y sugiere reconceptualizar la noción de revolución científica como un acontecimiento que ocurre cuando un pequeño grupo de científicos, en un campo muy particular, abandonan una tradición de investigación y adoptan otra casi ignorada o desconocida, sin que entren en competencia.

Ahora bien, las críticas hechas a Kuhn señalan la necesidad de reflexionar en torno a la racionalidad científica, de alguna manera preservarla o pensarla como contingente (que sería el caso de Laudan). Pero en este sentido se destaca el carácter revolucionario que Kuhn atribuye a la actividad científica y que al mismo tiempo invita a repensar su racionalidad. Como se ha mostrado, para el caso de la mecánica clásica y la relatividad es más amplio el grupo de términos inconmensurables que la suma de términos homónimos (compartidos). Por ende, desde la postura kuhniana no sería posible reducir la mecánica de Newton a un caso límite de la relatividad. El resultado de la revolución einsteiniana sería la creación de un nuevo léxico que introduce una estructura nueva de mundo, la cual no es traducible a la estructura de mundo que subyace a la teoría newtoniana, razón de la falta de conservación de muchos de los términos, conceptos, categorías, simbologías matemáticas, perspectivas de mundo y relaciones lexicales entre teorías o con la naturaleza. No obstante, **Einstein** (1983; 1986; 1999) afirma que la teoría de la relatividad contiene la mecánica de Newton, incluso en sentido matemático, dado que las ecuaciones de la mecánica analítica clásica pueden ser derivadas a velocidades pequeñas comparadas con la de la luz y bajo fuerzas despreciables en campos gravitatorios mínimos. Sin embargo, **Kuhn** (2002) señala que ambas teorías son incompatibles y se excluyen, como mínimo, en sus estructuras conceptuales, y dado que las formalizaciones —o generalizaciones— simbólicas se interrelacionan con los referentes del mundo y con los términos o conceptos de una teoría, no es posible hacer una modificación conceptual sin que a su vez se modifique el significado que se representa en la generalización simbólica. De este modo, las ecuaciones de Einstein, que en apariencia son similares a las de Newton, realmente no pueden quedar contenidas en ellas, pues sus significados, referentes y relaciones ya no son los mismos.

Contribución de los autores

Los autores manifestamos que hemos contribuido mancomunadamente en la redacción, construcción, desarrollo y revisión de todas las partes que componen este manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran la inexistencia de conflicto de intereses con instituciones o asociaciones comerciales de cualquier índole.

Referencias

- Durán, C.** (1996). La evolución de la tesis de la inconmensurabilidad en la obra de Thomas S. Kuhn. *Revista de Filosofía y Política*. **31-32**: 418-428. www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/art_revistas/pr.2594/pr.2594.pdf
- Einstein, A.** (1983). Sobre la teoría de la relatividad y otras aportaciones científicas. Madrid: Sarpe. pp. 1-279.
- Einstein, A.** (1986). El significado de la relatividad. Bogotá: Planeta-De Agostini. pp. 1-192.
- Einstein, A.** (1999). Sobre la teoría de la relatividad general y especial. Madrid: Altaya. pp. 1-140.
- Gentile, N.** (1996). “Holismo semántico e inconmensurabilidad en el debate positivismo-antipositivismo”. En: *Crítica. Revista Hispanoamericana de Filosofía*. **28** (83): 75-95.
- Guicciardini, N.** (2007). La época del punto: El legado matemático de Newton en el siglo XVIII. *Estudios de Filosofía*. **35**: 67-109.
- Hacking, I.** (2013). “Ensayo preliminar”. En: *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de Cultura Económica, pp. 9-51.
- Hacyan, S.** (2014). Los hoyos negros y la curvatura del espacio-tiempo. México: Fondo de Cultura Económica. pp. 1-130.
- Kitcher, P.** (1993). *The Advancement of Science. Science without legend, objectivity without illusions*. New York: Oxford University Press. pp. 1- 432.
- Kuhn, T. S.** (1977). Cambio de teoría como cambio de estructura: comentarios sobre el formalismo de Sneed. *Teorema*. **7** (2): 141-166. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2045975>
- Kuhn, T. S.** (1989) ¿Qué son las revoluciones científicas? y otros ensayos. Barcelona: Paidós. pp. 9-151.
- Kuhn, T. S.** (1993). *La Tensión Esencial*. México: Fondo de Cultura Económica. pp. 1-381.
- Kuhn, T. S.** (2002). *El camino desde la Estructura*. Barcelona, España: Paidós.
- Kuhn, T. S.** (2013). *La Estructura de las Revoluciones Científicas*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Lakatos, I.** (1975). La falsación y la metodología de los programas de investigación científica. En I. Lakatos, & A. Musgrave (Eds), *La crítica y el desarrollo del conocimiento* (pp. 203-343). Barcelona: Grijalbo S.A.
- Lorenzano, P. & Nudler O.** (eds). (2012). *El camino desde Kuhn: La inconmensurabilidad hoy*. Madrid: Biblioteca Nueva.
- Lovett-Cline, B.** (1980). Los creadores de la nueva física. México: Fondo de Cultura Económica. pp. 1-344.
- Laudan, L.** (1977). *Progress and its Problems. Towards a theory of scientific growth*. Berkeley: University of California Press.
- Maudlin, T.** (2014). *Filosofía de la física*. México: Fondo de Cultura Económica. pp. 1-282.
- Moulines, C. U.** (2011). *El desarrollo moderno de la filosofía de la ciencia*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 1-186.
- Newton, I.** (2011). *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Madrid: Alianza Editorial. pp. 8-728.
- Poggi-Valardo, H. M., Bátiz y Sólorzano, M. E., Pineda-Cruz, J. A., Caffarel-Méndez, S.** (2006). Cuaderno de tecnología Núm. 5 *Mecánica Clásica*. México: Tecnológico de estudios superiores ECATEPEC. pp. 1-102.
- Popper, K. R.** (1975). La ciencia normal y sus peligros. En I. Lakatos, & A. Musgrave (Eds), *La crítica y el desarrollo del conocimiento* (pp. 149-157). Barcelona: Grijalbo.
- Popper, K. R.** (1983). La racionalidad de las revoluciones científicas. *Teorema*. **13** (1-2): 109-140.
- Rivadulla, A.** (2003). Inconmensurabilidad y relatividad. Una revisión de la tesis de Thomas Kuhn. *Revista de Filosofía*. **28** (2): 237-259.
- Rivadulla, A.** (2012). La tesis de la inconmensurabilidad y el desarrollo de la física. En P. Lorenzano & O. Nudler (eds.), *El camino desde Kuhn: La inconmensurabilidad hoy* (pp. 383-398). Madrid: Biblioteca Nueva.
- Romero, Á. E.** (2007). La búsqueda de los principios fundamentales de la mecánica: Euler y d’Alembert. *Praxis Filosófica*. **24**: 21-43.

Ciencias del Comportamiento

Ensayo

Francisco José de Caldas: ¿avatar de Humboldt? Reflexiones en torno a cinco cartas anónimas publicadas en el *Diario Político de Santafé de Bogotá* en 1810

Francisco José de Caldas: Humboldt's avatar? Reflections on five anonymous letters published in the *Diario Político de Santafé de Bogotá* in 1810

Alberto Gómez-Gutiérrez¹, José Gregorio Portilla^{2,*}

¹ Instituto de Genética Humana, Facultad de Medicina, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

² Observatorio Astronómico Nacional, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia

Resumen

Las cinco cartas redactadas por un viajero europeo anónimo que habría recorrido el virreinato de la Nueva Granada en los años 1803 y 1804, y que fueron luego publicadas en el *Diario Político de Santafé de Bogotá* en el curso del segundo semestre de 1810, proporcionan información valiosa sobre diversos aspectos de la vida colonial en Santafé y sus alrededores. Estas cartas permiten poner en evidencia ciertas inconsistencias y anacronismos que revelan la intención fundamental de publicitar una situación favorable para los habitantes de Santafé de Bogotá tras los sucesos que iniciaron el interregno previo a su independencia de la corona española. La identidad del autor de estas cinco cartas se aproxima excesivamente a la Alexander von Humboldt, quien había circulado por los mismos lugares dos años y medio antes, en 1801. En ausencia de un registro histórico que permita sustentar el paso del viajero anónimo identificado solo con las iniciales "L. R.", se sugiere que este hipotético europeo pudo ser, en realidad, una invención de uno de los editores neogranadinos de este diario, probablemente Francisco José de Caldas.

Palabras Clave: Francisco José de Caldas; Alexander von Humboldt; Diario Político de Santafé de Bogotá; Siglo XIX; Nueva Granada.

Abstract

Five letters written by an anonymous European who appear to have travelled through the viceroyalty of New Granada between 1803 and 1804, and then published in the *Diario Político de Santafé de Bogotá* in 1810, provide valuable information on various aspects of the colonial life in Santafé and its surroundings. These letters include several inconsistencies and anachronisms and reveal an evident intention to support a favorable situation of Santafé de Bogotá after the events that opened an interregnum that preceded its independence from the Spanish crown. The identity of the author of these five letters is excessively similar to that of Alexander von Humboldt, who had circulated through the same regions two and a half years earlier, in 1801. In the absence of any historical record supporting visits to these regions by the anonymous traveler, who identifies himself solely with the initials "L. R.", we suggest that this hypothetical European was invented by one of the Neo-Granadian editors of this journal, most probably by Francisco José de Caldas.

Key words: Francisco José de Caldas; Alexander von Humboldt; Diario Político de Santafé de Bogotá; 19th century; New Granada.

Citación: Gómez-Gutiérrez A, Portilla JG. Francisco José de Caldas: ¿avatar de Humboldt? Reflexiones en torno a cinco cartas anónimas publicadas en el *Diario Político de Santafé de Bogotá* en 1810. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):387-404, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1449>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

José Gregorio Portilla Barbosa;
jgportillab@unal.edu.co

Recibido: 7 de abril de 2021

Aceptado: 18 de mayo de 2021

Publicado: 17 de junio de 2021



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

Introducción

La Constitución Feliz, el *Aviso al Público* y el *Diario Político de Santafé de Bogotá (DPSB)*, fueron publicaciones de carácter semioficial surgidas pocas semanas después de la asonada del 20 de julio de 1810. Su propósito era el de servir de órganos de difusión

de la Junta Suprema del Nuevo Reino de Granada, esto es, del nuevo gobierno que se venía de instaurar. La primera de estas gacetas apareció el 17 de agosto de 1810, bajo la responsabilidad del fundador del periodismo neogranadino, Manuel del Socorro Rodríguez (1758-1819). Esta publicación solo llegó a tener una entrega (**Martínez Delgado & Ortiz, 1960; Rojas, 2013**), y se ha sugerido que se suspendió por carecer del suficiente fervor patriótico que los tiempos exigían. El *Aviso al Público*, por su parte, estuvo activo entre el 29 de septiembre de 1810 y el 16 de febrero de 1811, llegó a tener 21 números, y su edición y la casi totalidad de su financiación estuvo a cargo de fray Diego Francisco Padilla (1751-1829), sacerdote agustino cuya presencia en la Junta Suprema en calidad de vocal reflejaba su marcado interés por los asuntos políticos (**Campos y Fernández de Sevilla, 2011**). Finalmente, el *DPSB* operó entre el 27 de agosto de 1810 y el 1 de febrero de 1811; emitió 46 números (6 de ellos con suplemento) y tuvo por editores a José Joaquín Camacho (1766-1816) –también vocal de la Junta Suprema– y a Francisco José de Caldas (1768-1816), ambos abogados rosaristas y participantes activos en el levantamiento criollo que condujo finalmente a la deposición del virrey Antonio José Amar y Borbón (1742-1826). Caldas, en particular, fue un naturalista validado por Alexander von Humboldt (1769-1859) y contaba ya con una sólida experiencia con la pluma a través de la edición del *Semanario del Nuevo Reyno de Granada (SNRG)*, la primera publicación de clara índole científica y cultural del virreinato. Así, el periodista esencialmente científico daba ahora espacio al periodista político amateur.

El propósito fundamental y explícito del *DPSB* era la “propaganda política y la publicación de los actos de gobierno” (**Martínez Delgado & Ortiz, [1960] 2018**). De esta manera, era evidente su intención de inflamar el espíritu patriótico en la población, y orientar y concientizar a los criollos ante el nuevo panorama social, político y económico que imponían las circunstancias. Si bien en un inicio, y por más de la mitad de los números, operó como memoria histórica de los eventos que se desarrollaron a finales del mes de julio y de agosto en Santafé –solo interrumpida brevemente por la narración de eventos violentos ocurridos el 2 de agosto en Quito–, el *DPSB* registra un número alto de noticias de sucesos ocurridos en otras poblaciones del virreinato (tales como conformaciones de Juntas), de otros virreinos (Nueva España, Río de la Plata) o de la misma península ibérica, algunos relatando acontecimientos de naturaleza bélica. De igual forma, son numerosos los registros de bandos, arengas, proclamas y actas, así como avisos al público de diversa índole, resultados de juicios y nombramientos en cargos civiles y militares. En algunos números aparecen “lecciones” o “principios” de naturaleza cívica, moral, política y económica que, a juicio de sus autores, debían caracterizar a un ciudadano o a una nación para poder prosperar.

El *DPSB* incluye también un número no despreciable de cartas emanadas como resultado de un pronunciamiento de una Junta en particular, o como comunicación entre notables figuras políticas y religiosas. En algunos casos se reproducen cartas tomadas de otros periódicos (como por ejemplo la *Gaceta de Caracas*). En la gran mayoría de esas cartas se identifica claramente al autor aun cuando hay varias de ellas en las que la identificación del redactor es desconocida, sin pasar de ser un anónimo común y corriente. Sin embargo, al menos en el caso que se comentará a continuación, la identidad del autor anónimo no es común, ni corriente: es problemática. El primer tipo de anonimato lo constituye, por ejemplo, una “relación anónima” que apareció en los números 7 y 8, dirigida al virrey Amar y Borbón, en la que se relatan algunos hechos violentos acaecidos en Quito. El segundo tipo de anonimato, que constituye el motivo de la presente reflexión, corresponde a cinco cartas del viajero L. R. (sic) redactadas en Santafé de Bogotá o sus alrededores, entre el 3 de diciembre de 1803 y el 19 de febrero de 1804. Estas fueron publicadas por entregas a lo largo de seis números del *DPSB* en 1810 (**Tabla 1**). Las cartas son relevantes por su naturaleza cultural y científica, y denotan una clara pericia intelectual de parte de su autor. No obstante, son varias las razones para sostener que la identidad del redactor de dichas cartas es incierta, más allá de solo haber sido firmadas con un “L. R.”; la primera de ellas es que la visita de este eventual viajero y su misterioso acompañante,

Tabla 1. Cartas del viajero L. R. publicadas en el *Diario Político de Santafé de Bogotá*

Carta	Fecha	No. del DPSB	Fecha de publicación
1	03 de diciembre de 1803	16	16 de octubre de 1810
2	19 de diciembre de 1803	17	19 de octubre de 1810
3	03 de enero de 1804	18	23 de octubre de 1810
3 (cont.)	03 de enero de 1804	19	26 de octubre de 1810
4	08 de febrero de 1804	21	2 de noviembre de 1810
5	19 de febrero de 1804	27	27 de noviembre de 1810

ambos aparentemente europeos, solo dispone, hasta la fecha, de su registro en el *DPSB*. La evidente autoridad de Caldas y Camacho en su función editorial podría explicar esta aceptación (o desatención) histórica, dado que, desde finales del siglo XIX, ningún historiador ha puesto en tela de juicio la identidad o, incluso, la existencia de esta dupla de viajeros en el Nuevo Reino de Granada (Ibañez, [1893] 1951; Tisnés, 1956; Martínez Delgado & Ortiz, 1960; Hernández de Alba & Carrasquilla, 1977; Del Molino, 2017).

De modo que la motivación de nuestro análisis (y de nuestra hipótesis resultante) consiste en exponer los argumentos por los cuales consideramos discutible la identidad del autor de esas misivas. En consecuencia, buscamos ofrecer razonamientos que permitan identificar al verdadero redactor de estas cartas que consideraremos, operativamente, como pseudo-anónimas, transcribiendo su contenido integral anotado, antes de plantear las razones por las cuales se pone en duda la existencia del viajero L. R., así como los elementos que nos permiten sugerir la identidad de su verdadero autor.

Las cinco cartas de L. R.

Tal y como se mencionó en la introducción, los documentos de estudio son un total de 5 cartas atribuidas a un viajero venido de Europa, cuya identidad solo se conoce por las letras L. R. (presumiblemente las iniciales de su nombre y apellido), quien habría circulado por Santafé y sus alrededores entre los meses de noviembre de 1803 y, al menos, febrero de 1804. En la **tabla 1** se inscribe el número de cada carta enfrentado a la fecha de su redacción, al número correspondiente del *Diario Político de Santafé de Bogotá* en el que fue publicada y a la fecha de su publicación.

A continuación se transcriben las cinco cartas referidas en las que se ha actualizado la ortografía de cada texto, con excepción de algunos términos significativos que se califican con un (sic) inmediato, así como del título que le fue asignado en cada número del *DPSB* como “Cartas del Viagero L. R.”, en el que el término “Viagero” aparece a veces con tilde en la e.

Carta n.º 1

Hemos creído oportuno dar a luz las siguientes *Cartas del Viagero L. R.* por darse a conocer en ellas las ventajas que reúne la Capital de Santafé.

Santafé de Bogotá, 3 de diciembre 1803

Mi amigo,

El día 20 del mes anterior entramos en la llanura de Santafé. No te puedo ponderar la sensación que me causó un golpe tan hermoso, después de haber atravesado las malezas del río Magdalena, y el resto de mal camino por tierra desde Honda hasta Facatativá, de que te hablé en mi carta anterior.¹ Desde este último sitio se muda la escena, y de repente se presenta a la vista un plano inmenso, rodeado de montañas, que forman el más bello anfiteatro.

¹Esta carta no se conoce.

Multitud de pueblos sembrados por toda esta llanura, hacen grupos vistosos, que varían agradablemente la plataforma; en la que también se registran casas de campo bien situadas, algunas de regular construcción, manteniéndose por todas partes rebaños numerosos. A uno y a otro lado del camino se ven tropas de caballos, que retozan alegremente; se oyen los mugidos de las vacas y balar las ovejas; el viajero cree verse transportado a las llanuras de Egipto, de que nos han dejado tan bellas descripciones los antiguos. Tiene esta explanada 16 leguas de largo y cerca de 7 de ancho, no conociéndose a la vista su inclinación que se aumenta hacia el Norte. La atraviesa el río de Bogotá, que después de haber fecundado las tierras por donde pasa con inundaciones periódicas, va a precipitarse en Tequendama, donde forma la más alta y bella cascada del mundo, cuya caída según varias medidas que se han hecho es de más de 300 varas (sic)² castellanas.

La fecundidad de estos campos es maravillosa; se cubren dos veces al año de sementeras, que contribuyen para el sustento y regalo de sus moradores. Pocas cosas echan aquí [de] menos los europeos. Vegetan perfectamente las plantas de las zonas templadas; el trigo, las coles, las lechugas, cardos, alcachofas, y demás hortalizas; manzanos, duraznos, cerezos, ciruelos, etc. Todo esto encanta, después de un tan largo y molesto camino en que no se ven sino plantas del trópico. Los prados naturales mantienen casi todo el año su verdor; abundan el poleo, salvas, y otras plantas olorosas; y están matizados los campos con ranúnculos y otras muchas flores de hermoso olor, entre las que sobresale una especie *Hipochaeris*,³ que en el país llaman chicoria, cuyas flores amarillas, esparcidas por el campo, forman un cielo verde con estrellas de oro. ¿No te acuerdas haber leído en los Mundos de Fontenelle⁴ la pintura de este cielo que tenemos aquí a nuestros pies?

La capital se alcanza a ver desde muy lejos. En sus cercanías se ha construido una larga calzada de piedra para facilitar los transportes, que sin este beneficio serían muy difíciles por la inundación de los campos en tiempo de aguas. Esta calzada o camellón sirve también para los paseos de a caballo, y si se continuase por todo el llano sería comparable a las vías romanas.

Santafé está fundada al pie de dos grandes cerros que vierten aguas cristalinas y abundantes, que corren por todas las calles y conducen a la limpieza de la ciudad, que no se halla muy bien atendida, a pesar de estas grandes proporciones, y de dos ríos que corren por medio de ella, y que bajo otro gobierno podrían contribuir más al placer y a la salubridad. Casi todas las calles son derechas. Los empedrados se hallan en muy mal estado sin embargo que abundan los alrededores de piedra pequeña y sin ángulos, la más a propósito para los pavimentos. También se saca de las entrañas de los cerros y escarpes de los ríos un excelente gres, que sirve para los enlozados que se van construyendo en el glacis de las casas.

La población constará de 35.000. Los ciudadanos están dotados de genio, y se observa, en casi todos, un deseo insaciable de saber. A mi compañero y a mí nos rodean continuamente, queriendo imponerse de todo, de suerte que, si nos estableciésemos en este lugar, dentro de poco tiempo tendríamos tantos discípulos como se dice haber tenido Mr. Cujas.⁵ Me lisonjeo que les enseñaríamos cosas menos desagradables y más útiles que las que enseñaba aquel viejo jurisconsulto. Hay hombres bastante instruidos, reina, en todos, un gusto delicado, expresión fina, y si hubiera cultivo podría ser esto un París. Pero el Gobierno favorece poco las ciencias, y mucho menos las artes, que perjudicarían al sistema colonial.

Se nos han hecho muchos obsequios, y desde nuestra llegada apenas he tenido este corto rato para escribirte precipitadamente. Después te daré razón más extensa de todo lo que me ocurra, y dispensarás por ahora la brevedad con que te saluda tu afectísimo amigo.

² Caldas había reportado 219 varas y Humboldt 220 varas castellanas para esta cascada. Véase: Mantilla, Ochoa y Martínez (2016).

³ Se refiere al género *Hypochoeris*, planta asterácea originaria de Europa e introducida América, cuya especie *H. radicata* se conoce como achicoria o diente de león.

⁴ La obra *Conversations acerca de la pluralidad de los mundos* traducida al español del original *Entretiens sur la pluralité des mondes* (1686) del escritor francés Bernard Le Bouyer de Fontenelle (1657-1757) intentó socializar el modelo heliocéntrico propuesto por Nicolás Copérnico (1473-1543) y defendido frente a la Inquisición por Galileo Galilei (1564-1642).

⁵ Jacques Cujas (1522-1590), jurisconsulto francés del siglo XVI, referente del humanismo jurídico y autor de varias obras compiladas en 1722 bajo el título de *Opera Omnia* en 10 tomos.

Carta n.º 2

Carta segunda escrita por el Viagéro L. R.

Santafé de Bogotá, diciembre 19 de 1803

Mi pensado amigo,

Como hace algunos días que habito este país, te puedo ya hablar de su temperamento, con que me he familiarizado. Su invariabilidad contribuye a que los extranjeros nos acos-tumbremos fácilmente a la impresión. Si tornamos las cosas en grande, esta temperatura equivale a la de París, porque sumando los grados de calor que se sufren aquí en el espacio de un año con indicaciones uniformes, son casi iguales a los que allá se experimentan en variaciones estacionales.

En Santafé el termómetro por lo regular señala 12 a 14 grados. Te confieso que esta uniformidad es ventajosa para las gentes de letras, porque el espíritu puede permanecer aquí en una acción casi continua, sin que ni el demasiado calor ni el excesivo frío impidan el uso de las potencias. Si las ciencias llegasen a emigrar a la América, como algunos han pronosticado, establecerían aquí su imperio. Tal vez los sucesos actuales de Europa preparan esta revolución. Yo me alegraría [de] que los hados fuesen en adelante menos injustos con esta bella porción del Universo, y que se aprovecharen las disposiciones que no puedo menos que admirar en estos hijos de la naturaleza, que lejos de recibir algún fomento, tiene que luchar continuamente contra un gobierno que trabaja incesantemente en su degradación.

Por un aborto (sic) extraordinario se ha construido casi en el centro de la ciudad un bello Observatorio, que será el segundo que se levanta en el Nuevo Mundo, después del que se conoce en Filadelfia.⁶ Llegará el día en que los Herschels,⁷ la Land (sic),⁸ y otros excelentes Astrónomos ocupen este edificio, que hará siempre honor al célebre Mutis, que lo ha construido. Está proveído de buenos instrumentos; un cuarto de círculo, sextantes, teodolitos, telescopios, el péndulo de Graham, que trajeron a Quito nuestros académicos en el año de 1735, y otras máquinas que jamás soñé hallar en estas distantes regiones. El pasaje de Venus por el disco del Sol, para que nos han citado los astrónomos, será observado desde este punto.⁹ No carece esta capital de hombres capaces de hacer esta delicada observación, y de corresponderse con los observadores europeos. La astronomía no puede menos que hacer grandes progresos en un país donde se registran ambos hemisferios. Está sin duda reservado a los sabios de América darnos una descripción completa de las constelaciones australes.

Otro *Viagéro* os diría muchas cosas de las Iglesias, conventos, hospicios, etc., pero yo debo pasar todo esto en blanco, hablando con un hombre que debe haber calculado el estado de estos establecimientos bajo la mano española que los dirige. No quiero cansarte más, y voy a despedirme para un paseo a que se me ha convidado, y a que seguiremos el día de mañana. Voy gustoso porque todo es camino llano, y no hay asperezas que vencer, lo que es muy raro en los países ecuatoriales. A poca costa se podrían poner aquí caminos que se anduviesen en coche para comunicarse entre sí todos los lugares de la explanada. Adiós: después te daré razón de mi viaje.

⁶ Del Observatorio de Filadelfia habla el autor de las *Cartas del Cultivador Americano* [Nota a pie de página en el original]. Para mayor información sobre el desarrollo de la astronomía en Filadelfia, véase Bell (1964), en: <https://www.jstor.org/stable/985991?seq=1>. La obra citada podría corresponder a las *Letters from an American farmer. Describing certain provincial situations, manners, and customs, not generally known; and conveying some idea of the late and present interior circumstances of the British colonies of North America*, es decir, John Hector St John, quien había nacido en Normandía con el nombre de Michel Guillaume Jean de Crèvecoeur (1735-1813), obra publicada en Londres en 1782. Véase: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=aeu.ark:/13960/t0gt5z84d&view=1up&seq=6>.

⁷ Se refiere, probablemente en plural mayestático, a William Herschel (1738-1822), músico y astrónomo británico, descubridor del planeta Urano. Su hijo, John Herschel (1792-1871), fundador y presidente de la Royal Astronomical Society, solo figuró a partir de la segunda década del siglo XIX.

⁸ Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande (1732-1807), astrónomo francés, autor de la obra en 4 volúmenes titulada *Traité d'astronomie* (1771-1781).

⁹ Este es un comentario curioso, ya que para la fecha se habían sucedido dos tránsitos de Venus: en 1761 y 1769. Los siguientes se esperaban para 1874 y 1882.

Carta n.º 3

Carta tercera escrita por el Viagéro L. R.

Zipaquirá, enero 3 de 1804

Amigo,

Rodeado como estoy de los ilustres ciudadanos de Santafé que me han acompañado a este sitio, y que me honran con su amistad, no puedo escribirte con la extensión que quisiera sobre lo físico de estos países. Nos hallamos en Zipaquirá, uno de los puntos más interesantes del reino. Este lugar está situado 5 leguas al Norte de la capital, su población será de 4000 almas, su elevación sobre el mar 1440 toesas. Con las sales que se fabrican en este sitio y en los pueblos vecinos de Tausa y Enemoción (sic), se proveen casi todas las provincias interiores de la Nueva Granada. La riqueza de estas minas es muy considerable, produciendo la sal gema 92 centésimos de sal cocida o consumptible (sic). El total de las sales que se fabrican annualmente (sic) en dichos tres laboratorios pasa de 200.000 arrobas. Su producto líquido, que asciende a más de 50.000 pesos, está consagrado a los hospicios, vecinos, blancos, indios y el resto para, el tesoro real.

Hace dos semanas que estamos aquí y en este espacio he hecho varias visitas al pie de la montaña donde están las oficinas del rey. Todo se ejecuta del modo más dispendioso. En lugar de hacer galerías subterráneas, y manantiales artificiales que subsistan perennemente, se hacen cortes abiertos, que se multiplican todos los días, cubriendo con los escombros los sitios donde después se deben hacer nuevas explotaciones. Esta economía la aprendieron los españoles de los indios bárbaros, que trabajaban estos minerales mucho tiempo antes de la conquista.

La sal gema se encuentra en muchos parajes bajo una capa de yeso que aumenta la riqueza del país, transportándose este mineral a Santafé donde se emplea en obras de arquitectura. Los vasos coctorios (sic) de la sal se hacen de barro y se rompen pasada la operación. En las tres técnicas referidas, se consumen annualmente (sic) 37.000 cascos que importan 4000 pesos. En Tirol y otros establecimientos de Alemania, se cocinan en una sola caldera de plomo las 200.000 arrobas de sal, que se fabrican en dichos tres lugares. Los Indios de Tocancipá y Gachancipá se aprovechan de este desperdicio, construyendo éstas ollas de cocción de una excelente arcilla, que abunda en sus territorios.

La leña que se destruye en dichos establecimientos es infinita. En Zipaquirá solo se queman todos los años 1.600.000 pies cúbicos de leña, que importan a 25.000 pesos.¹⁰ Esta enorme pérdida de combustible proviene de la multitud de vasos coctorios, mala construcción de hornos, y de la poca concentración de las aguas saladas que se evaporan, y que se prohíben enriquecer con la sal gema en los trabajos de Enemoción. Si estos establecimientos se pusieran en pie regular de economía, producirían riquezas inmensas al Estado. El Barón de Humboldt, que visitó estas salinas en 1801, escribió una excelente *Memoria*, en que prescriben reglas para dirigir la evaporación de las sales. Hasta ahora no se han sabido aprovechar los trabajos de este grande hombre. El gobierno debe interesarse en adelantar y perfeccionar la explotación y fábrica de este ramo de industria, que hace uno de los fondos principales del erario, y que liga las provincias a la capital. El consumo de la sal debe ir en aumento al paso que se adelante la población, debiéndose cuidar de la conservación de estos minerales preciosos, que se destruirán si no se establecen las fuentes artificiales, como se han destruido en Europa otros minerales de igual riqueza.

Carta n.º 3 (continuación)

Continuación de la tercera carta del Viagero L. R.

Se encuentra la sal gema en otros puntos hacia la parte septentrional del reino, como es en San Juan de Sesquilé, en Chámesa de los Llanos de Casanare, en Pinsayma¹¹ cerca de

¹⁰ Estas cifras coinciden exactamente con lo reportado por Humboldt en 1801. Para consultar la versión integral comentada de la Memoria del prusiano, véase Gómez Gutiérrez (2018, II, 39-61)

¹¹ Esta localidad queda a mitad de camino entre Zipaquirá y Honda en línea recta, cerca de la población de Nocaima en el departamento de Cundinamarca.

Honda, en Chita jurisdicción de Tunja, en San Andrés de la Provincia de Pamplona, en cuyos parajes no se hacen extracciones considerables a excepción de Chita y Chámesa, cuyas salinas se trabajan por cuenta del Rey.

El ramo de las sales en Zipaquirá y lugares inmediatos bien dirigido podría producir al erario una renta de más de cien mil pesos, no pudiéndose pasar las gentes sin este objeto de primera necesidad, cuya falta se suple en algunos países del reino con la ceniza de ciertas plantas, que se emplea para condimentar los alimentos, lo que observé en algunos pueblos del Orinoco, y se dice acontecer lo mismo con la provincia de Antioquia. En las naciones civilizadas de Europa perjudica al consumo de la sal el uso del azúcar que se emplea en los alimentos en lugar de aquella, siendo más agradable al gusto; pero tal vez menos provechosa a la salud por su glutinosidad; es verdad que el azúcar sería mucho más costoso si se emplease en lugar de la sal, a la que solo se podría sustituir para halagar el gusto. En estos lugares se gasta mucha profusión en los dulces, y te admirarías si te hallaras presente en los espléndidos convites con que se nos obsequia y en que hemos visto muchas composiciones gastronómicas que lograrían aprecio en la culta Europa.

Yo soy ingenuo, y como ya te he dicho en otras cartas, no puedo menos que confesar las grandes ventajas que aquí se gozan, y que quisiera dividir contigo. A lo menos te libertarías del fracaso de la guerra que turba ese emisferio (sic). Aquí reina una paz profunda, y las noticias de Europa circulan entre muy pocos. Creo que por estas bellas circunstancias viviría contento en este país ameno; pero la mitad de mi ser está lejos de mí, y no puedo vivir gustoso sin mi caro amigo por quien suspiro todos los momentos.

Carta n.º 4

Carta cuarta del Viajero L. R.

Santafé de Bogotá, febrero 8 de 1804

Mi suspirado amigo,

Cada día descubro nuevas riquezas en este país. Después de mi viaje a Zipaquirá he corrido toda esta gran llanura, haciendo excavaciones, y examinando sus preciosidades. El antiguo valle de Funzha, hoy Bogotá, se halla excavado en una formación secundaria, compuesta de tres lechos o capas minerales que encierran materiales útiles a los usos de la vida humana. Sobre las rocas primitivas de granito, que constituyen el núcleo de esta gran cordillera, se halla colocado el gres, de que te he hablado en mis cartas anteriores, y sirve para los edificios, no siendo otra cosa esta piedra sino un conjunto de granos cuarzosos, cimentados por la arcilla.

El gres se descubre en las montañas que rodean la explanada, y de su destrucción y aluvie (sic) se ha formado la capa de tierra vegetal que cubre toda esta llanura. En el gres se halla sobrepuesto el yeso, que se descubre y abunda en Tunjuelo, Usme, Zipaquirá, Chegua, y sobre todo al Nordeste del cerro de Tunjos cerca de Cucunubá, a una altura muy considerable. Al yeso sigue la piedra calcárea que sirve también para la arquitectura y se beneficia cerca de Monserrate y Usaquén, no encontrándose en aquellos sitios las conchas petrificadas que acompañan esta formación cerca de Tocayma y Melgar.¹²

[El gres contiene] camas de arcilla en algunos parajes muy bellos como son los que se encuentran en Gachancipá, Tocancipá, Chaleche, y entre Zipaquirá y Cogua. A esta formación de gres acompaña la mina de hierro oscuro (óxido de hierro amarillo) que no se explota en estos lugares, que mendigan de fuera un metal tan necesario para la agricultura, comprando a precios muy subidos el que se trae de Vizcaya, siendo abundante en Monserrate, cerca de Guatavita, Tequendama, y en otros muchos sitios del reino. También se halla con el gres el carbón de piedra que solo usan los herreros, no conociéndose

¹² Esta ruta fue también recorrida por Humboldt y Bonpland a su paso de Bogotá a Popayán, antes de encontrarse con Caldas al norte de Ibarra y cerca de la actual frontera entre Colombia y Ecuador. Para mayor información sobre el paso de estos viajeros por el Nuevo Reino de Granada, véase Gómez Gutiérrez (2018).

aun el precio de este fósil en unos países tan abundantes de leñas. Se encuentra este carbón al sudeste de Canoas, cerca de Chipa, en la montaña aislada de Suba, junto al cerro de Tunjos.¹³

En el yeso se halla subordinada la capa de sal gema, que se encuentra inmediatamente bajo de aquel en las minas de Rute,¹⁴ de modo que no se puede dudar sobre la situación de este producto precioso.

Te he hablado demasiado de las abandonadas riquezas de que la naturaleza ha proveído estos lugares, que puede ser florezcan algún día, para lo que se necesitan todas las fuerzas de la opinión, hallándose estas gentes acostumbradas de largo tiempo a depender de la Europa, no necesitando sino de sus propios recursos para ser poderosos; pero la suerte de la América ha sido ser presa infeliz de los conquistadores europeos, que han establecido el despotismo en esta parte del globo. Cuando leas mis *Diarios* hallarás pormenores más interesantes sobre la política española con sus colonias,¹⁵ y mientras tanto sabe que te piensa tu verdadero amigo.

Carta n.º 5

Carta quinta del Viajero L. R.

Santafé de Bogotá, febrero 19 de 1804

Mr.,

Las riquezas literarias de Santafé exceden a lo que se podía esperar de un país tan distante del centro de luces, y cuya constitución política se opone, como ya os he dicho, a los adelantamientos científicos. La biblioteca pública constará de más de veinte mil volúmenes, entre los cuales se encuentran muchas obras preciosas de la antigüedad. Los extinguidos jesuitas hicieron este admirable acopio, que los hace dignos del elogio del célebre Montesquieu,¹⁶ que hablando de estos misioneros dice que unían a la voz del *Evangelio* las artes que contribuyen a la felicidad temporal de los hombres.

El botánico Mutis merece la opinión en que es tenido entre los sabios de Europa. No se le puede acusar sino de ser algo misterioso, y poco accesible a los jóvenes del país, que quisieran tomar lecciones de tan gran maestro. Sin embargo, es preciso confesar que él fue el primero que comenzó, por decirlo así, a descuajar el terreno para plantar el árbol de las ciencias, que parece va a florecer en estas regiones. Mutis posee una gran librería donde se hallan las obras de los mejores naturalistas. El sabio Humboldt decía que esta colección era comparable a la de Mr. Banks,¹⁷ presidente de la Sociedad Real de Londres. Ha puesto Mutis en su casa escuela de dibujo, en que se enseña *gratis*¹⁸ a los jóvenes de la ciudad. Trabaja en la flora de Bogotá, para la que ha acopiado inmensos materiales.¹⁹ Su herbario se compone de más de veinte mil plantas, bastante bien conservadas. Se han ejecutado ya dos mil láminas para la Flora con una perfección inimitable.

En las religiones,²⁰ colegios, y aun en muchas casas particulares, hay también librerías copiosas, que no se encuentran en muchos lugares cultos de Europa.

¹³ Todos los lugares mencionados en este párrafo fueron visitados por Humboldt en 1801.

¹⁴ Así se llamaba la principal mina de sal en Zipaquirá. Por demás, Humboldt hizo el mismo comentario en sus diarios (Humboldt, [1799-1801] 1982, 60,a).

¹⁵ El evidente interés que Humboldt habría mostrado a sus contortulios a su paso por la Nueva Granada, y las notas manuscritas que Caldas tuvo la oportunidad de revisar en su convivencia con el prusiano en Quito, permiten postular que el payanés se enteró de primera mano de este tipo de inclinación crítica que resultaría en al menos dos obras independientes tituladas *Essai politique sur le royaume de Nouvelle-Espagne* (1811) y *Essai politique sur l'île de Cuba* (1826).

¹⁶ Charles Louis de Secondat, barón de Montesquieu (1689-1755), filósofo y ensayista francés autor de varias obras, incluyendo *De l'esprit des lois* (1748) con la que se enfrentó a los jesuitas, y a cuyos ataques contestó en una obra sucesiva titulada *Défense de l'esprit des lois* (1750).

¹⁷ Sir Joseph Banks (1743-1820), naturalista y viajero británico.

¹⁸ En cursivas en el original.

¹⁹ La muerte nos arrebató a este sabio el 11 de diciembre de 1808. [Nota original de los editores].

²⁰ Se refiere tal vez a los seminarios y conventos.

En mi última carta, que dirigí por Caracas, te hablo sobre las costumbres de estos habitantes. Verás que mi juicio conviene con el de Humboldt, que descubrió en Santafé las disposiciones más favorables al progreso de las ciencias. Si estos pueblos tuviesen un gobierno nativo que los animase; si no estuviesen sujetos a comer, vestir, y hasta pensar, si se puede decir así, por mano ajena, veríamos dentro de muy poco florecer el nuevo reino, que hasta ahora ha sido un país entregado a la voracidad de los empleados europeos.

No esperes orden en la correspondencia de un viajero, que es traído acá y allá por los diversos objetos que se le presentan, teniendo que dividir su tiempo entre la observación y los deberes cumplimentales. Por las noches nos retiramos mi compañero y yo á poner por escrito las especies que hemos recogido en el día, no pudiendo llevar sino apuntamientos para ayudar a la memoria.²¹ Así es que todas las obras de los viajeros se resienten del movimiento en que están sus autores. No obstante, yo espero a mi vuelta a la Europa escribir una obra metódica²² que dedicaré a la amistad con que siempre has honrado a tu invariable amigo,

L. R.

Discusión

Se infiere del contenido de esas cinco cartas sucesivas la presencia de un extranjero europeo (eventualmente francés) de visita en el virreinato de la Nueva Granada en los primeros años del siglo XIX, que posee conocimientos científicos no desdeñables y que no está solo en sus correrías, puesto que menciona la existencia de un compañero.

La única pista acerca de su identidad son las iniciales L. R. Se ignora el nombre de la persona que lo acompaña –para referirse a él escribe simplemente “mi compañero”– así como la identidad de la persona (parece ser una sola) a quien va dirigida la correspondencia. Es curioso, entonces, que no hayan quedado registrados ni la identidad del redactor primario (L. R.), ni la de su corresponsal amigo (presunto informante de los editores, a no ser que el hipotético L. R. haya dejado –en manos también anónimas– una muestra de su archivo copiator epistolar), en tiempos en los que era usual el recurso editorial de los elogios explícitos a todo aquel que aportaba al bien del Reino.

La actitud reservada que exhibieron los editores del *DPSB* agudiza el misterio, pues se abstuvieron de aportar algún tipo de información adicional que permita identificar al viajero remitente. Se ignora, muy especialmente, cómo lograron conseguir acceso a unas cartas que fueron enviadas por el autor (L. R.) a un corresponsal incógnito, o si contaron con la anuencia de este viajero anónimo, o bien del receptor de las epístolas, para su reproducción en un medio de comunicación local en Santafé; aparentemente estas fueron redactadas en español, puesto que no se menciona si fueron o no traducidas de algún idioma extranjero. Finalmente, no se puede interpretar fácilmente cómo llegaron estas cartas a manos de los editores del *DPSB* desde las de un eventual corresponsal en Europa, puesto que en la *Carta n.º 5* le refiere que le había dirigido su “última carta [...] por Caracas”, y le describe en esta y en las anteriores con un detalle excesivo lo que era fácilmente evidente para cualquier corresponsal radicado en la Nueva Granada: esto refuerza la hipótesis de que se trata de un corresponsal europeo.

No deja de parecer sorprendente que Caldas, uno de los editores, haya publicado estas cartas sin incluir sus propios comentarios, tal y como lo hacía sistemáticamente en el *SNRG*, y como lo hizo, en particular, en el reporte sobre la geografía de las plantas que envió Humboldt a Mutis a través de sus manos en 1803, y que Caldas publicó en 10 números sucesivos del *SNRG* entre abril 23 y junio 25 de 1809. ¿Por qué no comentar los

²¹ Esta descripción del día a día de los viajeros corresponde exactamente a lo vivido por Caldas con Humboldt y Bonpland en Quito en el primer semestre de 1802.

²² La obra metódica que Humboldt iniciaría en 1805 en París fue expuesta por Caldas en el número 24 del *Semanario del Nuevo Reyno de Granada*, publicado en el mes de junio de 1809. Véase Gómez Gutiérrez (2018, II, 431-438).

datos y reportes de materias tan cercanas a sus propios intereses? ¿Por qué no comentar, en la *Carta n.º 2*, todo lo relativo al Observatorio que él mismo había descrito más de dos años antes en el *SNRG* (Caldas, 1808)? ¿Por qué no ahondar en la relación fitogeográfica de diferentes especies que aparece en la primera carta? En el dominio científico, solo aparece adicionalmente una nota a pie de página relacionada con el Observatorio de Filadelfia en la segunda carta, y una nota sobre la muerte de Mutis en la quinta carta.

Al margen de estos detalles ciertamente anómalos, varios aspectos que conciernen a la ausencia del registro de eventos de lo ocurrido en la Nueva Granada a comienzos del siglo XIX despiertan mayores suspicacias. Una de estas, fundamental, es que aparte de la referencia explícita de las cartas en cuestión, no ha sido posible encontrar el más mínimo registro del paso de dos viajeros como los que se referencian en dichas epístolas, para el periodo en que habrían realizado su travesía por el territorio neogranadino (*i. e.*, a finales de 1803 y comienzos de 1804). Solo dos viajeros extranjeros podrían corresponder eventualmente a estas iniciales: Louis de Rieux, padre o hijo. Pero el padre, nacido en 1755 en Carcasona, Francia, había ya habitado en Santafé en la última década del siglo XVIII, cuando interactuó con Antonio Nariño en medio de la controversia de la publicación de la traducción de los derechos del hombre. El hijo, Luis Francisco de Rieux, nacido también en Carcasona veintiocho años después, el 15 de octubre de 1783, había sido bautizado en Facatativá el 29 de enero de 1794 cuando tenía ya 10 años cumplidos.²³ En consecuencia, ninguno de los dos De Rieux podría haber iniciado la *Carta n.º 1*, firmada el 3 de diciembre de 1803, diciendo que: “El día 20 del mes anterior entramos en la llanura de Santafé. No te puedo ponderar la sensación que me causó un golpe tan hermoso, después de haber atravesado las malezas del río Magdalena, y el resto de mal camino por tierra desde Honda hasta Facatativá, de que te hablé en mi carta anterior”. Tampoco corresponde la mayoría de lo referido en las cinco cartas consecutivas a la vida y obra de los De Rieux, al dejar por fuera elementos claves de su experiencia como el de inspector de quinas del padre, y el hecho de haber ellos mismos viajado con Alexander von Humboldt y Aimé Bonpland entre abril y junio de 1801, desde Turbaco hasta Honda (Humboldt, [1799-1801] 1982, 11a).

A modo de contraste, se puede revisar esa misma visita de Humboldt y Bonpland realizada en el año 1801, la cual despertó un amplio cruce de correspondencia entre los miembros de la élite ilustrada, y de la que quedó un extenso registro histórico, incluyendo su impresión a la llegada a la llanura de Santafé en los términos expuestos en la *Carta n.º 1* (Gómez Gutiérrez, 2018; Humboldt, [1799-1801] 1982, 42a).

La ausencia completa de algún tipo de registro de esta visita en 1803-1804 es irregular, puesto que el propio viajero L. R. refiere en la *Carta n.º 1* que, él y su compañero, eran muy populares entre los ciudadanos: “A mi compañero y a mí nos rodean continuamente, queriendo imponerse de todo, de suerte que, si nos estableciésemos en este lugar, dentro de poco tiempo tendríamos tantos discípulos como se dice haber tenido Mr. Cujas”. El aislamiento imperante en esos días en el territorio del Nuevo Reyno de Granada hacía efectivamente de cada visita de extranjeros un evento digno de recordación (Pérez-Mejía, 2004). De modo que no deja de parecer sorprendente que no haya quedado ni el más mínimo indicio adicional del paso de L.R. y su compañero por territorio neogranadino.

Además de lo anterior, existen varios aspectos contenidos dentro de las cartas que, reunidos en su conjunto, determinan que deba colocarse en tela de juicio la propia existencia del viajero L. R. y, por supuesto, la veracidad al pie de la letra de lo que se registra en ellas.

²³ Gracias al hallazgo de la partida de bautismo de este joven francés en Facatativá por parte de la historiadora María Clara Guillén de Iriarte (comunicación personal), se puede precisar que el hijo de Louis de Rieux (1755-1840) fue bautizado en la iglesia sabanera el 29 de enero de 1794, con Antonio Nariño como padrino sustituto en ausencia de Francisco Miranda y Tobar, venezolano, en honor a quien fue bautizado Luis Francisco de Rieux. La partida indica de manera explícita que el bautizado tenía en ese momento “9 años cumplidos”. Véase Gómez Gutiérrez (2018, I, 1, 270).

Iniciemos por el relato de los instrumentos con que cuenta el Observatorio astronómico: al describirlos, L. R. menciona la existencia del “péndulo de Graham, que trajeron a Quito nuestros académicos” (*Carta n.º 2*, de diciembre de 1803), como uno de los aparatos que integran la dotación del Observatorio. Sin embargo, dicho reloj solo vino a ser parte del instrumental de esta institución en diciembre de 1805, cuando Caldas arribó con él a Santafé después de haberlo adquirido en Quito. De hecho, el reporte de Caldas sobre la propiedad sucesiva de este instrumento fue anotada por él mismo a pie de página en el *SNRG* en su “Descripción del Observatorio” en febrero de 1808: “M. de la Condamine vendió este péndulo al Reverendo Padre [fray Domingo] Terol, dominicano en Quito, [Doctor en la Real Universidad y Rector del Colegio de San Fernando] y profundo en el arte de la relojería. A su muerte lo compró esa Audiencia para arreglar sus horas; pero poco propio para este destino, pasó a manos de don N. Proaño, hábil relojero [en Quito] y de cuyo poder lo saqué para el Observatorio” (Caldas, 1808).

¿Cómo es posible, entonces, que un visitante en Santafé y en particular a su recién construido Observatorio, conozca de la existencia de un instrumento que solo llegará a ese sitio dos años después de su visita?

Igualmente inconsistente resulta el comentario relacionado con el herbario de la Expedición que, por lo visto, habría observado L. R. con lujo de detalle: “Su herbario se compone de más de veinte mil plantas, bastante bien conservadas. Se han ejecutado ya dos mil láminas para la Flora con una perfección inimitable” (*Carta n.º 5*). Estos comentarios precisos a la obra de José Celestino Mutis realizados por un viajero extranjero en 1803, suponen un encuentro personal del que no existe la menor traza en los diarios ni en la correspondencia del gaditano.

Hay varias anomalías adicionales que merecen también citarse, y que tienen que ver con su repetida mención de Alexander von Humboldt (*Cartas n.ºs 2 y 5*).

Primeramente, hay tres alusiones al prusiano en las cartas: la primera comentando la Memoria que redactó sobre las salinas de Zipaquirá. Bien puede argumentarse que L. R. haya tenido acceso a esta Memoria estando en Santafé, pues al menos dos copias de este manuscrito quedaron en poder de Mutis (como se puede comprobar hoy en el Fondo José Celestino Mutis del Real Jardín Botánico de Madrid). Las dos restantes alusiones a Humboldt tienen que ver con el comentario que este hizo de la extensa biblioteca de Mutis y con la opinión acerca de las buenas disposiciones que poseían los santafereños para el progreso de las ciencias. Pero ¿cómo hizo para enterarse L. R. sobre estos dos comentarios en un año tan temprano como 1803 cuando Humboldt en esos momentos se encontraba viajando entre el Perú y México a través del Océano Pacífico, y la inmensa mayoría de sus experiencias de viaje aun se hallaban consignadas en los diarios personales que portaba celosamente?

Por otra parte, y suponiendo que L. R. no hubiese fallecido en su periplo por América o en su viaje de regreso a Europa, es poco probable que, de haber sobrevivido y retornado a su patria, este viajero hipotéticamente francés no hubiese entrado en contacto con Humboldt, quien se radicó en París entre 1804 y 1827. Es altamente probable que Humboldt lo hubiera citado en algún aparte de su voluminosa obra, pero, hasta la fecha, no se ha encontrado ninguna evidencia de contactos del prusiano con este viajero que prácticamente había seguido sus pasos por Venezuela, Cartagena, el río Magdalena y el altiplano cundinamarqués (Gómez Gutiérrez, 2018).

Al concentrar la atención propiamente en la redacción y estilo de las cartas, resulta un tanto extraña la forma poco constante como L. R. se dirige hacia su corresponsal, abriendo la primera carta con un “amigo”, y cerrándola con “tu afectísimo amigo”; luego, pasó a abrir la segunda carta con “mi pensado amigo”, y retornó en la tercera a una discreta apertura dirigida a su “amigo”, que cerró unas líneas después con una más que amistosa declaración que examinaremos en el siguiente párrafo. A estas alturas, se lanzó a abrir la cuarta carta con “mi suspirado amigo” y a cerrarla con un “sabe que te piensa tu verdadero amigo”, para llegar a la última apertura (aparentemente fatigada) con un frío y abreviado

“Mr”, prometiéndole, sin embargo, que, no obstante, esperaba a su vuelta a la Europa escribir una obra metódica que dedicaría a la amistad con que siempre había honrado a su “invariable amigo”.

Si bien, en general, parece existir una simple relación amistosa entre el emisor y el receptor, característica de dos varones que se profesan entre sí un mutuo aprecio, en la continuación de la *Carta n.º 3*, en su último párrafo, surgen dos apartes que evidencian un vínculo más intenso, más afectivo, más íntimo: Expresiones como “...las grandes ventajas que aquí se gozan, y que quisiera dividir contigo...”, o bien “creo que por estas bellas circunstancias viviría contento en este país ameno; pero la mitad de mi ser está lejos de mí, y no puedo vivir gustoso sin mi caro amigo por quien suspiro todos los momentos”, no pueden pasar inadvertidas, aunque este tipo de expresiones románticas hayan sido relativamente usuales en el paso del siglo XVIII al siglo XIX. Es extraño que esta *Carta n.º 3*, que se inicia con un sencillo “amigo”, haya terminado con esos fogosos apartes que no fueron sistemáticos, y que parecían estar fuera del tono del contenido general de las cinco epístolas. Es como si el verdadero autor de estas relaciones, relativamente incoherentes, hubiera aprovechado esta tribuna para revelar de manera anónima sus más profundos sentimientos, o los más profundos sentimientos de quien estaba suplantando.

Estos altibajos con sus corresponsales fueron, por otra parte, característicos en el propio Caldas como lo refirió el Padre Enrique Pérez Arbeláez en su artículo titulado “La ciencia y la historia”, en el que concluyó que “el Caldas todo ternuras, todo sahumeros, todo néctar, cuando se le truncaba la ilusión o se le frustraban las esperanzas, o se le incumplían promesas ciertas o por él imaginadas, se volvía de vino en vinagre, tanto más ácido cuanto que su talento le descubría mejor el lado flaco de sus ídolos del día anterior” (Pérez Arbeláez, [1959] 2018).

Aparte de lo anterior, un aspecto notable, este sí perfectamente recurrente en el conjunto las cinco cartas, es el notable parecido de la narración del viaje de “L. R.” (que resulta ya apropiado registrar entre comillas) con el que Humboldt realizó con Bonpland dos años y medio antes en su hipotético paso por la Nueva Granada. Ambos, “L. R.” y Humboldt, tienen un compañero de viaje, cargan numerosos diarios, ambos han visitado el río Orinoco; son deslumbrados por la belleza de la Sabana de Bogotá, visitan las salinas de Zipaquirá (originando prácticamente idénticos comentarios), reflejan poseer conocimientos en botánica, geología, astronomía e industria minera; ambos son receptores de numerosos obsequios, son dados a ser críticos del gobierno colonial imperante, son proclives a mantener intensas relaciones masculinas, y planean, a su retorno a Europa, escribir una obra “metódica” que dé cuenta de todas sus observaciones y experiencias.

Llegados a este punto, frente a las inconsistencias anotadas y al asombroso parecido entre la narración de “L. R.” y la de Humboldt, nos parece ya conveniente enunciar la hipótesis formal de que el autor de las cartas que nos ocupan no es otro que el propio Francisco José de Caldas. En consecuencia, se plantea que Caldas se permitió con facilidad –dada su condición de coeditor del *DPSB*– incluir esta ficción literaria en estas páginas teniendo como inspiración la visita de Humboldt y Bonpland, con quienes había convivido cerca de cinco meses en Quito y de quienes tuvo referencias múltiples a su paso por Cartagena, Santafé y Popayán. Se puede descartar al segundo editor del *DPSB* –José Joaquín Camacho– como autor primario de estas misivas pseudónimas, pues a pesar de haber realizado estudios en derecho y poseer una mente sagaz y hábil políticamente, carecía de ciertos conocimientos científicos y, lo que es más importante, no había tenido la experiencia de trabajar al lado de Humboldt por varios meses, de sostener correspondencia con él, ni de haber examinado sus diarios. Sin embargo, es claro que la inclusión de las cartas que postulamos hoy como caldasianas, debió contar con la anuencia de Camacho.

No fue esta la primera vez que Caldas anonimizó sus comunicaciones. Un importante antecedente es su artículo publicado en 1801, en los números 23-25 del *Correo Curioso*, bajo el título “Observaciones sobre la verdadera altura del cerro de Guadalupe que domina esta ciudad”, en donde se refiere a las mediciones halladas “en un manuscrito intitulado *Relación de un viaje de Santafé de Bogotá a Popayán hecho en 1796 por N.*” (Caldas,

[1801] 1966). “N” es, naturalmente, Caldas. Así lo revela él mismo en el cierre de la comunicación con un “[...] el motivo que me mueve a remitirles este trozo final de mi *Relación de viaje*, es por provocar a los físicos de esa capital a que repitan las observaciones del barómetro sobre Guadalupe, y también en Monserrate, a donde no pude subir [...]”.

Eduardo Posada interpretó el hecho con la siguiente nota a pie de página: “El autor es, según se ve luego, el mismo Caldas, que ocultó al principio modestamente su nombre”. Sin embargo, los motivos de Caldas parecían ser más complejos que una simple modestia. Así lo confesó a Santiago Arroyo en carta firmada en Popayán en junio 20 de 1801: “Ya usted, en compañía de mis otros amigos, me quiere echar al público: yo aprecio su afecto y la estimación que hacen de mis cosas; pero no era tiempo de quitarme la máscara y aparecer en el mundo literario. Mejor habría sido mantenerme algunos años más a la sombra de un nombre griego o de unas iniciales, hasta haberme formado y representar en el país de las letras mi papel con alguna dignidad. Usted debió oponerse a esta presentación temeraria con todas sus fuerzas; usted, que acaba de pasar por el mismo camino, que se ha puesto a cubierto bajo la voz *Polifilo*, debía haber apetecido y procurándome la misma satisfacción; ya no podré, como usted, oír la censura de mis producciones en mi presencia, censuras tanto más apreciables cuanto las dictan la razón y la verdad, lejos de toda preocupación, respeto y amor hacia su autor. Si acaso no se ha impreso todavía, es necesario me evite usted mil cuidados y me dé la satisfacción de probar por esta y por otras piezas que tengo en bosquejo, el juicio que forma el público de un nuevo ciudadano que de repente aparece en el mundo literario. No estoy contento con que se dé mi nombre, y mucho menos con que se me elogie. Todos los hombres somos orgullosos y vemos con repugnancia, y quizá con pena, los elogios que se prodigan a otro. Es verdad que este vicio es propio de las almas bajas y pequeñas; ¿pero el común de los hombres no la tiene de este temple? Las almas grandes, las almas generosas son pocas, porque lo bueno siempre es raro; en fin, temblando aguardo los correos siguientes y las lluvias de críticas, murmuraciones y censuras; yo estoy bien seguro que no me tomaré el trabajo de responder; pero vamos a otra cosa” (Caldas, [1801] 1978).

El eventual seudónimo “L. R.” de 1810 no parece surgir tampoco de la modestia de Caldas. Así, quedan al menos dos preguntas ineludibles en este punto: ¿Cuáles fueron los motivos que condujeron a Caldas a permitirse la libertad de crear un viajero ficticio por el territorio neogranadino, una especie de pseudo-Humboldt, cuyas apreciaciones sobre la región, sus ciudadanos y su gobierno quedaron consignadas en unas supuestas cartas que escribió a un amigo? ¿Por qué incluirlas en un medio escrito cuya circulación abarcaba, en principio, todas las provincias de la Nueva Granada?

Proponemos una sola respuesta: Caldas lo hizo en función de un necesario proselitismo político en el segundo semestre de 1810. Debe recordarse que los trastornos existentes en España ocasionados por la invasión de Napoleón Bonaparte originaron, prácticamente en toda la América española, una fuerte reacción de rechazo hacia los representantes del gobierno peninsular lo que condujo al establecimiento de gobiernos locales conformados por las élites criollas, no solamente en las capitales de los virreinos existentes, sino también en las capitales de provincias e incluso en poblaciones intermedias que se veían así mismas con el legítimo derecho a hacerlo. El Nuevo Reyno de Granada no fue la excepción (Liévano, 2002). De modo que la Junta Suprema establecida en Santafé debía justificar no solo el advenimiento de un gobierno más idóneo y capaz: debía además controlar el surgimiento de una amplia diversidad de Juntas surgidas en numerosos sitios de virreinato pues la mayoría de ellas se negaban a plegarse a su poder e influencia (Gutiérrez Ardila, 2010).

Y es allí donde los órganos de vocería de la Junta Suprema entran en juego, haciendo un llamado a las provincias a mantener la unión y dar por hecho obvio que es Santafé, por su tamaño, por su prestigio y por la excelencia de sus gentes, la que debe apadrinar el proceso para la elección de la mejor forma de gobierno. El suplemento del No. 1 del *DPSB* lo estipula claramente: “Las provincias del reino no deben tomar partido por sí solas en la

presente crisis [...]. Somos un cuerpo de nación; los fondos, los intereses son comunes; unas mismas las leyes que nos gobiernan [...]. Sería un procedimiento el más impolítico romper estos vínculos sagrados, separarnos cuando nos debemos unir más estrechamente”, y más adelante: “En la Capital del Reino se verá cómo piensan las provincias y de acuerdo con sus representantes [...] se resolverá la forma de gobierno que más nos convenga adoptar [...] la Capital no trata de subyugar los pueblos, sino de reunirlos para establecer la buena armonía” (Caldas & Camacho, 1810).

De modo que Caldas recurre a la hábil licencia de crear un personaje que, a través de sus cartas, pone en evidencia las fallas y el desgano de la administración colonial, exhibe una imagen más favorable de Santafé y de sus habitantes, y resalta, de una manera aparentemente objetiva como puede serlo la visión de un viajero extranjero, la riqueza y potencialidad que tiene el territorio como nación independiente.

En cuanto al primer propósito, se pueden evocar los siguientes apartes: “bajo otro gobierno [los dos ríos que atraviesan la ciudad] podrían contribuir más al placer y a la salubridad”; “el Gobierno favorece poco las ciencias (comentario un tanto inapropiado para haber sido redactado en 1803, ya que en esos días estaba plenamente vigente la Expedición Botánica), y mucho menos las artes, que perjudicarían al sistema colonial” (*Carta n.º 1*); “El gobierno debe interesarse en adelantar y perfeccionar la explotación y fábrica de [la sal]” (*Carta n.º 3*); “[la] constitución política se opone [...] a los adelantamientos científicos”; “Si estos pueblos tuviesen un gobierno nativo que los animase; si no estuviesen sujetos a comer, vestir, y hasta pensar, si se puede decir así, por mano ajena, veríamos dentro de muy poco florecer el nuevo reino, que hasta ahora ha sido un país entregado a la voracidad de los empleados europeos” (*Carta n.º 5*). Esta última predicción es claramente anacrónica, a menos que estemos frente a un excepcional don de clarividencia en “L. R.” siete años antes de los sucesos del 20 de julio de 1810.

En cuanto a poner en evidencia el talento de los habitantes de Santafé se pueden resaltar las siguientes líneas: “Los ciudadanos están dotados de genio, y se observa en casi todos un deseo insaciable de saber [...]. Hay hombres bastante instruidos, reina en todos un gusto delicado, expresión fina, y si hubiera cultivo podría ser esto un París (*Carta n.º 1*); “No carece esta capital de hombres capaces de hacer [delicadas observaciones astronómicas²⁴]” (*Carta n.º 2*); “mi juicio conviene con el de Humboldt, que descubrió en Santafé las disposiciones más favorables al progreso de las ciencias” (*Carta n.º 5*). No hay que olvidar, sin embargo, que Humboldt usualmente exaltaba en público a sus anfitriones, pero en sus diarios íntimos (que redactó en alemán), al referirse a los habitantes de la Nueva Granada, escribió que estaba en “un país en donde nadie se toma el trabajo de formarse ideas claras sobre nada” y en el que “no se razona” (Humboldt, [1799-1801] 1982, 58a y 112a).

Sobre la riqueza y potencialidad de la nación: “te admirarías si te hallaras presente en los esplendidos (sic) convites con que se nos obsequia y en que hemos visto muchas composiciones gastronómicas que lograrían aprecio en la culta Europa” (continuación de la *Carta n.º 3*); “Cada día descubro nuevas riquezas en este país” [...]. Te he hablado demasiado de las abandonadas riquezas de que la naturaleza ha proveído estos lugares, que puede ser florezcan algún día, para lo que se necesitan todas las fuerzas de la opinión, hallándose estas gentes acostumbradas de largo tiempo a depender de la Europa, no necesitando sino de sus propios recursos para ser poderosos; pero la suerte de la América ha sido ser presa infeliz de los conquistadores europeos, que han establecido el despotismo en esta parte del globo” (*Carta n.º 4*); “Las riquezas literarias de Santafé exceden a lo que se podía esperar de un país tan distante del centro de luces”, y “En las religiones, colegios, y aun en muchas casas particulares, hay también librerías copiosas, que no se encuentran en muchos lugares cultos de Europa” (*Carta n.º 5*).

²⁴Una evidente auto referencia de Caldas. Véase Portilla (2016).

Tampoco se puede descartar que algunos de los comentarios, más allá de aludir al deficiente gobierno colonial que se acababa de sustituir, aplicaran también como recomendaciones explícitas al nuevo gobierno, tales como hacer efectivas las recomendaciones de Humboldt sobre la manera de sacar mejor provecho de la producción en las salinas de Zipaquirá.

Como se ve, no hace falta escarbar demasiado para evidenciar una clara y manifiesta intención política en la redacción de esas cinco cartas. Caldas, paradójicamente, habría procurado cubrir sus huellas colocando ciertos poblados con ortografía incorrecta, haciendo gala de una prosa un tanto etérea en algunos apartes, y utilizando información inexacta como la altura del Salto de Tequendama, o registros astronómicos erróneos como el que se refirió al tránsito del planeta Venus. Pero, inadvertidamente, dejó huellas inequívocas de una identidad neogranadina no francesa del hipotético “L. R.”, representadas por errores ortográficos de apellidos franceses como Lalande (no “La Land”), entre otras trazas.

Por encima de estos eventuales errores voluntarios, hay ciertos aspectos sutiles en los que la personalidad de Caldas aflora de forma inevitable. Ejemplo de ello son el que: a- El autor de las cartas no posea un concepto positivo de los estudios de derecho. Al hablar de las enseñanzas que impartió el jurisperito Cujas se refiere a ellas en términos desdeñosos, pues para él son desagradables y poco útiles. Caldas, que recibió el título de bachiller en derecho, manifestó su aversión a esa práctica. En la primera carta que le escribió a Mutis dirá “me pusieron a Vinio²⁵ en las manos; pero yo no había nacido para jurisperito. A pesar de los castigos, reconvenciones y ejemplos, yo no pude tomar gusto a las leyes ni a Justiniano, y perdí los tres años más preciosos de mi vida” (Caldas, [1801] 1978, carta 41). Así mismo, en una misiva dirigida a Santiago Arroyo anotó: “No repruebo el estudio de la jurisprudencia: conozco su necesidad y sus ventajas; pero para cuatro procesos en que se disputa una cuadra de terreno, un derecho ridículo, cuatro matas y otras tantas frioleras, tiene usted un cúmulo de conocimientos superior a cuantos asuntos forenses se pueden presentar en nuestros países. Si, deje usted ya a esos jurisperitos y vamos a hacer algo que pueda sernos útil y haga honor a nuestra patria” (Caldas, [1801] 1978, carta 40); b- Si bien “L.R.” reconoce la estatura científica de Mutis, refiere que es “algo misterioso, y poco accesible a los jóvenes del país, que quisieran tomar lecciones de tan gran maestro”, comentario parecido al que hace Caldas cuando describe el carácter de Mutis al secretario del virrey Amar y Borbón (Caldas, [1809] 1978, carta 132).

Caldas, al final de la *Carta n.º 5*, parece caer en cuenta de las inconsistencias y el desorden de sus reflexiones e intenta subsanarlas con una justificación plausible, de manera que escribe en el último párrafo: “No esperes orden en la correspondencia de un viajero, que es traído acá y allá por los diversos objetos que se le presentan”.

Para terminar esta sección expondremos un aspecto que, aunque hemos de reconocer, es netamente circunstancial, puede apoyar la tesis de que Caldas es el redactor de las cartas que nos ocupan. Ya hemos comentado la fogosidad del último párrafo en la continuación de la *Carta n.º 3* aparecida en el No. 19 del *DPSB*, con el que “L. R.” se despide de su amigo, confidente, y ahora, de improviso, depositario de sus apasionados anhelos. Pues bien, la primera parte de aquella carta apareció en el número anterior, en el No. 18, en el que está incluida, entre otras secciones, una nota titulada “Quito, septiembre 20 de 1810”, en la que se comenta que el Comisionado Regio Carlos Montúfar fue recibido allí en medio de un “concurso inmenso” y en el que sus habitantes “corrían en tropa, lloraban todos de placer y lo victoreaban (sic) llamándole su *Libertador*” (esta última palabra en itálica en el original). Este Carlos Montúfar no es otro que Carlos de Montúfar y Larrea-Zurbano (1780-1816), el hijo de Juan Pío de Montúfar y Larrea (1758-1819), II marqués de Selva Alegre y, como tal, un digno exponente de lo más granado de la aristocracia quiteña. Como es sabido, Carlos Montúfar fue el joven quiteño a quien Humboldt decidió llevar consigo en el resto de su viaje por América en lugar de Caldas, lo que originó en este

²⁵ Se refiere al jurisperito holandés Arnoldo Vinnio (1588-1657), autor de un importante tratado de derecho.

una enorme frustración y ocasionó el enfriamiento y distanciamiento en sus relaciones, pues Humboldt argumentó, frente a la insistencia de Caldas de acompañarlo, que había decidido viajar solo, lo que a la postre resultó siendo una mentira. Con o sin razones, el caso es que Caldas atribuyó su rechazo y la preferencia por Montúfar, ese “joven currutaco, ignorante y disipado” (Caldas, [1802] 1978, carta 66), al surgimiento de una relación amorosa entre ambos, lo que Caldas matizó escribiendo a Mutis y sus amigos íntimos de que Humboldt tenía un “secreto abominable” y “que los hombres más grandes tienen debilidades” (Caldas, [1802] 1978, carta 66).

De modo que para finales de octubre de 1810, en medio de los trastornos políticos que afloraban por todas partes, reaparecía en Quito Carlos Montúfar, el “adonis” de Humboldt (Caldas, [1802] 1978, carta 68), recibido ahora como un héroe, ovacionado por muchedumbres con lágrimas en los ojos y aclamado nada menos que como “Libertador”. Hemos de suponer que la noticia no debió caerle en gracia a Caldas.

No sería excesivo entonces conjeturar que el payanés, frente a la novedad informativa que le despertaba el amargo recuerdo experimentado ocho años antes, no pudo evitar permitirse cierta libertad literaria y puso a redactar a su personaje, a su avatar, un párrafo explícito en el que se sugería, de repente y sin previo aviso, la tendencia de “L. R.” hacia una relación excesivamente íntima entre dos hombres, aún para los estándares de la época. Un gusto semejante al que había exhibido Humboldt en su paso por América (Pérez Arbeláez, [1959] 2018). ¿Qué ganaba con esto Caldas? Poca cosa. Pero no puede descartarse que la redacción de las cartas en cuestión no solo estaba dirigida a satisfacer el objetivo principal de su proselitismo político, tal y como se argumentó ya, sino que pudieron haber servido al improvisado autor sucedáneo para comunicar entre líneas a sus amigos más cercanos un hecho que habrían ya comentado años atrás: pudo haberse tratado, en síntesis, de una caricaturización.

La presente reflexión muestra que los editores del *DPSB* gozaban de una amplia libertad de acción, no solo para incluir las notas que pensaban *motu-proprio* que serían del interés legítimo de la población, sino para disfrutar de una cierta licencia individual, y muy subjetiva, como la que acabamos de postular.

En esos mismos días, sin embargo, hubo un llamado de atención para los editores, pues el número 24, que debía emitirse el martes 13 de noviembre, solo fue publicado el viernes 16 de esa misma semana, y en su parte final se incluía una resolución de la Junta Suprema sobre la continuación del *DPSB*, pues a través de un mandato, se había suspendido la emisión correspondiente al día martes. En dicha resolución se informaba que el miércoles 14 la Junta Suprema abordó el asunto de la queja proferida por algunas provincias contra el *DPSB* en el sentido de este fomentaba la desunión entre ellas. Como el interés de la Junta era justamente lo contrario, escuchó la versión de José Joaquín Camacho que, como hemos dicho, era vocal de esa Junta. Al final, ésta reconoció que, aunque el *DPSB* no tenía un rol de carácter “ministerial, nada podían perjudicar ni sus opiniones ni sus hechos aun cuando en alguna cosa menos esencial fuesen inexactos, se previene a dichos autores que en lo sucesivo pusiesen la más escrupulosa diligencia para evitar todo motivo de censura”.

En consecuencia, el *DPSB* podía continuar “en la misma calidad de privado o particular, en lo que expresamente no se advierta ser de otra naturaleza; y sin que por esto padezca la menor nota la opinión de sus autores, cuyas intenciones sanas y juiciosas son bien conocidas al Gobierno y no se han dirigido a otra cosa que al servicio de la Patria”.

Lamentablemente la resolución no ahonda en detalles de cuales fueron aquellos contenidos dentro de las hojas del *DPSB* que ocasionaron que varias provincias expusieran su descontento frente la Junta Suprema.

Conclusiones

En el presente artículo se han presentado varias consideraciones que permiten inferir que las cinco cartas aparecidas en el *DPSB* redactadas por un viajero de nombre “L. R.” son en realidad de autoría de Francisco José de Caldas, uno de los dos editores del diario. Hemos

hecho la sugerencia de que “L. R.” y su compañero están inspirados en dos personajes reales, Humboldt y Bonpland, quienes realizaron un periplo virtualmente idéntico al que se describe en las cartas. Caldas no tuvo mayor dificultad en la creación de “L. R.”, pues no solo conoció, trabajó y convivió con Humboldt por varios meses, sino que además tuvo acceso a sus diarios y mantuvo correspondencia con él.

La intencionalidad en la creación del personaje y de sus opiniones manifestadas en las cartas, tiene el propósito de mostrar una imagen favorable de Santafé de Bogotá y de sus habitantes. Así lo expresó el editor al presentar la primera de estas cartas para: “conocer en ellas las ventajas que reúne la Capital de Santafé”, en un periodo de incertidumbre política que amenazaba con poner en peligro el predominio de la capital y la unidad de la Nueva Granada. En el mismo sentido, se incluyeron opiniones tendientes a resaltar la potencialidad de la nación y sus habitantes.

Lo que se tiene entonces aquí es una estratagema consistente en ventilar unas impresiones favorables consignadas por un viajero europeo a su paso por un lugar que, a la vuelta de los años, se vería inmerso en una revolución, de modo que con ella se alentaba la confianza y la seguridad entre pobladores vacilantes e indecisos en su nueva condición de miembros de un Estado que acababa de conseguir su autonomía, considerando que se tiende a otorgar mayor peso y credibilidad a las opiniones de un forastero ilustrado.

Creemos entonces reunir las suficientes evidencias como para: 1- Poner en tela de juicio la autoría y veracidad de los contenidos de las cinco cartas en mención, y 2- Proponer que Caldas, en un arranque literario, y exaltado por los recientes triunfos de su partido revolucionario el 20 de julio de 1810, habría aprovechado la tribuna del *DPSB* para hacer proselitismo político y, a la vez, posicionarse como el viajero europeizante que sintió nunca haber llegado a ser plenamente, liberando entre líneas otras angustias personales.

Contribución de los autores

AGG y JGP contribuyeron por igual en la conformación de todas las secciones del presente artículo. AGG transcribió las cinco cartas a partir de la publicación original de 1810.

Conflicto de intereses

Los autores no presentan ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

Los autores agradecen la lectura crítica y comentarios al texto preliminar del historiador Daniel Gutiérrez Ardila, así como los agudos comentarios y sugerencias de dos evaluadores anónimos en el curso del proceso editorial de la *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*.

Referencias

- Bell, W. J. Jr.** (1964). *Astronomical Observatories of the American Philosophical Society, 1769-1843*, *Proceedings of the American Philosophical Society*. **108** (1): 7-14.
- Caldas, F. J.** ([1801] 1966). *Observaciones sobre la verdadera altura del cerro de Guadalupe que domina esta ciudad*, *Obras completas de Francisco José de Caldas*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, pp. 365-374.
- Caldas, F. J.** (1808). *Descripción del Observatorio Astronómico de Santafé de Bogotá, situado en el jardín de la Real Expedición Botánica*. *Semanario del Nuevo Reyno de Granada*. **7**: 56-58.
- Caldas, F. J. & Camacho, J. J.** (1810). *Suplemento al Diario Político. Reflexiones sobre el modo con que se deben conducir las Provincias del Reyno en las actuales circunstancias*, *Diario Político de Santafé de Bogotá*, [sin paginación].
- Caldas, F. J.** ([1788-1816] 1978). *Cartas de Caldas*, Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Caldas, F. J.** (1810). *Primera carta, firmada en Santafé de Bogotá en diciembre 3 de 1803 (DPSB-16, octubre 16 de 1810, pp. 63-64)*: <https://babel.banrepcultural.org/digital/collection/p17054coll26/id/1409>

- Caldas, F. J.** (1810). Segunda carta, firmada en Santafé de Bogotá en diciembre 19 de 1803 (*DPSB-17*, octubre 19 de 1810, pp. 67-68): <https://babel.banrepcultural.org/digital/collection/p17054coll26/id/1410>
- Caldas, F. J.** (1810). Tercera carta, firmada en Zipaquirá en enero 3 de 1804 (*DPSB-18*, octubre 23 de 1810, pp. 70-71): <https://babel.banrepcultural.org/digital/collection/p17054coll26/id/1412>
- Caldas, F. J.** (1810). Tercera carta (continuación) (*DPSB-19*, octubre 26 de 1810, p. 74): <https://babel.banrepcultural.org/digital/collection/p17054coll26/id/1413>
- Caldas, F. J.** (1810). Cuarta carta, firmada en Santafé de Bogotá en febrero 8 de 1804 (*DPSB-21*, noviembre 2 de 1810, pp. 83-84): <https://babel.banrepcultural.org/digital/collection/p17054coll26/id/1415>
- Caldas, F. J.** (1810). Quinta carta, firmada en Santafé de Bogotá en febrero 19 de 1804 (*DPSB-27*, noviembre 27 de 1810, pp 107-108): <https://babel.banrepcultural.org/digital/collection/p17054coll26/id/1421>
- Campos y Fernández de Sevilla, F. J.** (2011). El P. Diego Padilla y el “Aviso al Público”, Instituto escurialense de investigaciones históricas y artísticas, Publidivisa, Sevilla.
- Del Molino, R.** (2017). Anticománia cundinamarquesa. Referentes culturales y políticos grecorromanos presentes en la segunda mitad del siglo XVIII y en las primeras décadas del XIX en territorio cundinamarqués. En Taborda, I.M., Bonnett, D. (compiladores), Cundinamarca. Particularidades histórico-políticas de su formación, Escuela Superior de Administración Pública, Bogotá.
- Gómez Gutiérrez, A.** (2018). Humboldtiana neogranadina, 6 tomos, Editorial Pontificia Universidad Javeriana : CESA : Universidad de los Andes : Universidad EAFIT : Universidad del Rosario : Universidad Externado de Colombia, Bogotá.
- Gutiérrez Ardila, D.** (2010). Un Nuevo Reino. Geografía política, pactismo y diplomacia durante el interregno en Nueva Granada (1808-1816), Universidad Externado de Colombia, Bogotá.
- Hernández de Alba, G. & Carrasquilla, J.** (1977). Historia de la Biblioteca Nacional de Colombia, Instituto Caro y Cuervo, Bogotá.
- Humboldt, A.** ([1799-1801] 1982). Alexander von Humboldt en Colombia. Extractos de sus diarios, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Academia de Ciencias de la República Democrática Alemana / Publicismo y Ediciones, Bogotá.
- Ibañez, P. M.** ([1893] 1951). Crónicas de Bogotá, Tomo 2, Biblioteca Popular de Cultura Colombiana, Bogotá.
- Liévano, I.** (2002). Los grandes conflictos sociales y económicos de nuestra historia, Intermedio, Bogotá.
- Mantilla, I., Ochoa, F. & Martínez, R.** (2016). Consideraciones históricas y físicas sobre la altura del salto del Tequendama con los datos de Humboldt, Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. **40** (157): 580-584.
- Martínez Delgado, L. & Ortiz, S. E.** (1960). El periodismo en la Nueva Granada. 1810-1811. Academia Colombiana de Historia, Bogotá.
- Martínez Delgado, L. & Ortiz, S. E.** ([1960] 2018). Francisco José de Caldas, Periodista, Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. **42** (supl.): 158-163.
- Pérez Arbeláez, E.** ([1959] 2018). La ciencia y la historia. El caso de Caldas-Humboldt – No hubo tal adonis, Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. **42** (supl.): 138-141.
- Pérez-Mejía, A.** (2004). A geography of hard times: narratives about travel to South America, 1780-1849, State University of New York Press, Albany.
- Portilla, J. G.** (2017). Caldas y el gran cometa de 1807, Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. **41** (159): 244-252.
- Rojas, J. A.** (2013). Doscientos años de un periódico no tan feliz, Campos en Ciencias Sociales, Comunidad, Acción y Comunicación, Vol. 1, No. 2, Universidad Santo Tomás, Bogotá.
- Tisnés, R. M.** (1956). Capítulos de historia zipaquireña (1480-1830), Vol. 1, Academia Colombiana de Historia, Bogotá.

Ensayo

La verdad es hija del tiempo

Truth is the daughter of time

 Horacio Torres-Sánchez

Grupo de Investigación PAAS – Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Resumen

Las descargas eléctricas atmosféricas que se generan entre las nubes y la ionosfera son fenómenos electromagnéticos que se vienen estudiando sistemáticamente a nivel mundial hace muy poco tiempo, cerca de 30 años. Su interés radica en las radiaciones de muy alta frecuencia (rayos gamma) que son muy diferentes a los rayos que hasta ahora se han estudiado en el rango de las radiofrecuencias. En este artículo se presentan los fenómenos denominados destellos de rayos gamma terrestres (*Terrestrial Gamma-ray Flash*, TGF) y eventos luminosos terrestres (*transient luminous events*, TLE), y se analiza el papel de los estudios que lleva a cabo en Colombia el grupo PAAS-UN y los beneficios que esta rigurosa y sistemática investigación representan para el futuro del conocimiento científico de los rayos en el país.

Palabras clave: Descargas eléctricas atmosféricas; Rayos gamma; Zona tropical.

Abstract

The atmospheric electrical discharges occurring between the clouds and the ionosphere are electromagnetic phenomena whose study worldwide started very recently, about 30 years ago. Its interest lies in the remarkably high-frequency radiation (Gamma-rays) that is very different from the lightning studied so far in the radio frequency range. This article presents the phenomena known as Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGF) and Terrestrial Luminous Events (TLE) and the role of the scientific studies carried out by the PAAS-UN group in Colombia, as well as the benefits that this rigorous and systematic research will bring in the future as a contribution to the scientific knowledge of lightning in the country.

Key words: Lightning; Gamma Rays; Tropical Zone.

Introducción

La verdad es hija del tiempo, no de la autoridad, sentenciaba el célebre filósofo, político, abogado y escritor inglés Francis Bacon en el siglo XVI, cuando precisaba las reglas del método científico experimental.

Durante las cuatro décadas que el programa PAAS-UN de la Universidad Nacional de Colombia lleva investigando el fenómeno electromagnético del rayo, el grupo ha tratado de honrar la sentencia de Sir Francis Bacon. En este momento nos hemos embarcado conjuntamente con la firma Keraunos (empresa derivada que se desarrolló a partir del grupo PAAS-UN) en el desarrollo de una nueva etapa de investigación sobre los rayos nube-ionosfera: los destellos de rayos gamma terrestres (TGF) y los eventos luminosos terrestres (TLE) con base en la hipótesis de investigación planteada, estudiada y demostrada (Torres, 2015a) en torno a la variación espacial y temporal en los parámetros del rayo, la cual es aplicable en esta nueva etapa de investigación a los rayos nube-ionosfera, toda vez que la misión exploradora de la NASA *Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager RHESSI*, lanzada el 5 de febrero del 2002, demostró que una gran proporción de los TGF está estrechamente asociada con los sistemas de tormentas tropicales (Splitt, 2010) en un área que también es interesante por la probable aparición de fenómenos como los espectros rojos, los chorros azules y los elfos.

Citación: Torres-Sánchez H. La verdad es hija del tiempo. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):405-414, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1228>

Editor: Román Eduardo Castañeda Sepúlveda

Correspondencia:
Horacio Torres-Sánchez;
htorress@gmail.com

Recibido: 28 de mayo de 2020
Aceptado: 16 de febrero de 2021
Publicado: 17 de junio de 2021



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

Los destellos de rayos gamma terrestres

Los llamados destellos de rayos gamma terrestres (TGF) son emisiones de partículas de alta energía que se detectan desde satélites en órbita alrededor de la tierra. La misión RHESSI detectó entre 10 y 20 TGF por mes, lo que corresponde a aproximadamente a 50 por día en todo el mundo, con espectros típicos de energía entre los 10 y 20 mega-electronvoltios (MeV), según **David, et al.** (2005).

Los TGF se han estudiado desde su descubrimiento y las diferentes observaciones de la radiación gamma hechas mediante los satélites, así como las emisiones de radio asociadas con los rayos, relacionan los dos eventos, ver **figura 1. Cummer, et al.** (2005) y **Williams, et al.** (2006) han estudiado los posibles tipos de descargas eléctricas atmosféricas como fuentes de TGF. En este sentido, los flujos ascendentes de líderes negativos, resultantes de los rayos positivos dentro de las nubes (rayos intranube) situadas a grandes altitudes, podrían constituir una fuente de TGF, aunque todavía se desconoce con exactitud cuál es el mecanismo de su producción.

Entre todas las posibles fuentes de electrones relativistas estudiadas por **Williams, et al.** (2006) solo los rayos intranube positivos en los que se producen flujos de electrones ascendentes aparecen como claros candidatos, lo que lleva a pensar en la posibilidad de que el mecanismo encontrado en el laboratorio por **March** (2011) sea común para la generación de descargas en el laboratorio y para las descargas eléctricas atmosféricas naturales y los TGF.

El origen terrestre de las intensas ráfagas de radiación gamma TGF descubiertas en la atmósfera es uno de los misterios de la física de los rayos que permanecen sin resolver. Desde el descubrimiento de la emisión de rayos gamma en la atmósfera terrestre, ha habido observaciones que relacionan la aparición de estas emisiones con la presencia de rayos. La misión del proyecto *Atmosphere Space Interaction Monitor* (ASIM) tiene por objeto clarificar este punto.

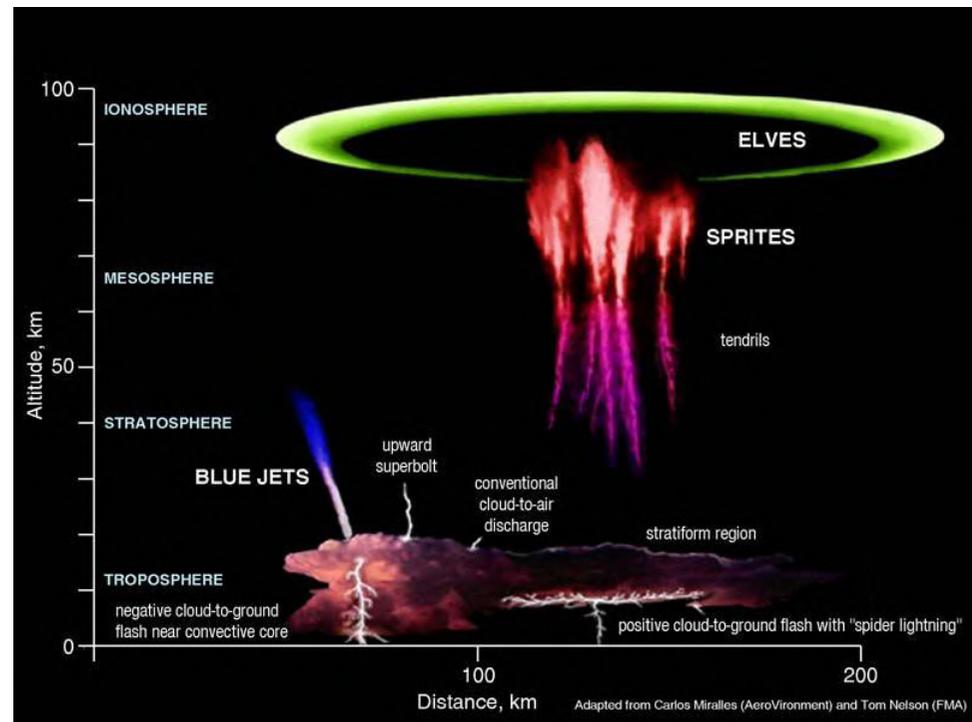


Figura 1. Representación de los TGF y los TLE en el espacio: *Blue jets*, *Red Sprites* y *Elves* (tomado de: <https://k05.kn3.net/176D156E0.jpg>)

Los eventos luminosos terrestres

El nombre de eventos luminosos terrestres (TLE) es la denominación genérica de un conjunto de fenómenos de corta duración (milisegundos a segundos), muy energéticos, observados desde hace más de 80 años entre la estratosfera y la ionosfera (20-100 Km) de la atmósfera terrestre y asociados con zonas tormentosas con abundancia de rayos. Sin embargo, los primeros registros reportados en la literatura son de la década de 1990 (Sentman & Wescott, 1993).

Los TLE se clasifican en tres tipos: *Blue jets*, *Red Sprites* y *Elves*, este último nombre, duendes luminosos, hace alusión a la obra de Shakespeare *Sueño de una noche de verano*. Son fenómenos mucho más habituales de lo esperado, que ocurren en toda la superficie terrestre en zonas con gran actividad de descargas eléctricas atmosféricas, como Colombia, y se generan entre la capa de nubes y la ionosfera. Su morfología y su dinámica son mucho más complejas de lo que pueda pensarse y su distribución en longitud indica que son más frecuentes sobre los continentes, en zonas tropicales como la nuestra.

Hipótesis, metodología y primeros resultados

La hipótesis de investigación (Torres, 1998) plantea que las magnitudes de los parámetros de la descarga eléctrica atmosférica varían espacial y temporalmente. La hipótesis se ha venido demostrando (Torres, *et al.*, 2015; Albrecht, *et al.*, 2016; Orville, 1990; Naccarato, 2006; Cooray, 2018; Williams, 1996) y sigue siendo válida para la investigación sobre los TGF, aunque seguramente aparecerán nuevos parámetros y desarrollos.

La metodología planteada para el desarrollo del proyecto ASIM incorpora preguntas que ciertamente han sido objeto de tesis de maestría y doctorado, y lo seguirán siendo. Entre dichas cuestiones se pueden mencionar la identificación de puntos de acceso de rayos a la tierra en regiones tropicales como Colombia, su aplicación en torres de comunicación, aerogeneradores, y torres de energía eléctrica, entre otras, y el mejor entendimiento de los procesos de electrificación durante tormentas en el trópico con equipamiento como el sistema de sensores *Lightning Mapping Array* (LMA) y la información de radares meteorológicos.

Un primer aporte (Castro, 2019) ha sido la determinación de la altura de los centros de carga eléctrica en el trópico, la cual fue calculada en 9,95 km, con una altura máxima de 15,9 km y una mínima de 3,5 km. Para ver la evolución de los centros de carga, se graficó la variación de su altura en función del tiempo durante todo el evento de tormenta. En la figura 2 se observa el diagrama de dispersión de la altura de los centros de carga

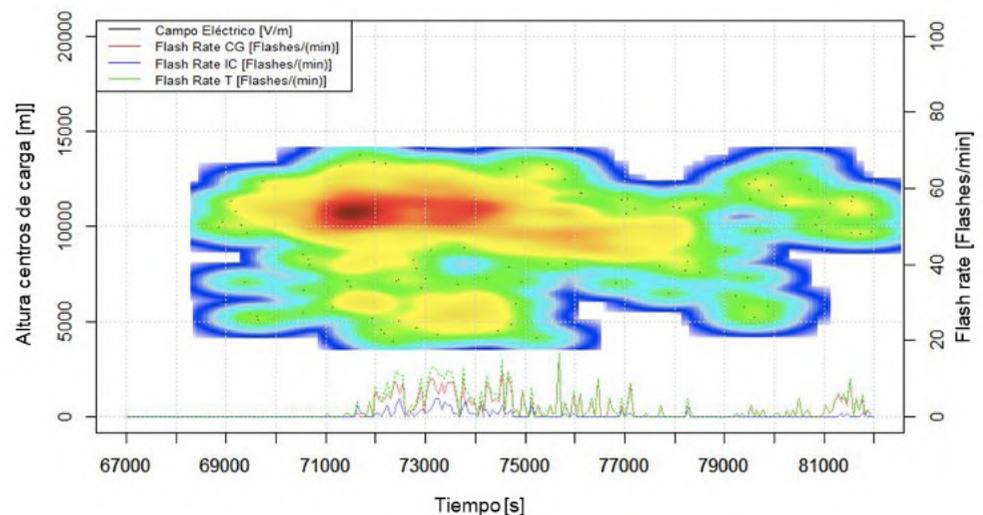


Figura 2. Altura centros de carga y *flash rate* (Castro, 2019)

eléctrica durante un evento de tormenta. Se evidencia que el modelo de carga puntual se ajusta para determinar la altura de la carga eléctrica, como lo comprobaron **Maggio, et al.** (2009), quienes evaluaron varios modelos con diferentes métodos teóricos y llegaron a la misma conclusión.

En la tesis de doctorado de **López** (2019) se presenta la caracterización de estructuras eléctricas y líderes de rayos en tormentas y su relación con los inicios de los TGF. La investigación aporta información detallada sobre las distribuciones de carga eléctrica, sus límites espaciales, su desarrollo vertical, la evolución durante su ciclo de vida, la identificación de centros de carga y las distribuciones de carga complejas.

La caracterización derivada de la tesis doctoral y los artículos asociados (**López**, 2017, 2019a) fue de gran interés, primero, para el estudio detallado de las estructuras eléctricas en tormentas tropicales; segundo, en el análisis de la propagación de los líderes de rayos en el trópico; tercero, para determinar las condiciones espaciales y las configuraciones de carga eléctrica que fueron recreadas mediante un modelo de líder y, por último, para el estudio de las condiciones eléctricas favorables en la producción de los TGF.

Por primera vez se instaló un sistema de alta precisión de detección de rayos, el LMA, en regiones tropicales (el caso de Colombia) en dos periodos de instalación: el primero en el 2015, en la ciudad de Santa Marta, y el segundo en el 2018, durante la reubicación del sistema en la ciudad de Barrancabermeja.

Para el estudio de las condiciones de origen de los TGF se tuvieron en cuenta las distribuciones de potencial eléctrico en los dos escenarios de simulación del modelo de líder. En el primer caso, el líder alcanzó un potencial óptimo de aproximadamente 340 MV, y en el segundo caso, de aproximadamente 590 MV, potenciales que concuerdan con los modelos de líderes de rayos recientemente publicados por **Skeltved, et al.** (2017, 2014). En ambos escenarios se introdujo un campo de ionización inicial con energías de 1 MeV y aproximadamente 1.000 electrones semilla en frente del canal del líder a una altura de 15 km.

A partir de los resultados obtenidos (**López**, 2019) puede concluirse que la interacción de un líder que se propaga a 15 km de altura con potencial aproximado de 590 MV y bajo una configuración eléctrica de carga compuesta por 4 capas que generan un campo eléctrico negativo de aproximadamente -874 kV/m, podría ser la condición en la que se originan los TGF.

En la **figura 3** es posible observar los espectros de luz de simulación de los TGF, con la curva de luz a lo largo de la trayectoria del líder negativo entre 14 y 16 km de altura.

En la tesis de **Chaves** (2021) se propone una metodología que utiliza algoritmos computacionales para el agrupamiento de zonas *hotspots*, las cuales se caracterizan por tener una alta densidad de rayos. En general, los criterios principales de la metodología consideran una región como *hotspot* si en ella se reporta un número determinado de rayos a tierra al año que se conserva durante todos los años de recopilación y análisis de la información, así como la combinación de la cantidad de años en los cuales ocurren dichas descargas y los filtros por intensidad de corrientes. **López** (2019), propone una metodología para la identificación de regiones o estructuras en las que el fenómeno se presenta de forma repetitiva. El criterio principal de la metodología es determinar aquellas zonas en las que se reporta al menos un número de rayos a tierra al año y su recurrencia se conserva durante todos los años evaluados. La metodología se validó con el análisis del comportamiento de los rayos registrados en el periodo de 2012 a 2018.

El estudio confirmó la poca actividad de descargas eléctricas atmosféricas sobre el océano, el ciclo diurno en la mayoría de las regiones continentales y la máxima densidad de relámpagos en la estación de verano, y, además, clasificó la densidad de la tasa de destellos para identificar los puntos de acceso a la Tierra. En el caso de Suramérica (**Figura 4**), el *hotspot* de mayor influencia se detectó sobre el lago Maracaibo en Venezuela, donde los rayos ocurren 297 días al año, con un pico en el mes de septiembre, seguido de Cáceres, el Tarra, Norcasia, Majagual, Turbo y Barrancas en Colombia, con una densidad de descargas a tierra entre 95,38 y 172,29 destellos-km²/año).

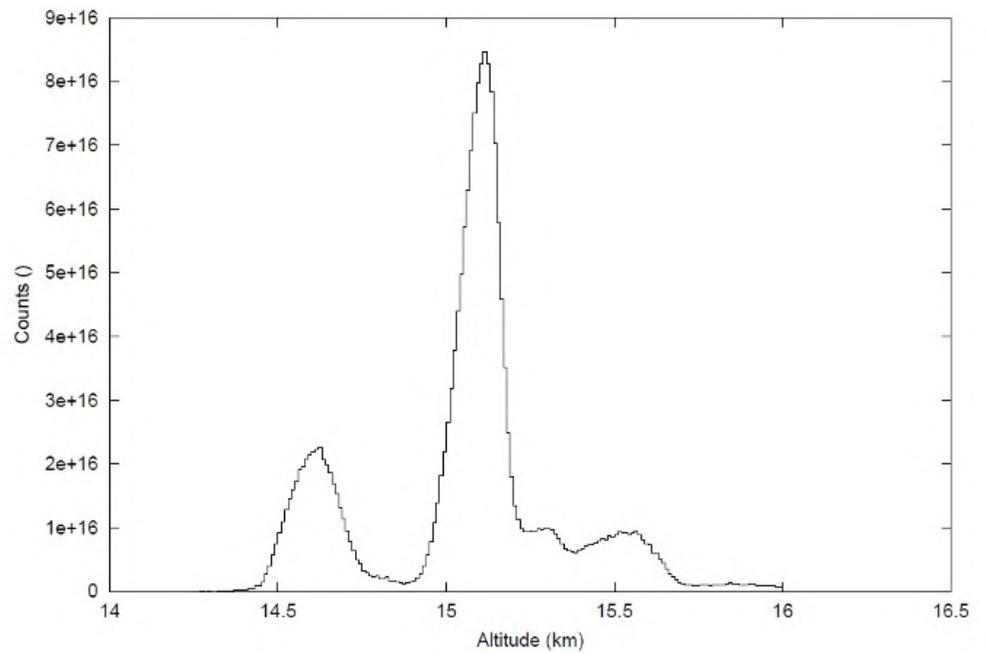


Figura 3. Espectros de luz de simulación de los TGF. Tomados de **Lopez J.A** (2019)

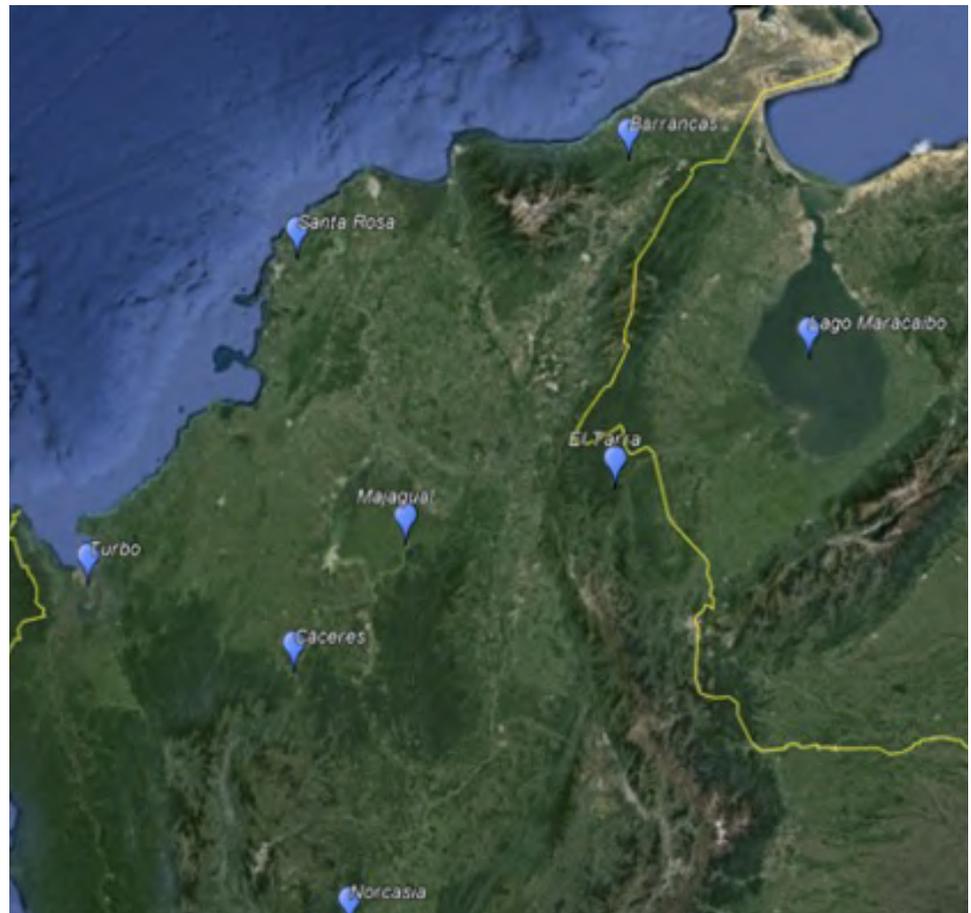


Figura 4. Clasificación de los principales *hotspots* en Suramérica (**Chaves**, 2021)

Por último, se presenta la evaluación de los impactos de rayos en estructuras elevadas localizadas en la región de estudio. Los impactos de rayos en estructuras elevadas se han considerado en un gran número de estudios teóricos y experimentales, pues se busca reducir los niveles de riesgo tolerables para evitar la exposición de las personas y las estructuras, así como reducir los costos de mantenimiento.

Con los resultados del *kit* de observatorio instalado en la Estación Espacial Internacional en el 2018, se están evaluando constantemente los nuevos parámetros, los cuales se contrastan con los resultados terrestres en la estación Dabeiba para así continuar con esta investigación que en los próximos años y décadas entregará nuevas interpretaciones y certezas sobre las descargas eléctricas nube-ionosfera en la región tropical.

El proyecto *Atmosphere Space Interaction Monitor (ASIM)*

El proyecto ASIM nació para tratar de entender los fenómenos electromagnéticos de los TGF y TLE; para ello hay que situar los instrumentos de medición fuera de nuestra atmósfera, en el espacio exterior, y desde allí estudiar las tormentas. La primera idea del proyecto data de 2003 y fue promovida por la Universidad Politécnica de Dinamarca, pero el proyecto comenzó a desarrollarse en el 2010.

Las universidades que lideran el proyecto son la de Dinamarca, la de Bergen (Noruega) y la Universitat de València - UV. En España, la UV coordina la labor de la Universitat Politècnica de Catalunya, el Instituto de Astrofísica de Andalucía, la Universidad Rey Juan Carlos y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

El principal objetivo científico del proyecto ASIM es establecer la correlación espacio-temporal entre los fenómenos TLE, TGS y los rayos nube-tierra, así como desarrollar un modelo unificado que explique sus escalas extraordinariamente diferentes en términos de frecuencia (¿1-100 rayos nube-tierra por segundo?, ¿1 TLE por hora?, ¿1 TGF por día?).

El proyecto ASIM se ha beneficiado de la cooperación con la Universidad Nacional de Colombia (grupo de investigación PAAS-UN) desde el 2018 bajo la dirección del profesor Horacio Torres, con el fin de establecer una red de sistemas ópticos para monitorear la actividad de TLE de esta región. La Universidad tiene varios sitios disponibles que cubren áreas continentales como Santa Marta y en el mar Caribe, como la isla de San Andrés. La firma colombiana Keraunos apoya este proyecto con las redes de molinos de campo eléctrico y los datos de la red LINET de detección de rayos.

Para la medición de estos fenómenos fuera de nuestra atmósfera, la Agencia Aeroespacial Europea (ESA) recibió en Valencia, España, el *kit* de observatorio ASIM. Las universidades de Dinamarca y de Valencia en España se encargaron del diseño y la construcción de un sistema de fotografía, video y almacenamiento de estos fenómenos desde el espacio. El *kit* de observatorio fabricado se ubicó en la Estación Espacial Internacional (EEI) mediante el lanzamiento de un cohete SpaceX el 2 de abril de 2018 y quedó instalado en el módulo Columbus de la Agencia Aeroespacial Europea, ver **figura 5**. Una vez que el

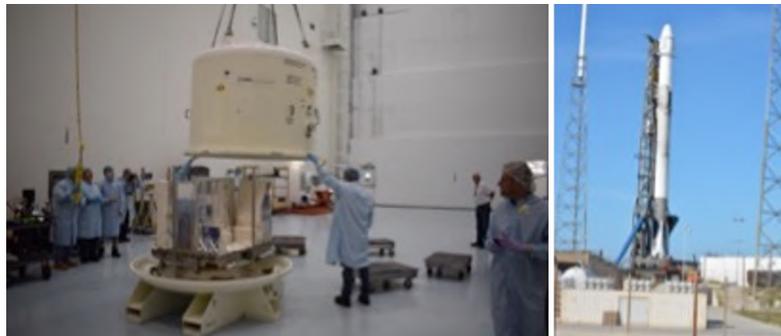


Figura 5. *Kit* de observatorio en las instalaciones de la NASA en Cabo Cañaveral, Florida, el 2 de abril de 2018?, instaladas en la EEI. Fotografías facilitadas por J. Montanyà (UPC, España).

kit fue adosado al Columbus, su misión ha sido medir los fenómenos que se registran por encima de las grandes tormentas. Su detector de altas energías permitirá obtener nuevos datos sobre los violentos estallidos de rayos gamma terrestres.

El *kit* de observatorio estará dedicado a la observación de la Tierra en los rangos ópticos UV, X y gamma de amplio campo (en el caso de los gamma en toda la Tierra) con equipos ópticos dotados de alta resolución espacial y muy elevada resolución temporal (10-5 segundos) para realizar observaciones simultaneas y sistemáticas de los TGF y los TLE desde el espacio a unos 400 km de distancia de la tierra.

La elección de la Estación Espacial Internacional (EEI) se consideró la más adecuada, ya que permite una operación más sencilla que la requerida con un satélite, así como la recuperación de la instrumentación y su mejora y del volumen de datos a almacenar antes de enviar a la Tierra (crítico en el caso de las cámaras con memoria de tbites por segundo).

El *kit* de observatorio estará continuamente en operación obteniendo datos, pero solo almacenará el equivalente a 1 segundo de ellos cuando los fotómetros accionen el disparador. Los mecanismos de definición del disparador son críticos, al igual que los tiempos de reacción. Cuando el disparador se acciona, se almacena 1 segundo de datos (+0,5 segundos), tiempo más que suficiente para fenómenos entre los 1 a 2 milisegundos (TGF) y los 100 milisegundos de duración (espectros).

La cuestión del disparador es fundamental en el proyecto ASIM, ya que es absolutamente imposible enviar a tierra o guardar los datos de las cámaras del *kit*, que equivalen a 2 megapíxeles. Cuando producen imágenes por debajo del milisegundo generan Tbits por segundo de datos. El *buffer* de memoria almacena 1 segundo de datos en el sensor óptico, los cuales son reemplazados automáticamente.

La contribución de Colombia a través del grupo de investigación PAAS-UN de la Universidad Nacional y la firma Keraunos se concretó en la instalación en la ciudad de Santa Marta de un observatorio de antenas terrestres conocido como *Lightning Mapping Array* (LMA), que es un sistema tridimensional de localización de rayos totales (**Figura 6**), así como de la información de la red de datos de tormentas eléctricas atmosféricas LINET de propiedad de la firma Keraunos. El análisis de datos del observatorio LMA en

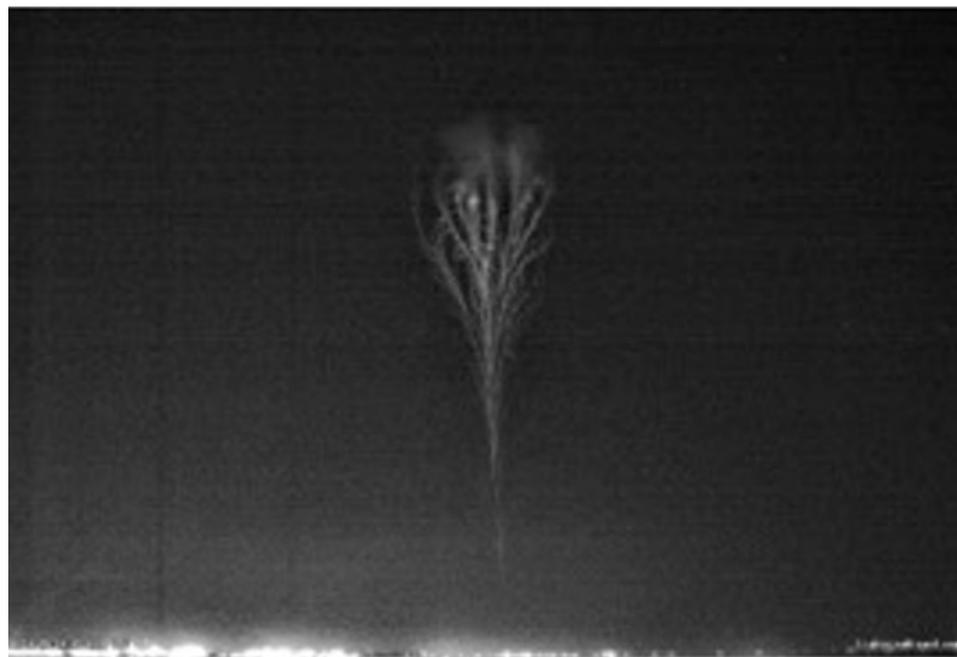


Figura 6. *Jet* gigante capturado en Colombia el 14 de agosto de 2017 cerca del aeropuerto de Santa Marta. Fotografía tomada por Oscar Van der Velde y J.A. López

Santa Marta y el proyecto de doctorado del ingeniero colombiano Jesús López han sido fundamentales para entender los fenómenos terrestres que luego han sido base del trabajo del proyecto ASIM en universidades europeas (Cataluña, Valencia, Dinamarca, Noruega) para el entendimiento del fenómeno terrestre, que ahora se espera desarrollar desde la Estación Espacial Internacional.

En el 2015 se montaron siete antenas alrededor de Santa Marta, desde donde se captura la actividad de descargas eléctricas nubes-ionósfera. Estas antenas fueron trasladadas en el 2018 a la ciudad de Barrancabermeja, pues se ha establecido que la zona del Catatumbo, incluida el área de Venezuela, es la de más alta actividad de rayos en el mundo (**Albrecht, et al.**, 2016). A esta estación de investigación en rayos se le ha dado el nombre de Dabeiba, en honor a la bella princesa indígena, sabia y divinizada, de la tribu de los Emberá Katio, parientes de los Cuevas y los Chibchas, que viven en el norte del actual departamento de Antioquia, Colombia (**Galindo, et al.**, 2003).

Conclusiones

Se presenta en este artículo la nueva etapa de la investigación sobre los rayos, cuyos primeros resultados auguran en el futuro el logro de nueva información comprobada en torno al fenómeno de las descargas eléctricas atmosféricas nube-ionosfera.

Con el apoyo de la Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol) y mediante una alianza estratégica con la Universidad Industrial de Santander (UIS), se mantiene actualmente la Estación Experimental Dabeiba en Barrancabermeja, que constituye uno de los mayores centros de medición de rayos del mundo con equipos desarrollados en Colombia, como los molinos de campo eléctrico, una red de antenas con tecnología LMA que ha recibido el nombre de COLLMA, y el sistema de medición de rayos con una red de 21 antenas LINET de propiedad de la firma colombiana Keraunos. Con los datos que aquí se generen y la información proveniente de la Estación Espacial Internacional de la NASA, podremos seguirle los pasos a los duendes luminosos o elfos, lo que podría arrojar luz en un futuro sobre las muchas preguntas y proyectos surgidos de esta investigación que lleva más de cuatro décadas en Colombia, entre los cuales se destacan los estudios sobre la relación de los fenómenos electromagnéticos TGF y TLE con el calentamiento global; la posibilidad de llevar a feliz término la idea de Tesla de principios del siglo XX sobre los rayos y la transmisión de potencia eléctrica sin hilos, y concretarla en una patente (Torres, 2018); el establecimiento de la correlación espacio-temporal entre estos fenómenos (TLE, TGS y rayos nube-tierra), y el desarrollo de un modelo unificado que explique sus escalas extraordinariamente diferentes en términos de frecuencia (ζ 1-100 rayos nube-tierra por segundo?, ζ 1 TLE por hora?, ζ 1 TGF por día?); el estudio de los líderes ascendentes originados por estructuras elevadas en tierra en regiones tropicales y las implicaciones que tendrían en la protección de aerogeneradores; la identificación de puntos de acceso de rayos a tierra en regiones tropicales como Colombia para proteger las torres de comunicación, los aerogeneradores, las torres de energía eléctrica, entre otras; la medición de la resonancia de Schumann y el potencial ionosférico en el trópico, y los estudios que permitan una mejor comprensión de los procesos de electrificación durante las tormentas en el trópico mediante sistemas como el LMA y la información de radares meteorológicos.

En el futuro será necesario desarrollar estudios más detallados de las condiciones meteorológicas durante la propagación de líderes de rayos utilizando el sistema LMA e incluyendo la información de los radares meteorológicos, especialmente en regiones tropicales, estudios que permitirían entender mejor los procesos de electrificación durante las tormentas en el trópico.

Estas y muchas más preguntas y proyectos encontrarán respuestas científicas que serán la base de innovaciones tecnológicas que apenas sospechamos. El trabajo continuo, sistemático y riguroso abrirá el camino a dichas respuestas, porque como bien lo señaló Sir Francis Bacon: *La verdad es hija del tiempo, no de la autoridad.*

Conflicto de intereses

Declaro no tener ningún conflicto de intereses real, potencial o aparente, ni ninguna relación económica, personal o política que pueda influir en mi juicio.

Referencias

- Albrect, R.I., Goodman, S.J., Buechler, D.E., Blakeslee, D.J., Christian, H.J.** (2016). Where are the lightning hotspots on Earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*. **97**: 2051-2068. Doi: 10.1175/BAMS-D-14-00193.1
- Aranguren, D., López, J., Inampué, J., Torres, H., Betz, H.** (2017). Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. Edit Elsevier, Volume 154, February 2017, Pages 182-189.
- Castro, J.F.** (2019). Metodología para la identificación de la estructura eléctrica típica del rayo en el trópico. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Chaves, J.** (2021). Impactos de rayos en estructuras elevadas localizadas en zonas de alta actividad de rayos en Colombia. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2021.
- Cooray, V.** (2018). Latitude dependence of peak lightning return stroke current- A theoretical explanation. 34th Int. Conf. Light. Prot. ICLP 2018, pp. 4-6.
- Cummer, S. A., Zhai, Y., Hu, W., Smith, D. M., López, L. L., Stanley, M. A.** (2005). Measurements and implications of the relationship between lightning and terrestrial gamma ray flashes, *Geophys. Res. Lett.* **32**: L08811. Doi: 10.1029/2005GL022778
- Fabro F., Montanyà, J., Marisaldi, M., van der Velde, O. A., Fuschino, F.** (2015). Analysis of global Terrestrial Gamma Ray Flashes distribution and special focus on AGILE detections over South America. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. **124**: 10-20. Doi: 10.1016/j.jastp.2015.01.009
- Galindo, M., García, C.A, Valencia, J.** (2003). Mitos y leyendas de colombia: tradición oral indígena y campesina. Intermedio Editores, Círculo de Lectores. <http://unperiodico.unal.edu.co/pages/detail/hunting-energy-elves-emission-of-light-and-very-low-frequency-perturbations-due-to-electromagnetic/>
- López J.A.** (2019). Investigación de las estructuras eléctricas y líderes de rayos en tormentas. Aportaciones a las condiciones de inicio de rayos gamma terrestres. PhD Tesis Universidad Politécnica de Barcelona, España.
- López, J., Montanyà, J., van der Velde, O.A., Pineda, N., Salvador, A., Romero, D., Aranguren, D. Taborda, J.** (2019a). Charge structure of two tropical thunderstorms in Colombia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. **124**: 5503-5515. <https://doi.org/10.1029/2018JD029188>
- López, J., Pineda, N., Montanyà, J., van der Velde, O.A., Ferrán F., Romero, D.** (2017). Spatio-temporal dimension of lightning flashes based on Three-Dimensional Lightning Mapping Array. *Journal of Atmospheric Research*. **197**: 255-264.
- Mackerras, D. & Darveniza, M.** (1994). Latitudinal variation of lightning occurrence characteristics. *JFR*. Vol. 99, 1994. 20 May 1994, <https://doi.org/10.1029/94JD00018>
- Maggio, C.R., Marshall, T.C., Stolzenburg, M.** (2009). Estimations of charge transferred and energy released by lightning flashes. *J. Geophys. Res. Atmos.* **114** (14): 1-18.
- March, V.** (2011). Emisiones de rayos X en impulsos de alta tensión. Caracterización del mecanismo de producción de electrones de escape, Tesis para PhD. Universidad Politécnica de Barcelona, España.
- Naccarato, K.P.** (2006). Analysis of the lightning characteristics in the Southeast region of Brazil. PhD Thesis. INPE. 258 p.
- Orville, R.** (1990). Peak-current variations of lightning return strokes as a function of latitude. *Nature*. **343**: 149-151. <https://doi.org/10.1038/343149a0>.
- Sentman, D.D. & Wescott, E.M.** (1993). Observations of upper atmospheric optical flashes recorded from an aircraft. *Geophys. Res. Lett.* **20**: 2857-2860.
- Skelved, A. B., Østgaard, N., Carlson, B., Gjesteland, T., Celestin, S.** (2014). Modeling the relativistic runaway electron avalanche and the feedback mechanism with GEANT4. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **119** (11): 9174-9191. Published online 2014 Nov 3. doi: 10.1002/2014JA020504
- Skelved, A. B., Østgaard, N., Mezentsev, A., Lehtinen, N., Carlson, B.** (2017). Constraints to do realistic modeling of the electric field ahead of the tip of a lightning leader. *Journal of Geophysical Research*. **122** (15): 8120-8134. Published online 2017 Aug 5. doi: 10.1002/2016JD026206.

- Smith, D. M., Lopez, L., Lin, R.P., Christopher P., Barrington-Leigh.** (2005). Terrestrial Gamma-Ray Flashes Observed up to 20 MeV. *Rev Science* 18 Feb. **307** (5712): 1085-1088. DOI: 10.1126/science.1107466.
- Splitt, M.E., Lazarus, S. M., Barnes, D., Dwyer, J. R., Rassoul, H. K., Smith, D. M., Hazelton, B., Grefenstette, B.** (2010). Thunderstorm characteristics associated with RHESSI identified terrestrial gamma ray flashes. *JGR*. **115**: A06319. Doi: 10.1029/2009JA014622
- Stanford Encyclopedia of Philosophy. Science and Social Philosophy.** (2003). Francis Bacon punto 6. ÉNDOXA: Series Filosóficas, n.º 17. 2003. pp. 227-249. UNED, Madrid. ISSN (versión electrónica): 2174-5676
- Torres, H.** (2018). El enigma del electromagnetismo bajo la lupa. ISBN 978-620-2-15081-1. Editorial Académica Española. EAE Publishing LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG.
- Torres, H.** (2017). La interdisciplinariedad en la ciencia del rayo. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **41** (159): 174-186. Doi: 10.18257/raccefyn.475
- Torres, H., Pérez, E., Younes, C., Aranguren, D., Montaña, J., Herrera, J.** (2015). Contribution to Lightning Parameters Study Based on Some American Tropical Regions Observations. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing.* **8** (8): 4086-4093.
- Torres, H.** (2015). El rayo en el trópico ISBN 978-958-775-454-4 Colección apuntes maestros, Ed. UN, Bogotá, Colombia, 2015a.
- Torres, H.** (1998). Espacio y tiempo en los parámetros del rayo, ensayo sobre una hipótesis de investigación. Trabajo de investigación presentado a la Universidad Nacional de Colombia para promoción a la categoría de Profesor Titular. Bogotá, UN.
- Torres H., Barreto T., Enciso L.** (1994). Multiple Time Series analysis in tropical lightning research. *Proceedings 22nd ICLP, Budapest - Hungary, Sep. 1994.* ISBN 963 420 441 4.
- Williams, E.R.** (2006). Problems in lightning physics-the role of polarity asymmetry. *Plasma Sources Sci. Technol.* **15**: S91-S108. Doi:10.1088/0963-0252/15/2/S12
- Williams, E., Boccippio, D., Petersen, W., Rutledge, S., Ishii, M., Hidayat, S., Torres, H., Jayaratne, R., Yair, Y., Levin, Z., Mackerras, D.** (1996). Latitude Dependence of Ground Flash Density in the Tropics and Subtropics. *Amer. Geo. Union. Meeting, San Francisco.*
- Younes, C.** (2006). Methodologies for correlating lightning parameters with geographical and meteorological characteristics – Colombian case (in Spanish) - PhD Thesis. National University of Colombia, Bogotá, Colombia.

Artículo original

Una nueva especie y nuevos registros de líquenes en Colombia y Suramérica en el bosque seco tropical de la cuenca media del río Cauca

A new species and new records of lichens for South America and Colombia from the tropical dry forest in the middle basin of the Cauca River

Edier Alberto Soto-Medina¹, Alejandro Castaño-Naranjo¹, Jonathan Granobles¹,
André Aptroot²

¹Grupo de Biodiversidad Neotropical, Instituto para la Investigación y la Preservación del Patrimonio Cultural y Natural del Valle del Cauca- INCIVA, Cali, Colombia

²Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS, Campo Grande, Brasil.

Resumen

Se reportan por primera vez en Colombia las especies de líquenes *Bapalmuia costaricensis* Lücking & Kalb, *Herpothallon confluenticum* Aptroot & Lücking, *Herpothallon nigroisidiatum* G. Thor. y *Herpothallon rubromaculatum* G. Thor, y por primera vez en Suramérica *Pyrenula cryptothelia* (Müll. Arg.) Aptroot & Etayo. Estos nuevos registros provienen del bosque seco tropical de la cuenca media del río Cauca, un ecosistema muy amenazado en Colombia. También se describe una nueva especie, *Synarthonia robertiana* Soto & Aptroot, con ascomas UV+ amarillo.

Palabras clave: Líquenes; Cortícolas; Epífitos; Valle del Cauca.

Abstract

Species of lichens *Bapalmuia costaricensis* Lücking & Kalb, *Herpothallon confluenticum* Aptroot & Lücking, *Herpothallon nigroisidiatum* G. Thor, and *Herpothallon rubromaculatum* G. Thor are reported for the first time for Colombia, and *Pyrenula cryptothelia* (Müll. Arg.) Aptroot & Etayo is registered for the first time for South America. These new records come from the tropical dry forest of the middle Cauca River basin, a highly threatened ecosystem in Colombia. A new species, *Synarthonia robertiana* Soto-M. & Aptroot, with UV+ yellow ascomas is also described.

Keywords: Lichens; Corticolous; Epiphytes; Valle del Cauca.

Introducción

Actualmente se considera que los líquenes constituyen una comunidad formada por un hongo del filo Ascomycota o Basidiomycota, un alga verde o una cianobacteria, y un microbioma asociado (Hawksworth & Grube, 2020). Estos organismos son muy diversos, especialmente en los trópicos, pero los inventarios son muy escasos en esta región (Sipman & Aptroot, 2001; Lücking, *et al.*, 2009). En el Neotrópico el grupo más diverso de líquenes son los cortícolas, pero dadas las tasas actuales de deforestación en la región (Lücking, *et al.*, 2009), es un imperativo determinar la línea de base que permita un mejor conocimiento de la diversidad y las consecuencias de la deforestación para este grupo de organismos.

Los bosques secos son ecosistemas con una marcada estacionalidad en la que los períodos de sequía se ven interrumpidos por meses lluviosos. Formalmente, un bosque seco tropical (BST) se define como un bosque con un dosel cerrado, donde la precipitación

Citación: Soto-Medina EA, Castaño-Naranjo A, Granobles J, Aptroot A. Una nueva especie y nuevos registros de líquenes en Colombia y Suramérica en el bosque seco tropical de la cuenca media del río Cauca. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):415-420, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1322>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Edier Soto, ediersot@gmail.com

Recibido: 8 de octubre de 2020

Aceptado: 23 de diciembre de 2020

Publicado: 17 de junio de 2021



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

media anual es menor a 1.800 mm, con períodos de 3 a 6 meses en los que la precipitación es menor a 100 mm por mes y durante los cuales la vegetación es decidua (Murphy & Lugo, 1986; Gentry, 1995; Sánchez-Azofeifa, *et al.*, 2005). En Colombia el bosque seco se restringe al Caribe y los valles interandinos, con enclaves subxerofíticos en varias zonas del país. Es el ecosistema más amenazado de Colombia, pues solo queda el 5 % del bosque seco original. En el Valle del Cauca las áreas de BST están localizadas en el piedemonte de las cordilleras Central y Occidental, en varios enclaves subxerofíticos de las cuencas de los ríos Bugalagrande, Tuluá, Amaime, Dagua y Garrapatas, estos dos últimos ubicados en la vertiente occidental de la cordillera Occidental, con dirección al Pacífico, y de ellos se conserva cerca del 3 %. Se estima que en la cuenca media del río Cauca quedan menos de 500 ha de bosque seco (Ramos-Pérez & Silverstone Sopkin, 2018).

De ahí la importancia de conocer la diversidad de líquenes en Colombia, especialmente en el bosque seco tropical, quizás el menos explorado en términos de estos organismos: solo se registran estudios en la costa Caribe y en el departamento de Meta (Rincón-Espitia, *et al.*, 2011; Peláez, *et al.*, 2013; Lücking, *et al.*, 2019). En ese contexto, el objetivo del presente estudio fue dar a conocer nuevos registros de líquenes en Colombia y Suramérica a partir de muestreos llevados a cabo en el bosque seco tropical de la cuenca media del río Cauca.

Materiales y métodos

El material estudiado fue depositado en los herbarios TULV del INCIVA y CUVC de la Universidad del Valle, Colombia. Los especímenes se recolectaron en el marco del proyecto “Contribución a la conservación del bosque seco tropical del Valle del Cauca a través del fortalecimiento, Valle del Cauca, Occidente, acuerdo OCAD N° 61 del 7/11/2017 BPIN_2016000100013 del 7 de noviembre, 2017”.

Las muestras se determinaron examinando las características del talo y los ascomas, así como el tipo y el tamaño de las ascosporas. El material se revisó con la ayuda de un estereoscopio (Yaxun Yx Ak21) y un microscopio (Carl Zeiss Jena). Las ascosporas se midieron con una regla micrométrica. Todas las fotografías de las muestras se tomaron con una cámara digital Canon PowerShot SX16. También se hicieron ensayos químicos con reactivos K (hidróxido de potasio al 10 %), C (hipoclorito de sodio al 10 %) y de Lugol para el caso del himenio y las ascosporas. Se usaron las claves para líquenes folícolas del Neotrópico (Lücking, 2008) *Herpothallon* (Aptroot, Thor, Lücking, Elix, & Chavez, 2009) y para *Pyrenula* del trópico (Aptroot, Lücking, Sipman, Umaña, & Chavez, 2008)

Resultados y discusión

Bapalmuia costaricensis Lücking & Kalb

Fig. 1

Descripción. Talo cortícola, costroso, liso, verde. Apotecios sésiles, con base amplia a estrecha, base blanca, 1 a 2 mm de diámetro; margen grueso, bisoide, blanco. Himenio hialino, subhimenio K+ naranja. Ascosporas hialinas, filiformes, con 20 a 29 septos, de 70 a 90 × 2,5 a 3,5 μm.

Distribución y ecología. Especie asociada a sotobosque y microsítios cerrados. Se conoce en Costa Rica y Ecuador en bosques de elevaciones bajas a premontanas (Lücking, 2008). En Colombia se ha registrado en el bosque seco tropical del valle geográfico del río Cauca. En el Valle del Cauca es el segundo reporte del género, pues ya *Bapalmuia palmularis* había sido registrada en un bosque húmedo tropical en la localidad de quebrada Pericos (Soto, *et al.*, 2020).

Bapalmuia costaricensis se reconoce fácilmente por sus apotecios con disco negro y margen grueso blanco. Este es el primer registro cortícola de esta especie asociado con otras especies cortícolas. En Colombia se han reportado dos especies de este género (*Bapalmuia araracuarensis* Sipman & Lücking, *Bapalmuia palmularis* (Müll.Arg.) Sérus). Estas especies ocurren en bosques húmedos de la Amazonía, Chocó y los Andes, pero este nuevo registro es el primero del género en el bosque seco tropical.

- Clave para especies de *Bapalmuia* en Colombia
- 1. Talo verrugoso; ascosporas de 30^a 40 μm de longitud, 3 a 7 septos (Amazonas) *B. araracuarensis*
 - 1'. Talo liso; ascosporas de 70 a 130 μm de longitud, 19 a 35 septos 2
 - 2. Margen del apotecio grueso, persistente, disco negro (BST Valle) *B. costaricensis*
 - 2'. Margen delgado, evanescente, marrón claro (Amazonía, Chocó biogeográfico y Andes) *B. palmularis*

Espécimen examinado. COLOMBIA: Departamento de Valle del Cauca, municipio de Yotoco, bosque seco tropical, Hacienda El Volcán, 04°01,284' N 076°21,769 O, ca. 1.100 m. 22-08-2020. Soto 785 (TULV).

***Herpothallon confluenticum* Aptroot & Lücking**

Fig. 1

Descripción. Talo cortícola, costroso, liso, gris claro a verde, bisoide, protalo blanco, hipotalo blanco. Pseudoisidios abundantes, cilíndricos, ramificados como coliflor en los ápices, grises y bisoides. Picnidios en los extremos de los picnidios. Talo K-, C-.

Distribución y ecología. Especie asociada a micrositios semiabiertos. Distribución pantropical desde Australia hasta Venezuela (Aptroot, *et al.*, 2009).

Espécimen examinado. COLOMBIA: Departamento Valle del Cauca, municipio de Bugalagrande, bosque seco tropical, Hacienda La Venta, 04°11,844' N 076°04,752 O, ca. 1100 m. 24-08-2020. Soto 106LV (TULV).

***Herpothallon nigroisidiatum* G. Thor**

Fig. 1

Descripción. Talo cortícola, costroso, liso, gris claro a verde con manchas rojas, bisoide, protalo naranja claro, hipotalo negro. Pseudoisidios abundantes, cilíndricos, largos, bisoides, rojo anaranjados. Picnidios ausentes. Talo K+ rojo a purpura, C-.

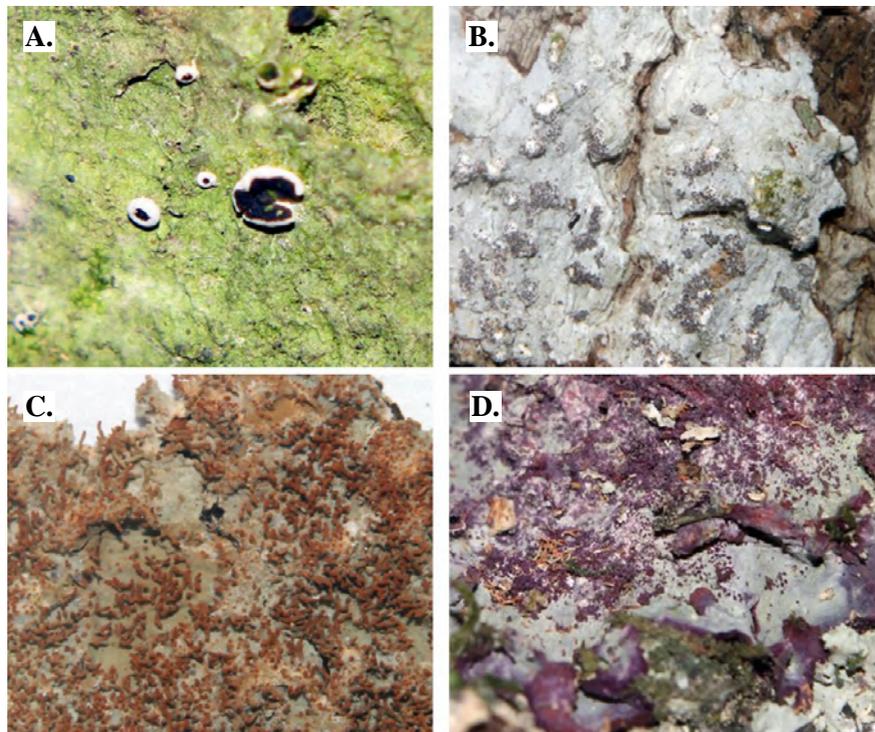


Figura 1. *Bapalmuia costaricensis* (A), *Herpothallon confluenticum* (B), *Herpothallon nigroisidiatum* (C) y *Herpothallon rubromaculatum* (D)

Distribución y ecología. Especie asociada a microsítios semiabiertos. Se conoce solo en su localidad tipo en un bosque subandino en Perú (Aptroot, *et al.*, 2009). En Colombia se registra en el BST de la cuenca media del río Cauca.

Herpothallon nigroisidiatum es muy similar a otras especies con protalo e isidios rojizos, pero su hipotalo negro la diferencia fácilmente. Además, los pseudoisidios son cilíndricos y largos.

Espécimen examinado. COLOMBIA: Departamento de Valle del Cauca, municipio de Bugalagrande, bosque seco tropical, Hacienda La Venta, 04°11,844' N 076°04,752 O, ca. 1.100 m. 24-08-2020. Soto 106LV (TULV).

Herpothallon rubromaculatum G. Thor

Fig. 1

Descripción. Talo cortícola, costroso, liso, gris claro a verde con manchas purpuras, bisoide, protalo e hipotalo púrpuras. Pseudoisidios abundantes, cilíndricos, cortos, bisoides, púrpuras. Picnidios ausentes. Talo K+ rojo a púrpura, C-.

Distribución y ecología. Especie asociada a microsítios semiabiertos. Se conoce en bosques húmedos amazónicos de Perú y Venezuela (Aptroot, *et al.*, 2009). En Colombia se registra en el bosque seco tropical del valle geográfico del río Cauca.

Espécimen examinado. COLOMBIA: Departamento de Valle del Cauca, municipio de Bugalagrande, bosque seco tropical, Hacienda La Venta, 04°11,844' N 076°04,752 O, ca. 1.100 m. 24-08-2020. Soto 106LV (TULV).

En el catálogo de plantas y líquenes de Colombia se registran ocho especies de *Herpothallon*: *H. aurantiacoflavum* (B.de Lesd.) Aptroot, *et al.*, *H. furfuraceum* G.Thor, *H. globosum* G.Thor, *H. minimum* Aptroot & Lücking, *H. mycelioides* (Vain.) Aptroot, *et al.*, *H. pustulatum* G.Thor, *H. roseocinctum* (Fr.) Aptroot, *et al.* y *H. rubrocinctum* (Ehrenb.) Aptroot, *et al.* Con estos tres nuevos registros, entonces, el número de las especies de *Herpothallon* reportadas en Colombia aumenta a 11.

Pyrenula cryptothelia (Müll. Arg.) Aptroot & Etayo

Fig. 2

Descripción. Talo cortícola, costroso, liso, verde oliva, con pseudocifelas. Entre 2 y 7 peritecios agregados, erumpentes, 0,8 mm de diámetro; ostiolo pálido, lateral. Himenio hialino, subhimenio IKI+ naranja. Ascosporas marrones, con 3 septos, de 35 a 45 × 18 a 22 μm.

Distribución y ecología. Especie asociada a microsítios semiabiertos. Se conoce en Centroamérica (Costa Rica, Panamá y México) en bosques de elevaciones bajas a premontanos (Aptroot, *et al.*, 2009), por lo que este constituye el primer registro en Suramérica. En Colombia se registra en el bosque seco tropical del valle geográfico del río Cauca.

Pyrenula cryptothelia se reconoce fácilmente por sus peritecios agregados y pseudocifelas de gran tamaño, que la diferencian de *Pyrenula cubana* (Aptroot, *et al.*, 2008). En Colombia se reportan 48 especies de *Pyrenula* (Lücking, *et al.*, 2020), lo que eleva a 49 el número de especies registradas en el país.

Espécimen examinado. COLOMBIA: Departamento de Valle del Cauca, municipio de Bugalagrande, bosque seco tropical, Hacienda La Venta, 04°11,844' N 076°04,752 O, ca. 1.100 m. 24-08-2020. Soto 106LV (TULV).

Synarthonia robertiana Soto-M & Aptroot, sp. nov.

Fig. 3

MYCOBANK MB 839248

Una nueva especie que presenta ascomas con liquenxantona (UV+ amarillo) como en *S. xanthosarcographoides*, pero con esporas hialinas, 3 a 4 septos y 28 a 32 x 9 a 14 μm.

TIPO: COLOMBIA. VALLE DEL CAUCA: municipio de Riofrío, Hacienda La Gitana, ca. 1.150 m, 4,1666 N, 76,336 O, sobre corteza en bosque de transición, 27 de agosto, 2020, E. Soto 158G (holotipo: TULV 19108; isotipo: CUVV).

Descripción. Talo costroso, cortícola, gris opaco a marrón, sin protalo. Fotobionte trentepohliode. Ascomas apotecios, puntiformes, de 0,2 a 0,300 de diámetro, inmersos en un pseudoestroma blanco; disco gris azulado; pseudoestroma ramificado, de 2 a 3 mm de diámetro. Himenio hialino, claro, ca. 70 μm de alto; epihimenio marrón; hipotecio marrón. Ascas globosas, hialinas, de 40 x 30 μm. Ascosporas hialinas, macrocefálicas, 8 por asca, 3 a 4 septos, 28 a 32 x 9 a 14 μm. No se observaron picnidios.



Figura 2. *Pyrenula cryptothelia*

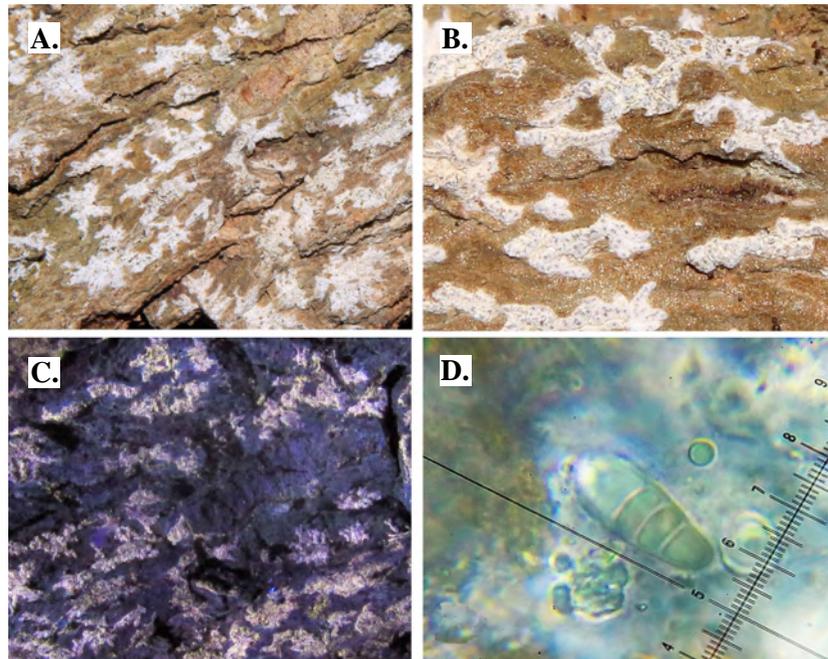


Figura 3. *Synarthonia robertiana*, hábito (A), pseudoecio (B), pseudoecio con UV (C) y ascosporas (D)

Química. Talo UV-, C-, P-, K-; pseudoecio UV+ amarillo (liquenxantona).

Etimología. El nombre es un reconocimiento al Dr. Robert Lücking por su contribución al conocimiento de la liquenobiota colombiana.

Ecología y distribución. Sobre corteza en bosque seco en la cuenca media del río Cauca; solo se conoce en Colombia.

Una especie de *Synarthonia* cortícola similar a *S. sarcographoides* Aptroot, *et al.* y *S. xanthosarcographoides* Aptroot, pero con esporas hialinas y septadas (Menezes, *et al.*, 2013; Aptroot & Spielmann, 2020). Es similar a *S. xanthosarcographoides*, pero esta última presenta ascosporas grises y muriformes, en tanto que esta nueva especie presenta ascosporas hialinas con 3 a 4 septos (Aptroot & Spielmann, 2020).

Agradecimientos

Al INCIVA por el apoyo en la realización del proyecto en el bosque seco; a los dueños de los predios La venta (Bugalagrande), Volcán (Yotoco) y La Gitana (Riofrío) donde fueron recolectadas las muestras.

Contribución de los autores

ESM: muestreo, escritura del manuscrito y fotografía; ACN y JG: muestreo y escritura del manuscrito; AA: escritura del manuscrito

Conflicto de intereses

Los autores declaramos no presentar conflicto de intereses.

Referencias

- Aptroot, A., Lücking, R., Sipman, H.J.M., 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.
- Aptroot, A., Thor, G., Lücking, R., Elix, J., Chavez, J. (2009). The lichen genus *Herpothallon* reinstated. *Biblioth. Lichenol.* **99**: 35.
- Aptroot, A. & Spielmann, A. (2020). New lichen species and records from the Serra da Bodoquena, Mato Grosso do Sul, Brazil, the westernmost Atlantic rain forest. *Archive For Lichenology*. **17**: 1-26.
- Hawksworth, D. & Grube, M. (2020). Lichens redefined as complex ecosystems. *New Phytologist*. **227**: 1281-1283.
- Lücking, R. (2008). Foliicolous lichenized fungi. *Flora Neotropica Monograph*. **103**: 866.
- Lücking, R., Rivas-Plata, E., Chaves, J. L., Umaña L., Sipman H. J. (2009). How many tropical lichens are there really? *Bibliotheca Lichenologica*. **100**: 399-417.
- Lücking, R., Moncada, B., Martínez-Habibe, M. C., Salgado-Negret, B. E., Celis, M., Rojas-Zamora, O., Rodríguez-M, G. M., Brokamp, G., Borsch, T. (2019). Lichen diversity in Colombian Caribbean dry forest remnants. *Caldasia*. **41** (1): 194-214.
- Menezes, A. A., Lima, E. L., Xavier-Leite, A. B., Maia, L. C., Aptroot, A., Cáceres, M. E. S. (2013). New species of Arthoniales from NE Brazil. *Lichenologist*. **45**: 611-617.
- Murphy, P. & Lugo, A. (1986). Ecology of tropical dry forest. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **17**: 67-88.
- Peláez, R., Moncada, B., Lücking, R. (2011). Líquenes asociados a palma de moriche (*Mauritia flexuosa*) y vegetación de bosque de galería en San Martín, Meta. Trabajo de grado. Universidad distrital Francisco José de Caldas.
- Ramos-Pérez, J. E. & Silverstone Sopkin, P. A. (2018). Catálogo de la flora relictual del valle geográfico del río Cauca. St. Louis, 205 p. Missouri Botanical Garden Press.
- Rincón-Espitia A., Aguirre-C. J., Lücking R. (2011). Líquenes cortícolas en el Caribe colombiano (Corticolous lichens in the Caribbean region of Colombia). *Caldasia*. **33** (2): 331-347.
- Sipman H. & Aptroot A. (2001). Where are the missing lichens? *Mycological Research*. **105** (12): 1433-1439.
- Soto, E., Lücking, R., Torres, A., Moncada, B., Aptroot, A., Montaña, J., Díaz, D. (2020). Líquenes cortícolas en el Chocó biogeográfico del departamento del Valle del Cauca. Cali: Universidad del Valle. p. 278.

Artículo original

Rotíferos, copépodos y branquiópodos presentes en un humedal del departamento del Tolima, Colombia

Rotifers, copepods, and branchiopods present in a wetland of the Department of Tolima, Colombia

Helena Carranza-Castillo*, Jonathan Gerardo Gordillo-Guerra, Gladys Reinoso-Flórez

Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

Resumen

La comunidad zooplanctónica es muy diversa en la zona tropical y tiene un papel importante en el flujo de energía de la red trófica, además, su alta tasa de crecimiento le permite responder rápidamente a cambios ambientales en la columna de agua. En este estudio se identificaron hasta el mínimo nivel taxonómico posible los rotíferos, copépodos y branquiópodos en un humedal de zonas bajas del departamento del Tolima, y se estimó su abundancia y las posibles relaciones con las variables fisicoquímicas. Se hicieron muestreos mensuales puntuales utilizando una red de filtrado y en cada época de muestreo se tomaron muestras de agua para el análisis de las variables fisicoquímicas y bacteriológicas. El conteo y la identificación se hicieron con una cámara de sedimentación Sedgwick-Rafter. La comunidad estaba compuesta por 30 géneros, 23 de ellos correspondientes a rotíferos, seguidos de los copépodos con cuatro y los cladóceros con tres. La densidad de la comunidad podría estar condicionada por las precipitaciones y las macrófitas. A nivel fisicoquímico, la alcalinidad fue la única variable con un valor significativo en los muestreos. Por último, los rotíferos presentaron una mayor diversidad, abundancia y riqueza en todos los muestreos debido a su adaptabilidad y dominancia en la zona tropical.

Palabras clave: Rotíferos; Cladóceros; Copépodos; Humedal; Diversidad; Eutrófico.

Abstract

The zooplankton community is highly diverse in the tropical zone. In aquatic ecosystems these organisms play an important role in the energy flow of the food web, also, their high growth rate allows them to respond quickly to environmental changes in the water column. We identified rotifers, copepods, and branchiopods to the lowest taxonomic level possible in a lowland wetland in the Department of Tolima and we estimated their abundance and possible relationships with physicochemical variables. We carried out punctual monthly samplings using a filtering network and we took water samples in each sampling season to analyze the physicochemical and bacteriological variables. Counting and identification were done with the Sedgwick-Rafter sedimentation chamber. The community was composed of 30 genera, rotifers having the best representation with 23 followed by copepods with four, and cladocerans with three. The density of the community could be conditioned by rainfall and macrophytes. At the physicochemical level, alkalinity was the only variable with a significant value in the samplings. Finally, the rotifers had greater diversity, abundance, and richness in all samplings due to their adaptability and dominance in tropical zones such as this one.

Keywords: Rotifers; Cladocerans; Copepods; Wetland; Diversity; Eutrophic.

Citación: Carranza-Castillo H, Gordillo-Guerra JG, Reinoso-Flórez G. Rotíferos, copépodos y branquiópodos presentes en un humedal del departamento del Tolima, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):421-431, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1336>

Editor: Gabriel Roldán

***Correspondencia:**

Helena Carranza-Castillo;
hcarranza@ut.edu.co

Recibido: 24 de octubre de 2020

Aceptado: 19 de enero de 2021

Publicado: 17 de junio de 2021



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

Introducción

El zooplancton es un grupo de organismos de diferentes categorías sistemáticas cuya característica común es el tener la columna de agua como hábitat principal (Esteves, 1998). Está compuesto principalmente por rotíferos y microcrustáceos, especialmente copépodos y cladóceros. Tienen ciclos de vida muy cortos y altas tasas de crecimiento, lo que les

permite responder rápidamente a cambios ambientales (Conde, *et al.*, 2004), su diversidad es alta en las zonas tropicales y en los ecosistemas acuáticos están mejor adaptados a las condiciones de la zona del litoral y mucho menos a las de la zona pelágica (Esteves, 1998).

El zooplancton es abundante y diverso en los ecosistemas lénticos, especialmente en los humedales, ambientes muy dinámicos donde se puede encontrar una disponibilidad constante o temporal del espejo de agua a lo largo del tiempo, según las características de los mismos (Pérez, 2009). Se le conoce, asimismo, por ser reguladores del ciclo hídrico, actúan como reservorios de agua, mejoran la calidad del aire al ser sumideros de CO² y, además, proveen refugios a las especies endémicas (Fundación Humedales Bogotá, 2011).

El departamento del Tolima cuenta con una extensa zona de alta montaña donde predominan las turberas, las lagunas de origen glacial y los termales volcánicos. Por otra parte, las zonas bajas, representadas por el Valle del Magdalena, hay una gran cantidad de cuerpos lénticos: 482 lagunas, lagos, pantanos y humedales, que ocupan una superficie de aproximadamente 1.116 hectáreas (Corporación Autónoma del Tolima - CORTOLIMA, s.f.). Uno de los humedales relevantes de las zonas bajas del Tolima es el humedal El Silencio, con un importante recurso hídrico debido a la permanencia del espejo de agua durante periodos de intenso verano, el cual alberga una gran cantidad de organismos acuáticos que lo convierten en un área importante para la conservación en el departamento (CORTOLIMA & Grupo de Investigación en Zoología de la Universidad del Tolima - GIZ, 2016).

Pese a todas las características de la biota zooplanctónica, son pocos los estudios realizados en Colombia y en el Tolima (Herrera & Guillot, 1999; Pérez, 2009). La mayoría de trabajos en el departamento se ha centrado en la caracterización de la fauna zooplanctónica, especialmente su ecología, en tanto que hay pocos estudios taxonómicos. De ahí la necesidad de hacer estudios que amplíen los inventarios y sirvan de línea de base para trabajos posteriores.

En este contexto, y dada la importancia que tiene la comunidad zooplanctónica en los humedales de zonas bajas, en el presente estudio se determinó la composición y la estructura de la comunidad zooplanctónica, especialmente de los rotíferos, copépodos y branquiópodos en el humedal El Silencio del municipio de San Sebastián de Mariquita (Tolima) y sus posibles relaciones con las variables fisicoquímicas del ecosistema léntico.

Materiales y métodos

Área de estudio

El humedal El Silencio está ubicado en la vereda El Rano, municipio de San Sebastián de Mariquita, en el Tolima (Figura 1). Comprende un área aproximada de 16 hectáreas de área inundable, una altura promedio de 343 m y una profundidad media de 2,20 m. Los límites se encuentran definidos por las coordenadas 05°17' 12,7" N y 74° 51' 41,1" O (CORTOLIMA & GIZ, 2016). El humedal pertenece a la unidad hidrográfica de la quebrada Chimina de la subzona hidrográfica del río Gualí, situado dentro de la zona hidrográfica del Magdalena Medio, con una temperatura promedio anual entre los 23 y 24 °C y una precipitación media anual de 3.000 a 3.200 mm, un sistema de lluvias bimodal y una humedad relativa de 74,9 % (CORTOLIMA & GIZ, 2016). Según la clasificación de Holdridge & Grenke (1971), su ecosistema corresponde al de bosque seco tropical (Bs-T).

Trabajo de campo y laboratorio

Se hicieron muestreos mensuales puntuales, con cuatro replicas durante el periodo comprendido entre septiembre de 2016 y abril de 2017 (M1 al M8). La fase de muestreo se definió con base en el histórico pluviométrico del IDEAM (últimos 20 años). Se filtraron 100 litros de agua con una red de 55 µm a una profundidad de 30 cm recolectados en frascos plásticos de 500 ml (Pérez, 2009). Posteriormente, cada muestra se fijó con una solución de formol tamponado (Herrera & Guillot, 1999; Darrigan, *et al.*, 2007) y el material biológico fue almacenado.

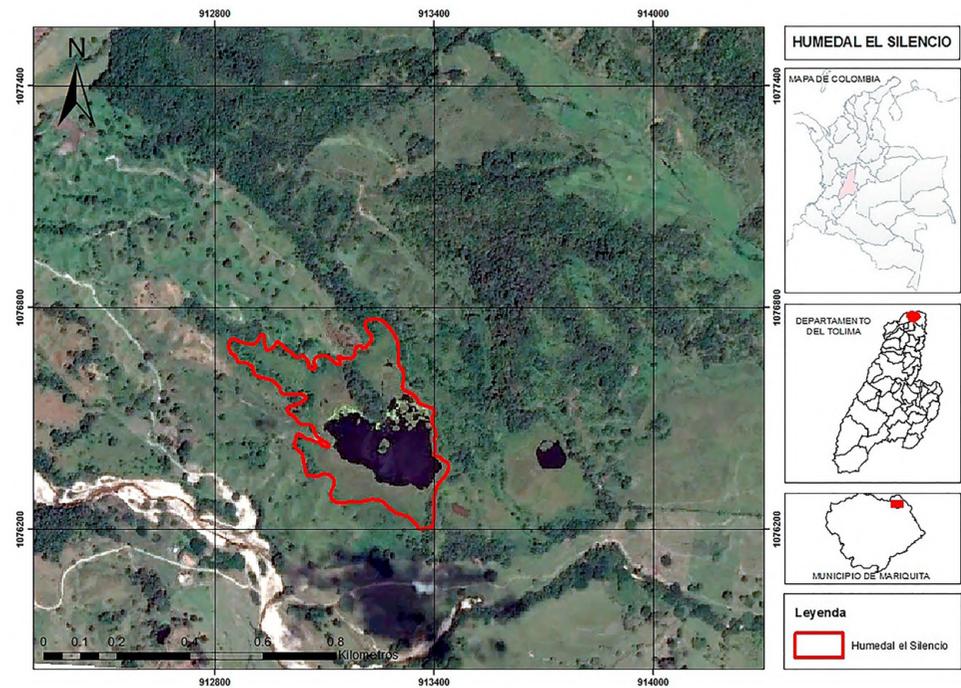


Figura 1. Localización del humedal El Silencio (San Sebastián de Mariquita, Tolima)

Se midieron *in situ* las variables de temperatura del agua y del aire ($^{\circ}\text{C}$), pH, conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), transparencia del agua (disco de Secchi, cm), y oxígeno disuelto ($\text{mg O}_2/\text{L}$) (Golterman, *et al.*, 1978; Vercellino & Bicudo, 2006). También se tomaron muestras de agua en frascos plásticos de 2.000 ml para el análisis de variables fisicoquímicas y bacteriológicas (pH, dureza, alcalinidad, turbidez, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, saturación de oxígeno, sólidos totales, nitratos, nitritos, fósforo total y coliformes totales), las cuales se analizaron en el Laboratorio de Servicios de Extensión en Análisis Químico (LASEREX) de la Universidad del Tolima.

La determinación y el conteo de la comunidad zooplanctónica se hizo con un microscopio invertido Olympus CKX41 usando la cámara de sedimentación Sedgwick-Rafter (Serfling, 1949; McAlice, 1971). Para la identificación taxonómica se utilizaron las claves taxonómicas de Elmoor (1997), Gutiérrez & Sarma (1999), Thorp & Covich (2001, 2010), así como las ilustraciones y guías de Lansac, *et al.* (2002) y Mercado & Suárez (2011) y las bases de datos electrónicas de Jersabek & Leitner (2013), The Integrated Taxonomic Information System-ITIS (2017) y WoRMS (2017). Para el análisis cuantitativo se contaron hasta 100 organismos del género más común (Bicudo, 1990), y se utilizó la fórmula usada por la American Public Health Association-APHA (2005) y Pérez (2009).

Para el análisis de los datos se elaboró una matriz biológica con la información taxonómica incluyendo los valores de densidad relativa de los organismos identificados. Se determinaron los índices de diversidad utilizando el programa PAST, versión 2.17c (Hammer, *et al.*, 2001). Se hizo un análisis de correspondencia canónica (ACC) para establecer las asociaciones entre las variables fisicoquímicas y la comunidad zooplanctónica del humedal evaluado con el programa Canoco, versión 4.5 (Braak & Smilauer, 2009). Por último, con los resultados de las variables fisicoquímicas se calcularon los siguientes índices de contaminación: contaminación por mineralización (ICOMI) con base en los datos de conductividad eléctrica, dureza y alcalinidad; el índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS) y, por último, el índice de contaminación trófica (ICOTRO) con el fósforo total. Estos cálculos se hicieron siguiendo las fórmulas planteadas por Ramírez, *et al.* (1997).

Resultados

La comunidad de rotíferos, copépodos y branquiópodos estuvo compuesta por 30 géneros, siendo los rotíferos los mejor representados, con 23 géneros, seguidos por los copépodos con cuatro géneros y los cladóceros con tres.

Los rotíferos y copépodos en estadio naupliar fueron los grupos más abundantes, con una densidad relativa de 83,41 y 14,90 %, respectivamente. Los géneros con mayor densidad fueron *Brachionus* (47,68 %), *Polyarthra* (11,96 %), *Hexarthra* (3,74 %), *Anuraeopsis* (3,74 %), *Lecane* (3,29 %), *Filinia* (3,14 %), en tanto que los demás taxones registraron densidades por debajo de 1,3 % (**Tabla 1**).

Tabla 1. Listado de taxones de la comunidad zooplanctónica del humedal El Silencio (San Sebastián de Mariquita, Tolima). (Dr (%): densidad relativa)

Phylum	Clase	Orden	Familia	Género	DR (%)			
Arthropoda	Branchiopoda	Diplostraca	Moiniidae	<i>Moinodaphnia</i> sp.	0,30			
			Chydoridae	<i>Alona</i> sp.	0,60			
			Macrothricidae	<i>Macrothrix</i> sp.	0,75			
	Maxillopoda	Cyclopoida	Cyclopidae	<i>Cyclopidae</i> sp. 1	0,15			
				<i>Cyclopidae</i> sp. 2	0,15			
				<i>Cyclopidae</i> sp. 3	0,15			
				<i>Cyclopidae</i> sp. 4	0,30			
				<i>Nauplio</i>	14,20			
				Bdelloidea	Philodinida	Philodinidae	<i>Philodina</i> sp.	1,05
							Hexarthridae	<i>Hexarthra</i> sp.
	Flosculariaceae	<i>Sinatherina</i> sp.	1,05					
	Flosculariaceae	Testudinellidae	<i>Testudinella</i> sp.				0,30	
		Filiniidae	<i>Filinia</i> sp.				3,14	
		Trochosphaeridae	<i>Trochosphaera</i> sp.				0,15	
Asplanchnidae		<i>Asplanchna</i> sp.	0,45					
Rotifera	Monogonta	Ploima	Brachionidae				<i>Anuraeopsis</i> sp.	3,74
							<i>Brachionus falcatus</i>	1,49
							<i>Brachionus angularis</i>	14,95
				<i>Brachionus plicatilis</i>	2,99			
				<i>Brachionus quadridentatus</i>	0,9			
				<i>Brachionus caudatus</i>	27,35			
				<i>Keratella</i> sp.	0,30			
			<i>Platyias</i> sp.	0,45				
			Euchlanidae	<i>Euchlanis</i> sp.	0,45			
			Gastropodidae	<i>Gastropus</i> sp.	0,90			
			Lecanidae	<i>Lecane</i> sp.	3,29			
				<i>Monostyla</i> sp.	1,20			
			Lepadellidae	<i>Colurella</i> sp.	1,05			
				<i>Lepadella</i> sp.	0,45			
			Mytilinidae	<i>Mytilina</i> sp.	0,15			
			Notommatidae	<i>Monommata</i> sp.	0,60			
			Scaridiidae	<i>Scaridium</i> sp.	0,75			
Synchaetidae	<i>Polyarthra</i> sp.	11,96						
Trichocercidae	<i>Trichocerca</i> sp.	0,30						
Trichotriidae	<i>Macrochaetus</i> sp.	0,30						

La densidad más alta se presentó en el muestreo M1 (septiembre) con 1.520 individuos por litro (ind/L) y una precipitación promedio histórica de 259 mm, mientras que la densidad más baja se presentó en el muestreo M8 (abril) con 20 ind/L y una precipitación promedio histórica de 382 mm (Figura 2). En general, después del tercer muestreo se observó una disminución abrupta en la densidad de zooplancton y un incremento en la población de la macrófita *Pistia stratiotes* hasta el punto de impedir la navegación por el humedal, lo que implicaría una relación inversa entre la abundancia de las macrófitas y la de la comunidad zooplanctónica.

La mayor riqueza de especies correspondió al muestreo M3 (noviembre) con 21 especies, seguido de los muestreos M2 (octubre) y M6 (febrero) con 13 y 12, respectivamente. El muestreo con menor cantidad de especies fue el M8 (abril), con cuatro (Figura 3). En cuanto a los índices de diversidad y abundancia, el M3 (noviembre) presentó los valores más altos de diversidad de Shannon (H) con 2,41 y el valor de dominancia más bajo ($D=0,12$). El valor más alto de dominancia se presentó en el M1 (septiembre) ($D=0,69$), así como los niveles más bajos de diversidad ($H=0,67$) y de riqueza (Figura 4).

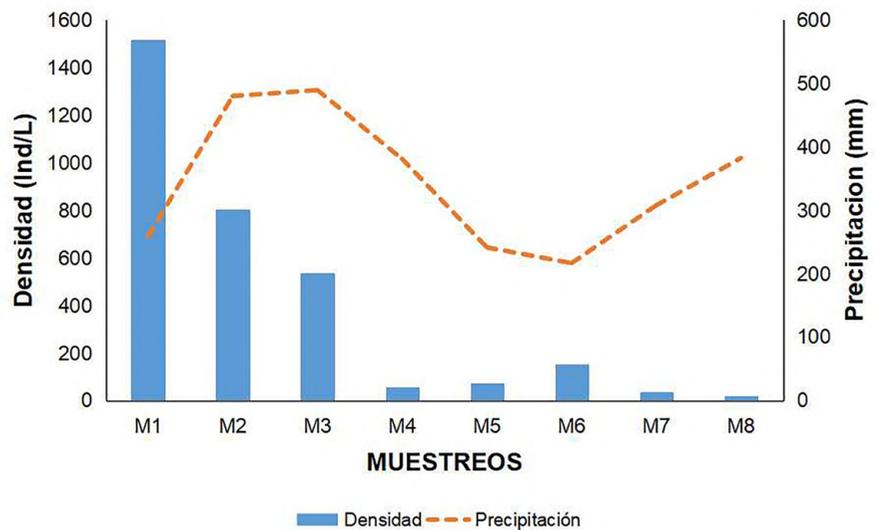


Figura 2. Relación entre la densidad de la comunidad zooplanctónica y la precipitación en el humedal El Silencio (San Sebastián de Mariquita, Tolima)



Figura 3. Riqueza de especies de la comunidad zooplanctónica del humedal El Silencio (San Sebastián de Mariquita, Tolima)

Se encontró que la alcalinidad fue la única variable que tuvo un valor estadístico significativo ($p=0,001$) para el periodo de muestreo de septiembre de 2016 a abril de 2017 en las variables fisicoquímicas y los géneros de la comunidad zooplanctónica (**Figura 5**).

Los resultados del muestreo M1 (septiembre) evidenciaron una relación entre los nitratos, la dureza y los sólidos totales y la familia Cyclopidae y los géneros *Moinodaphnia* y *Brachionus*. El muestreo M2 (octubre) mostró una relación con la conductividad eléctrica y la alcalinidad y los géneros *Trochosphaera*, *Hexarthra*, *Polyarthra* y *Lepadella*. El oxígeno disuelto, al parecer, influyó en la mayoría de los Cyclopidae. Los géneros *Platyas*, *Colurella* y *Lecane* registraron cierta influencia de los nitritos, y el género *Keratella* alguna relación con la turbidez (**Figura 5**).

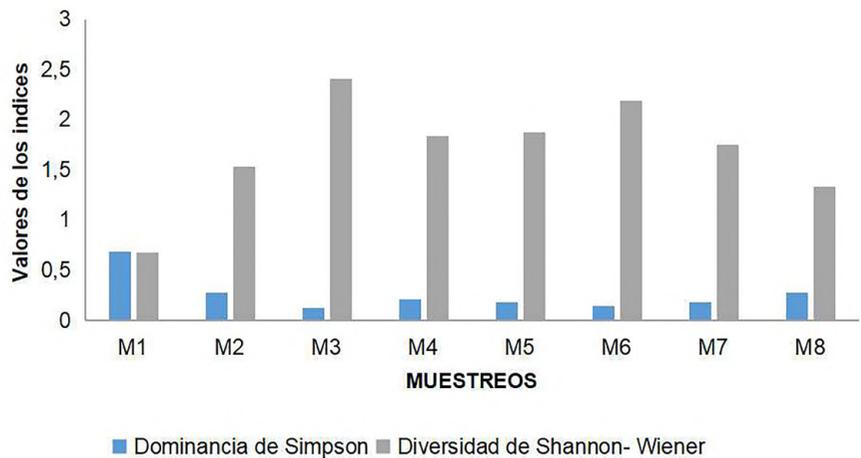


Figura 4. Índices de diversidad de Shannon-Wiener y dominancia de Simpson de la comunidad zooplanctónica del humedal El Silencio (San Sebastián de Mariquita, Tolima)

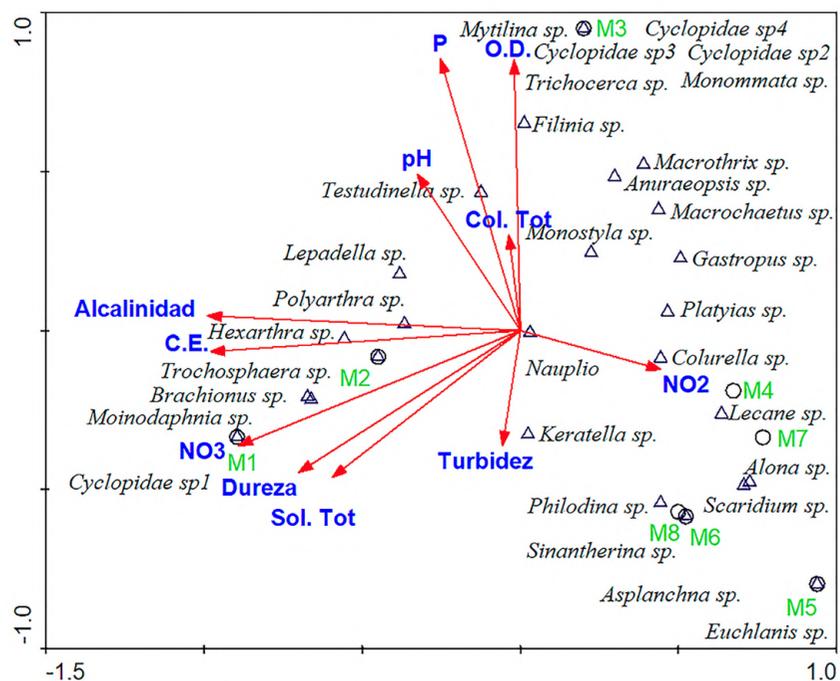


Figura 5. Análisis de correspondencia canónica entre las variables fisicoquímicas y la comunidad zooplanctónica del humedal El Silencio (San Sebastián de Mariquita, Tolima)

Tabla 2. Índices de contaminación (ICOMI, ICOSUS, ICOTRO) del humedal El Silencio (San Sebastián de Mariquita, Tolima)

Muestreros	Índices de contaminación		
	ICOMI	ICOSUS	ICOTRO
M1	0,58	0,07	0,19
M2	0,51	0	0,5
M3	0,08	0,09	0,6
M4	0,39	0,08	0,08
M5	0,07	0,19	0,09
M6	0,09	0,06	0,1
M7	0,09	0,10	0,09
M8	0,07	0,07	0,11

El valor más alto del ICOMI, en un rango de 0 a 1, se obtuvo en el muestreo M1 (septiembre), con 0,58, valor que evidencia contaminación por mineralización. Los otros muestreos presentaron valores por debajo de 0,05, lo que indica una muy baja contaminación por mineralización en el humedal. Los valores del ICOSUS variaron de 0 a 0,19 (g/m³), lo que evidenció que, en términos generales, el humedal tendría muy baja contaminación por sólidos suspendidos. El ICOTRO presentó valores entre 0,08 a 0,19, en el rango de 0,02 a 1 g/m³, indicativos de un proceso de eutrofización en el humedal (Tabla 2).

Discusión

La mayoría de la comunidad zooplantónica del humedal El Silencio correspondió a rotíferos, resultados que concuerdan con estudios realizados en represas, llanuras de inundación, humedales, lagos y en los grandes ríos con planicies de inundación del Neotrópico por Herrera & Guillot (1999), Lansac, *et al.* (2002); Gaviria & Aranguren (2007), Peréz (2009) y José De Paggi & Paggi (2014). Se confirmó que los rotíferos son el grupo más diverso en estos ecosistemas, lo que se explica porque son estrategas, oportunistas y toleran una gran cantidad de factores ambientales (Neves, *et al.*, 2003). Además, los resultados del presente estudio son congruentes con la información reportada por CORTOLIMA & GIZ (2010) sobre la presencia de cuatro familias (Brachionidae, Synchaetidae, Lecanidae y Cyclopidae) y tres géneros (*Brachionus*, *Polyarthra* y *Keratella*) en el humedal.

Aoyagui & Bonecker (2004) mencionan que *Brachionus*, *Lecane*, *Keratella*, *Polyarthra* y *Filinia* son géneros abundantes y son parte de una asociación típica de géneros planctónicos dominantes, lo que no aplica para el género *Hexarthra*, que es abundante pero en solitario. Según Acosta (2005), estos géneros presentan una distribución cosmopolita o tropicospolita para la mayoría de las especies de *Lecane* que, además, tienen fuertes endemismos en el Neotrópico (José De Paggi & Paggi, 2014). Dicha distribución puede explicar la presencia de estos géneros en el humedal El Silencio, además, la abundancia del género *Brachionus* se relacionaría con la presencia de grandes cantidades de materia orgánica (Gómez, *et al.*, 2013) y con el hecho de que la familia Brachionidae es muy tolerante a ciertas condiciones contaminantes, así como a diversas condiciones ecológicas (Sládeček, 1983).

En los copépodos se presentó una mayor abundancia de individuos en los estadios naupliares, en tanto que los adultos fueron muy escasos. Este patrón se ha registrado en diferentes hábitats dulceacuícolas (Iannacone & Alvaríño, 2007; Lansac, *et al.*, 2002; Acosta, 2005), lo que indicaría que los huevos que eclosionan están en estado de latencia y no han sido cargados por la hembra (Acosta, 2005), o que los adultos prefieren estar en ambientes más profundos, dada la migración vertical que realizan, y no en la zona litoral (Paggi & José De Paggi, 1990) o pelágica.

La abundancia de cladóceros fue escasa, lo que podría relacionarse con la migración vertical de estos organismos, que, al igual que los copépodos, prefieren permanecer durante el día en aguas profundas y en la noche ascienden a la superficie (Esteves, 1998). El hecho de no encontrar cladóceros de tallas mayores podría deberse a la presencia de peces zooplantofágos e invertebrados predadores de estos organismos (Acosta, 2005), factor que quizás favorece las altas densidades de los rotíferos (Iannacone & Alvaríño, 2007). Cabe resaltar que en la biota planctónica recolectada los cladóceros más abundantes fueron *Macrothrix* y *Alona*, géneros de talla pequeña, típicos de zonas litorales, siendo el último abundante entre el bentos (Lansac, et al., 2009); además, *Macrothrix* también se ha mencionado como indicador de altos grados de contaminación orgánica (Abdul, et al., 2016).

A nivel temporal, la densidad de la comunidad zooplanctónica puede estar condicionada por dos factores: las precipitaciones mensuales y la presencia de *P. estratioides*. En cuanto al primer factor, en los muestreos la densidad tuvo una relación inversa con la precipitación, resultados que concuerdan con los de Iannacone & Alvaríño (2007) y Andrade, et al. (2011), quienes plantean que cuando hay un aumento en el volumen del agua, la densidad de los organismos tiende a disminuir por la dilución de los nutrientes en el medio, y con el descenso se produce una concentración de organismos en la columna de agua, lo que permite que sean capturados fácilmente.

El segundo factor, es decir, la proliferación masiva de macrófitas, estaría relacionado con el índice de contaminación trófica del humedal, ya que la alta abundancia de estas plantas, la pérdida de biodiversidad, y los malos olores en el agua, entre otros (Roldán & Ramírez, 2008; Toro, 2019), son evidencia de los cambios producidos en el ecosistema como consecuencia de procesos de eutrofización, que son muy probables en lagos poco profundos con temperaturas cálidas y podrían causar la pérdida total del ecosistema (Gómez, 2017; Franco, et al., 2010). Además, aunque se ha reportado que las macrófitas juegan un papel importante en la composición del zooplancton, ya que tienden a albergar una gran diversidad y riqueza en las raíces (Villabona, et al., 2011). Algunos autores como Fontanarrosa, et al. (2010) plantean que en temporadas cálidas estas plantas flotantes pueden llegar a cubrir la superficie del lago produciendo una fuerte atenuación de la luz y una anoxia que perjudican el desarrollo del zooplancton, lo que pudo haber ocurrido en el caso de estudio con la consecuente disminución de la densidad y diversidad, principalmente en los últimos muestreos.

En el muestreo M1 (septiembre) se registró una alta densidad de organismos, pero muy pocos géneros, siendo *Brachionus* el más dominante. Es de esperar que en épocas de bajas lluvias la densidad de los organismos aumente, pues al disminuir el volumen del agua se produce una mayor concentración de organismos por unidad de volumen (Andrade, et al., 2011). Asimismo, la concentración de nutrientes causa un aumento en la producción de biomasa fitoplanctónica, favoreciendo así los grupos dominantes del zooplancton (Salcedo, et al., 2012).

En el análisis de correspondencia canónica se observó cómo los copépodos se agruparon cerca a la variable de oxígeno disuelto, y en el muestreo M3 estos organismos prefirieron las lluvias intensas, lo que favorecería los hábitats con una alta oxigenación en este cuerpo de agua (Esteves, 1998; Thorp & Covich, 2010; Abdul, et al., 2016). Además, Esteves (1998) señala que el oxígeno tiene mucha influencia en la migración de estos organismos en la columna de agua, y generalmente cuando las condiciones cambian, esta biota tiende a desaparecer del ecosistema (Karuthapandi, et al., 2012).

El género *Keratella* podría estar condicionado por la turbidez, ya que se caracteriza por preferir ambientes con aguas transparentes, bajas concentraciones de materia orgánica y una gran proporción de oxígeno disuelto. Además, su método de alimentación es por filtración de partículas de un tamaño menor a 10 μm , lo que puede verse afectado por la cantidad de material suspendido (Sládeček, 1983). Por otra parte, el género *Brachionus* se vería afectado por los nitratos, ya que se ha evidenciado que cuando hay deficiencias

de nitrógeno en las algas, que son su principal alimento, estos organismos son capaces de adquirir los nutrientes directamente, con el fin de lograr una compensación mineral y continuar con los procesos metabólicos (Jensen & Verschoor, 2004).

En el estudio también se evidenció la posible relación de la alcalinidad con la comunidad zooplanctónica, pues fue una variable estadísticamente significativa. La alcalinidad permite neutralizar las bases presentes en el agua y, así, restringir los cambios bruscos de pH que se pueden llegar a producir, manteniéndose constante durante el proceso de fotosíntesis de las algas (Roldán & Ramírez, 2008), lo que favorece el zooplancton herbívoro y la mayoría de los géneros de rotíferos, que prefieren estar en las llamadas aguas transicionales, es decir, aquellas cuyo pH puede variar de ácido a alcalino (Sládeček, 1983).

En el humedal no se evidenció contaminación por mineralización o por sólidos suspendidos, mientras que se registraron valores altos en el índice de contaminación trófica, lo que permite suponer el desarrollo de procesos importantes de eutrofización. Además, según la literatura, géneros como *Brachionus*, *Trichocerca*, *Anuraeopsis*, *Polyarthra*, *Euchlanis*, *Alona* y *Macrothrix* son comunes en lagos eutróficos (Esteves, 1998; Abdul, et al., 2016). Otro factor que incrementaría este proceso son las macrófitas, pues durante gran parte del periodo de muestreo se presentó un crecimiento acelerado y una alta producción de malos olores en el agua, lo que disminuye la entrada de luz y, por consiguiente, reduce la densidad del zooplancton (Roldán & Ramírez, 2008).

Conclusiones

La comunidad zooplanctónica del humedal El Silencio estuvo representada principalmente por los rotíferos de la clase Monogonta, seguidos por los copépodos de la familia Cyclopidae y, por último, por los cladóceros de las familias Macrothricidae y Chydoridae, siendo este comportamiento común para los ecosistemas lénticos del Neotrópico.

Los rotíferos presentaron la mayor diversidad, abundancia, densidad y riqueza en la comunidad como resultado de su gran adaptabilidad y dominancia en la zona tropical; la baja densidad de los copépodos y cladóceros se debe al desplazamiento que tienen en la columna de agua hacia la zona pelágica.

La estructura de la comunidad zooplanctónica se vio condicionada por la fluctuación de las precipitaciones que incidieron en su densidad y por las macrófitas acuáticas, cuya abundancia influyó en la disminución de la comunidad.

En los muestreos evaluados la alcalinidad influyó de forma significativa en la comunidad zooplanctónica; además, se determinó que el humedal El Silencio se encuentra en un estado eutrófico debido a la presencia de géneros como *Brachionus* y *Testudinella* y el índice de contaminación trófica.

Contribución de los autores

HC: recolección del material biológico, análisis cualitativos y cuantitativos, construcción de bases de datos, análisis de los resultados y elaboración del documento; JGG: recolección del material biológico, apoyo en el análisis de los resultados, construcción de bases de datos y asesoramiento del proyecto de investigación en cada una de sus etapas; GR: asesoramiento del desarrollo del proyecto de investigación en cada una de las etapas y en la corrección del documento.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses que pueda afectar la publicación de este estudio.

Referencias

Abdul, W. O., Adekoya, E. O., Ademolu, K. O., Omoniyi, I. T., Odulate, D. O., Akindokun, T. E., Olajide, A. E. (2016). The effects of environmental parameters on zooplankton assemblages in tropical coastal estuary, South-west, Nigeria. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 42 (3): 281-287.

- Acosta, F.** (2005). Caracterización del zooplancton de lagunas en la llanura inundable del río Ichilo (Cochabamba-Bolivia). *Revista Boliviana de Ecología*. **17**: 01-14.
- Andrade, F., Aravinda, H. B., Puttaiah, E. T.** (2011). Studies on Mangalore coastal water pollution and its sources. *Indian Journal of Science and Technology*. **4** (5): 553-557.
- Aoyagui, A.S. & Bonecker, C.C.** (2004) Rotifers in different environments of the Upper Paraná River floodplain (Brazil): richness, abundance and the relationship with connectivity. *Hydrobiologia*. **522**: 281-290. Doi: 10.1023/B:HYDR.0000029980.49859.40
- American Public Health Association – APHA.** (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington, Estados Unidos: American Public Health Association, Washington. p. 1-35.
- Bicudo, D. C.** (1990). Considerações sobre metodologias de contagem de algas do perifíton. *Acta Limnológica Brasiliensia*. **3** (1): 459-475.
- Braak, C. T. & Smilauer, P.** (2009). Canoco. Wageningen: Biometris-Plant Research International.
- Conde, J. M., Ramos, E., Morales, R.** (2004). El zooplancton como integrante de la estructura trófica de los ecosistemas lenticos. *Revista Ecosistemas*. **13** (2): 23-29.
- Corporación Autónoma Regional del Tolima.** s.f. Identificación, caracterización, zonificación y plan de manejo del humedal El Silencio. Municipio de Mariquita, Departamento del Tolima. Fecha de acceso: diciembre de 2016. Disponible en: https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/estudios/humedales/Mariquita/HUMEDAL_EL_SILENCIO.pdf
- Corporación Autónoma Regional del Tolima & Grupo de Investigación en Zoología (CORTOLIMA y GIZ).** (2010). Biodiversidad faunística de los humedales del departamento del Tolima: Informe técnico. CORTOLIMA y GIZ, Ibagué.
- Corporación Autónoma Regional del Tolima & Grupo de Investigación en Zoología (CORTOLIMA y GIZ).** (2016). Plan de Manejo Ambiental (PMA) Humedal Laguna El Silencio: Informe técnico, CORTOLIMA y GIZ, Ibagué.
- Darrigan, G., Vilches, A., Legarralde, T., Damborenea, C.** (2007). Guía para el estudio de macroinvertebrados. I.-Métodos de colecta y técnicas de fijación. ProBiota, FCNyM, UNLP. La Plata, Argentina. p 1-86.
- Elmoor, L.** (1997). Manual de Identificação de Cladóceros Límnicos do Brasil. Brasilia, Brasil: Uniersia. p. 1-156.
- Esteves, F.** (1998). Fundamentos de limnología. Rio de Janeiro, Brasil: Interciencia. p. 1-226.
- Fontanarrosa, M. S., Chaparro, G., De Tezanos, P., Rodriguez, P., O'Farrell, I.** (2010). Zooplankton response to shading effects of free-floating plants in shallow warm temperate lakes: a field mesocosm experiment. *Hydrobiologia*. **646** (1): 231-242. Doi: 10.1007/s10750-010-0183-1
- Franco, D. P. M., Manzano, J. Q., Cuevas, A. L.** (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *Contactos*. **78**: 25-33.
- Fundación Humedales Bogotá.** (2011). Humedales de Bogotá. Fecha de consulta: marzo de 2017. Disponible en: <http://humedalesbogota.com/humedales-bogota>
- Gaviria, S. & Aranguren, N.** (2007). Especies de vida libre de la subclase Copépoda (Arthropoda, Crustácea) en aguas continentales de Colombia. *Biota Colombiana*. **8** (1): 53-68.
- Golterman, H.L., Clymo, R.S., Ohnstad, M.A.** (1978). Method for chemical analysis of fresh waters. Blackwell Sci. Publ. pp. 116-121.
- Gómez, J. L., Peña, B., Guzman, J., Gallardo, V.** (2013). Zooplankton composition, abundance and water quality in a microreservoir at Morelos State. *Hidrobiológica*. **23** (2): 227-240.
- Gómez, T. G.** (2017). Biorremediación de lagos tropicales eutrofizados: estudio del Lago San Pablo (Ecuador) (Tesis de maestría). Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España.
- Gutiérrez, M. & Sarma S.S.S.** (1999). Zooplankton de sistemas acuáticos epicontinentales mexicanos en la región central de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. H112. México D. F.
- 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. http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- Herrera, Y. & Guillot, G.** (1999). Composición taxonómica del zooplancton del Embalse de Betania, departamento del Huila. *Acta Biológica Colombiana*. **4** (1): 5-21.
- Holdridge, L. R. & Grenke, W. C.** (1971). Forest environments in tropical life zones: a pilot study. *Forest environments in tropical life zones: a pilot study*. Pergamon press. New York. p. 1-747.

- Iannacone, J. & Alvarino, L.** (2007). Diversidad y abundancia de comunidades zooplanctónicas litorales del humedal Pantanos de Villa, Lima, Perú. *Gayana (Concepción)*. **71** (1): 49-65.
- Jersabek, C. D. & Leitner, M. F.** (2013). The Rotifer World Catalog. World Wide Web electronic publication. Fecha de consulta: junio a septiembre de 2017. Disponible en: <http://www.rotifera.hausdennatur.at/>
- Jensen, T. C. & Verschoor, A. M.** (2004). Effects of food quality on life history of the rotifer *Brachionus calyciflorus* Pallas. *Freshwater Biology*. **49** (9): 1138-1151.
- José De Paggi, S.B. & Paggi, J.** (2014). El zooplancton de los grandes ríos sudamericanos con planicie de inundación. *FABICIB*. **18**: 166-194.
- Karuthapandi, M., Xavier-Innocent, B., Siddiqi, S. Z.** (2012). Zooplankton in a temporary freshwater pond habitat, in Attapur, Hyderabad Andhra Pradesh, India. *International Journal of Advanced Life Sciences*. **1**: 22-31.
- Lansac, F., Velho, L., Higuti, J., Takahashi, E.** (2002). Cyclopidae (Crustacea, Copepoda) from the upper Paraná river floodplain, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*. **62** (1): 125-133.
- McAlice, B. J.** (1971). Phytoplankton Sampling With The Sedgwick-Rafter Cell. *Limnology and Oceanography*. **16** (1): 19-28.
- Mercado, N. F. & Suárez, E.** (2011). Morfología, diversidad y distribución de los Cyclopoida (Copépoda) de zonas áridas del centro-norte de México. I. Cyclopiniae. *Hidrobiológica*. **21** (1): 1-25.
- Neves, I. F., Rocha, O., Roche, K. F., Pinto, A.A.** (2003). Zooplankton community structure of two marginal lakes of the River Cuiabá (Mato Grosso, Brazil) with analysis of Rotifera and Cladocera diversity. *Brazilian Journal of Biology*. **63** (2): 329-343. Doi: 10.1590/S1519-69842003000200018
- Paggi, J. C. & José De Paggi, S. B.** (1990). Zooplankton de ambientes lóticos e lénticos do rio Paraná Medio. *Acta Limnol. Brasil*. **3**: 685-719.
- Peréz, M.** (2009). Estructura de la comunidad zooplanctónica en un humedal urbano andino neotropical por un periodo de siete meses. (Trabajo de grado). Facultad de Ciencias: Programa de Biología Aplicada. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.
- Ramírez, A., Restrepo, R., Viña, G.** (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulación y aplicación. *CTyF-Ciencia, Tecnología y Futuro*. **1** (3): 135-153.
- Roldán, G. & Ramírez, J.** (2008). *Limnología neotropical*. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia. p. 1-442.
- Salcedo, M. J., Duque, S. R., Palma, L., Torres, A., Montenegro, D., Bahamón, N., ..., Alba, A. P.** (2012). Ecología del fitoplancton y dinámica hidrológica del sistema lagunar de Yahuarca, Amazonas, Colombia: análisis integrado de 16 años de estudio. *Mundo Amazónico*. **3**: 9-41.
- Serfling, R. E.** (1949). Quantitative estimation of plankton from small samples of Sedgwick-Rafter-Cell mounts of concentrate samples. *Transactions of the American Microscopical Society*. **68** (3): 185-199.
- Sládeček, V.** (1983). Rotifers as indicators of water quality. *Hydrobiologia*. **100** (1): 169-201.
- The Integrated Taxonomic Information System (ITIS).** (2017) Rotifera, Copépoda, Branquiópoda. Fecha de consulta: mayo a septiembre de 2017. Disponible en: <http://www.itis.gov>
- Thorp, J. H. & Covich, A. P.** (Ed). (2001). *Ecology and classification of North American freshwater invertebrates* (2da. ed.). Orlando, Florida: Academic Press. p. 1-1073.
- Thorp, J. H. & Covich, A. P.** (Ed). (2010). *Ecology and classification of North American freshwater invertebrates* (3ra ed.) Orlando, Florida: Academic Press. p.1-1021.
- Toro-Gallego, L.** (2019). Aplicación de metodologías para la estimación de la eutrofización en embalses tropicales y selección del índice de estado trópico más adecuado para el embalse Peñol-Guatapé, Colombia. (Tesis de pregrado). Facultad de Ingeniería: Programa de Ingeniería Ambiental. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
- Vercellino, I. S. & Bicudo, D. D. C.** (2006). Sucessão da comunidade de algas perifíticas em reservatório oligotrófico tropical (São Paulo, Brasil): comparação entre período seco e chuvoso. *Revista Brasileira de Botânica*. **29** (3): 363-377.
- Villabona, S. L., Aguirre, N. J., Estrada, A. L.** (2011). Influencia de las macrófitas sobre la estructura poblacional de rotíferos y microcrustáceos en un plano de inundación tropical. *Revista de biología tropical*. **59** (2): 853-870.
- WoRMS Editorial Board.** (2017). World Register of Marine Species. Fecha de consulta: julio a septiembre de 2017. Disponible en: <http://www.marinespecies.org> at VLIZ. Doi: 10.14284/170

Artículo original

Caracterización físicoquímica e hidrobiológica de tres ecosistemas kársticos de la cuenca del río Magdalena (Antioquia, Colombia) durante el ciclo hidrológico 2016-2017

Physical, chemical, and hydrobiological characterization of three karstic ecosystems of the Magdalena River Basin (Antioquia, Colombia) in the 2016 – 2017 hydrological cycle

✉ Diana María Jiménez-González, ✉ Kathiana Murillo-García, ✉ María Isabel Ríos-Pulgarín*

Grupo de Investigación en Limnología y Recursos Hídricos, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia

Resumen

Los estudios sobre la fauna acuática de ecosistemas kársticos tropicales son escasos, lo que dificulta entender su dinámica, así como reglamentar su conservación. En este contexto, entre octubre de 2016 y abril de 2017 se desarrolló un estudio para caracterizar las comunidades de peces y macroinvertebrados acuáticos que habitan las corrientes asociadas con ecosistemas kársticos de los municipios de San Luis y Sonsón (Antioquia, Colombia) y su relación con las condiciones ambientales internas y externas mediante métodos estandarizados de recolección y tratamiento de datos biológicos y físicoquímicos. Además, se determinó la composición y la abundancia de especies de peces y macroinvertebrados, así como los índices ecológicos de diversidad y dominancia, y los de bioindicadores de la calidad de agua (BMWP/Col) con base en macroinvertebrados bentónicos. La variabilidad espacial y temporal, así como la relación entre los parámetros ambientales y biológicos, se estableció mediante análisis de varianza y discriminantes canónicos. Los resultados evidenciaron que los macroinvertebrados más abundantes fueron los efemerópteros de las familias Leptoplebiidae y Baetidae (*Thraulodes* sp y *Camelobaetidius*), los coleópteros de la familia Elmidae (*Microcylloepus*) y los tricópteros de las familias Hydropsychidae (*Leptonema*) y Philopotamidae (*Chimarra*). Entre los peces la especie más representativa fue *Poecilia caucana*. A pesar de que ninguno de estos organismos evidenció una dependencia particular con las variables físicas y químicas del agua, sí mostraron preferencia por el exterior de las cavernas, aunque con movilidad entre los compartimentos del sistema en función del tipo de cobertura vegetal y la oferta de recursos de cada caverna, lo que sugiere una dependencia entre el estado de conservación del bosque, los vertebrados y la vida acuática de las cavernas.

Palabras clave: Cavernas; Macroinvertebrados; Peces; Bosque.

Abstract

Studies about aquatic fauna of tropical karst ecosystems are scarce, which hinders our understanding of their dynamics, as well as the adoption of regulations for their conservation. In this context, between October 2016 and April 2017, we conducted the present study to characterize the fish and aquatic macroinvertebrate communities living in streams associated with karst ecosystems in Sonsón and San Luis municipalities (Antioquia, Colombia) and their relationship with internal and external environmental variables. We used standardized methods of collection and treatment of biological and physical-chemical data. Additionally, we determined the composition and abundance of fish and macroinvertebrate species, as well as ecological indices (diversity, dominance) and water quality bioindicators (BMWP / Col) based on benthic macroinvertebrates. We established the spatial and temporal variability, as well as the relationship between environmental and biological parameters, using analysis of variance and canonical discriminants. The most abundant macroinvertebrates were Ephemeroptera of Leptoplebiidae and Baetidae (*Thraulodes* sp and *Camelobaetidius*) families,

Citación: Jiménez-González DM, Murillo-García K, Ríos-Pulgarín MI. Caracterización físicoquímica e hidrobiológica de tres ecosistemas kársticos de la cuenca del río Magdalena (Antioquia, Colombia) durante el ciclo hidrológico 2016-2017. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):432-448, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefy.1260>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

María Isabel Ríos-Pulgarín;
mirios@uco.edu.co;
mariaisabel.rios536@gmail.com

Recibido: 6 de julio de 2020

Aceptado: 2 de marzo de 2021

Publicado: 17 de junio de 2021



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

Coleoptera of the Elmidae (*Microcylloepus*) family, and Trichoptera of the Hydropsychidae (*Leptonema*) y Philopotamidae (*Chimarra*) families. The most representative fish species was *Poecilia caucana*. Although none of these organisms showed a particular dependency on water physical and chemical variables, they showed a preference for the outside of the caverns but moving between the compartments of the system depending on the vegetation cover and the resources in each of them. This suggests a dependence between forest conservation status, vertebrates, and caverns aquatic life.

Keywords: Cavern; Macroinvertebrates; Fish; Forest.

Introducción

Las cavernas o sistemas kársticos son ambientes poco explorados aún que poseen una gran diversidad y ofrecen valiosos servicios ecosistémicos (Flórez, *et al.*, 2016). Dependen de aportes externos de energía para funcionar y presentan una gran sensibilidad, por lo que son indicativos de cambios en su entorno en varias escalas espacio-temporales. Es decir, pueden actuar como medidores de la calidad ambiental de una región (IAvH, 1998; Lasso, *et al.*, 2019). En el caso de las cavernas cruzadas por corrientes de agua, estas las conectan con el bosque circundante, movilizandorecursos tróficos en una relación comparable a la de aves y mamíferos que todavía no se ha documentado completamente.

Las comunidades acuáticas de los sistemas kársticos o karsts permiten entender su interacción con el bosque, las condiciones físico-químicas del agua y los organismos que las habitan. Es el caso de las comunidades de peces y macroinvertebrados, cuya estructura permite determinar la interacción que tienen con el entorno. Según Decu (1986), en los sistemas kársticos tropicales la principal fuente de energía de los macroinvertebrados en las cavernas es el guano de los murciélagos, que también lo es para los peces, ya que los omnívoros y carnívoros pueden incorporar dichos macroinvertebrados como recurso trófico, en tanto que los peces herbívoros o planctófagos aprovechan los productores primarios de las zonas con mayor radiación en el exterior de los karsts. Por ello la presencia y la abundancia de los diferentes grupos de macroinvertebrados y peces sería evidencia de la oferta de recursos del sistema (Sostoa, *et al.*, 2005), aunque también su ingreso al sistema desde el exterior aportaría nutrientes y recursos para los habitantes residentes del sistema (Craig, *et al.*, 2012). Los macroinvertebrados, además de bioindicadores, son un eslabón esencial de la cadena trófica que conectan a productores con consumidores de orden mayor (Ladrera, *et al.*, 2013; Roldán, 2016). Sin embargo, normalmente no se considera la presencia ni la interacción de peces y macroinvertebrados con los bosques, pese a que en algunos estudios destacados como el de Lasso, *et al.* (2019) se pone de manifiesto que las cavernas ofrecen una probable conexión entre las redes tróficas acuáticas y terrestres.

Este vacío de conocimiento limita de forma importante los procesos de conservación. En el cinturón kárstico del Magdalena Medio colombiano, la falta de estudios dificulta el establecimiento de medidas de gestión ambiental de estos ecosistemas en los municipios de San Luis y Sonsón (Antioquia), lo que ha favorecido la construcción de hidroeléctricas, la minería y la deforestación, con un creciente impacto sobre las corrientes de agua que hacen parte de dichos sistemas y el consecuente riesgo de pérdida de la diversidad acuática relacionada con la modificación de la vegetación en estos bosques, lo que se refleja no solo en el material alóctono que reciben las quebradas, sino también en la oferta para las aves, mamíferos y peces que habitan las cavernas y son fuente de materia orgánica alóctona (Harris, 1970; Pussey & Arthington, 2003).

Dadas estas condiciones, el estudio se propuso determinar las especies de macroinvertebrados y peces presentes en las corrientes de los ecosistemas kársticos de San Luis y Sonsón (Antioquia) y los factores que afectan la estructura de tales asociaciones mediante la caracterización de las comunidades acuáticas que habitan las corrientes de los ecosistemas kársticos en estas localidades y su relación con las condiciones ambientales dentro y fuera de ellos durante dos momentos del ciclo hidrológico de 2016-2017.

Metodología

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en tres corrientes de agua que cruzan cavernas en los municipios de San Luis y Sonsón en el oriente antioqueño: La Gruta: x916344 y 1136240, Caracoles: x917225 y 1152153 y Corintos: 917320 y 1155382 (Datos del WGS 84, proyección magna Colombia-Bogotá) (**Figura 1**). Las cavernas difieren en cuanto a su estado de conservación: Caracoles y Corintos presentan una abundante vegetación circundante, son de difícil acceso, y tienen sustrato pedregoso y altas pendientes, en tanto que La Gruta posee menos pendiente y ha perdido buena parte de su cobertura vegetal, presenta procesos de extracción minera, uso del agua y turismo no regulados.

Diseño del muestreo

En cada una de las cavernas se establecieron dos sitios de muestreo en la quebrada correspondientes al interior y el exterior de las cavernas (aguas abajo), con tres transectos de 7 metros en cada sitio (T1, T2 y T3), los cuales se consideraron como réplicas (Florían, 2008). Los muestreos se realizaron durante octubre de 2016 en un periodo ENSO/Niña (lluvia) y en abril de 2017 en un periodo neutral (periodo de transición a aguas bajas).

Métodos de campo y laboratorio

La toma de muestras de agua para la caracterización fisicoquímica en cada sitio de muestreo incluyó las variables de conductividad, oxígeno, temperatura y pH *in situ* utilizando un equipo de celdas multiparamétricas HACH®. Además, se tomaron muestras de agua para evaluar en el laboratorio la presencia de nitratos, fósforo total, ortofosfatos, sólidos totales, suspendidos y disueltos, y la turbiedad, así como parámetros bacteriológicos (*Escherichia coli* y coliformes). Todos los parámetros se evaluaron según los métodos estandarizados para análisis de aguas de la **American Public Health Association-APHA**, el **American Water Works Association-AWWA**, y la **Water Environment Federation-WEF** (2016).

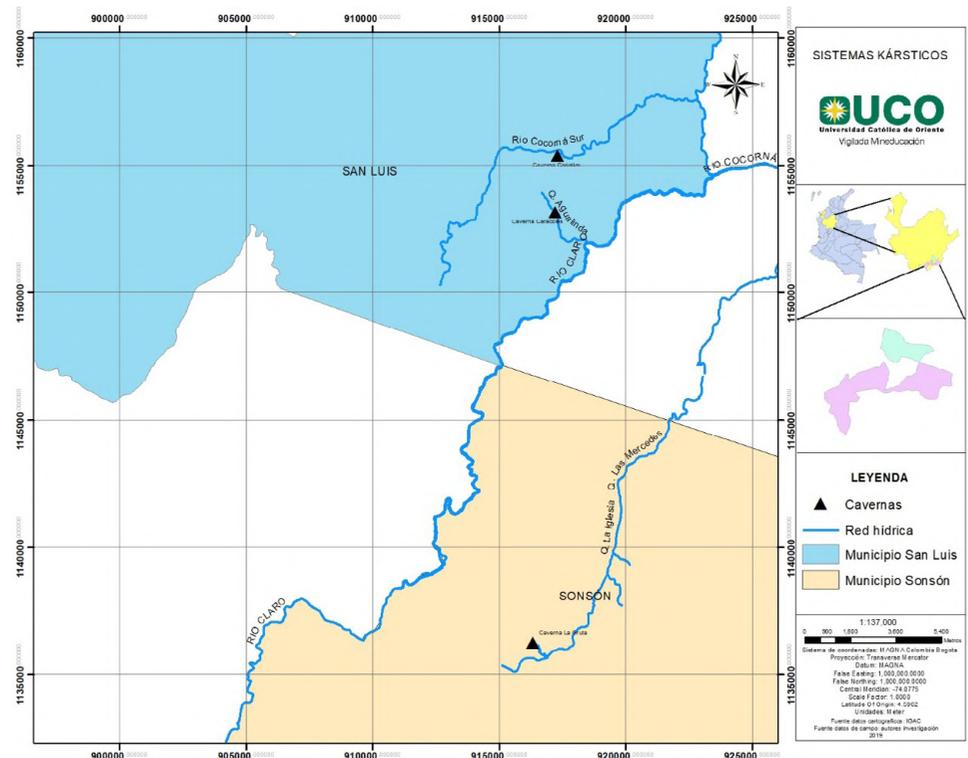


Figura 1. Área de estudio con la ubicación de las corrientes evaluadas

Los macroinvertebrados se recolectaron manualmente con el método recomendado por **Roldán** (1996) y **Roldán & Ramírez** (2008), removiendo los organismos adheridos a rocas, troncos y hojas. También se recolectaron especímenes con una red del tipo D-Net en un único barrido bordeando ambas orillas de la corriente. Las muestras de hojarasca obtenidas con esta red fueron llevadas al laboratorio para su revisión. Todos los organismos recolectados se fijaron con alcohol etílico al 70 % y se almacenaron en frascos de PET. Para la identificación de los macroinvertebrados se usaron las claves de **Correa, et al.** (1981), **Álvarez & Roldán** (1982), **Arango & Roldán** (1983), **Bedoya & Roldán** (1984), **Machado & Rincón** (1989), **Spangler & Santiago-Fragoso** (1992), **Domínguez, et al.** (1994), **Aristizábal** (2002), **Posada & Roldán** (2003), **Domínguez, et al.** (2006), **Domínguez & Fernández** (2009), **Manzo** (2005), **Aristizábal-García** (2016), **Heckman** (2011) y **Naranjo, et al.** (2010).

Los peces se recolectaron con las dos metodologías propuestas por **Maldonado, et al.** (2005): uso de una trampa Nasa (50 minutos de exposición en cada posición de la caverna) y electropesca con un equipo Samus 725MP (21 metros de transecto), con un esfuerzo de captura estandarizado (7 metros de transecto). Los ejemplares recolectados en cada muestreo se pesaron y se midieron individualmente en su longitud estándar o esquelética, se fijaron en formol al 10 % y se identificaron siguiendo los criterios taxonómicos propuestos por **Maldonado, et al.** (2005) y **Jiménez, et al.** (2014). Los especímenes de referencia fueron depositados en la Colección de Peces de la Universidad Católica de Oriente (CP-UCO), registrada ante el Instituto Alexander von Humboldt.

Tratamiento de los datos

Se obtuvieron descriptores emergentes de la estructura de la comunidad de invertebrados considerando la riqueza y la abundancia, en tanto que para los peces se tuvieron en cuenta la abundancia y la biomasa. Con dichas variables se determinaron los índices de diversidad (H') y de dominancia de especies con el fin de establecer los índices Q (**Moreno, et al.**, 2011) de equivalentes de especies. Se obtuvo la similitud en la composición de especies y macroinvertebrados en las diferentes muestras usando datos de presencia o ausencia de cada taxón para construir un conjunto según el método Bray-Curtis. Se estimó la calidad del agua de las corrientes que atraviesan los sistemas kársticos con base en la composición de las familias de macroinvertebrados mediante el método *Biological Monitoring Working Party* (BMWP/Col) (**Roldán**, 2003).

Para determinar si había diferencias espaciales y temporales en las variables fisicoquímicas y las biológicas (abundancia, riqueza y biomasa) de cada asociación, se hicieron análisis de varianza (ANOVA) unifactoriales previa verificación de los supuestos del modelo para tres factores: mes, caverna y posición (interior o exterior de la caverna). Aquellas variables que no cumplieron los supuestos de normalidad del modelo se sometieron a una transformación de datos utilizando la escala de Tukey propuesta por **Erikson & Nosanchuk** (1977) y en caso de no ajustarse, se usó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis en lugar del Anova. Por último, se hizo un análisis de discriminantes canónicos para evidenciar el patrón de variabilidad entre quebradas, posiciones (interior/exterior) y mes de muestreo con base en el conjunto de parámetros fisicoquímicos medidos, así como en el comportamiento de la riqueza, la abundancia o la biomasa de macroinvertebrados y peces. Los análisis se hicieron con los programas Big Data, Rwizard y BioDiversity Pro y Past.

Resultados

Variabilidad espacio-temporal de las condiciones ambientales

Se encontraron diferencias significativas espaciales o temporales en todas las variables ambientales ($p < 0,005$) (**Tabla 1**). Los análisis de varianza mostraron que hubo diferencias en los sólidos totales y los disueltos entre las temporadas climáticas, la posición (interior/exterior) y los sitios de muestreo ($p < 0,00001$), en tanto que los sólidos suspendidos totales

Tabla 1. Valores promedio de las variables ambientales y biológicas y su variabilidad espacial y temporal establecidos mediante el análisis de varianza

Parámetro	Octubre (lluvias)						Abril (aguas en descenso)						DEPH	DEC	DEP
	Caracoles		Corintios		La Gruta		Caracoles		Corintios		La Gruta				
	AD	AF	AD	AF	AD	AF	AD	AF	AD	AF	AD	AF			
OD (mgL ⁻¹)	7,82	7,78	7,77	7,8	6,04	6,09	7,68	7,65	7,54	7,47	6,39	6,3	*		**
STO ₂ (%)	97,83	98,43	96,37	97,1	74,77	75,47	96,87	97,07	94,67	94,17	80,63	79,93	***	***	***
TEM (°C)	24,77	25,37	23,9	24,4	26,1	26,1	24,83	25,1	24,03	24,27	24,83	24,97	***	***	***
COND	220	147,2	185,73	226,33	236	239	107,2	124	143,9	194,07	153,57	165,53	***	***	***
pH	7,72	8,03	7,86	8,13	7,51	7,63	7,77	8,03	8,15	8,18	7,75	7,93	*	**	*
COL	34300	376200	22770	61670	19370	61670	70300	123200	156100	10390	98400	260833,3			***
<i>E-coli</i>	30260	131400	19610	41980	18110	61670	64880	30760	98040	1793	46110	17300			
NO ₃ ⁻	0,53	0,1	0,69	0,78	0,41	0,44	0,47	0,87	2,38	2,61	0,3	0,26	*	**	
FT	0,05	0,05	0,04	0	0,04	0,03	0,07	0,04	0,03	0,03	0,05	0		*	***
ORT	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0	0,02	0,04	0,02	0	***		***
SDT	139	109	113	138	141	152	78	104	82	108	86	90	**	***	***
SST	4,1	5,25	3,95	8,55	9,15	0	11	3,6	4	4	2	2		**	
ST	152	108	117	138	147	136	90	108	86	112	88	92	***	***	***
TURB	7,2	8,6	1,1	1,5	3,4	0,71	27	30	3,1	1,5	4,1	4,9	**	**	
RMACR	8,67	10	4	11,33	4,67	13,67	8,67	8,67	6,33	13	6	7			**
AMACR	29,67	20,33	6,67	18,67	24	50,67	29	18,33	11,67	35,67	28	27,67			*
APEC	1.666	6	0	1	0	0,6666	13.333	116.666	0	13.333	0	0		*	*
BPEC	0,1554	0,1883	0	20.043	0	0,01236	0,8586	0,52274	0	0,105	0	0			

OD: oxígeno disuelto; STO₂: saturación de oxígeno; TEM: temperatura; COND: conductividad eléctrica; COL: coliformes; NO₃⁻: nitratos; FT: fósforo total; ORT: ortofosfatos; SDT: sólidos disueltos totales; SST: sólidos suspendidos totales; ST: sólidos totales; TURB: turbiedad; RMACR: riqueza de macroinvertebrados; AMACR: abundancia de macroinvertebrados; APEC: abundancia de peces; BPEC: biomasa de peces; AD: adentro; AF: afuera; DEPH: diferencias entre periodos hidrológicos; DEC: diferencias entre cavernas; DEP: diferencias entre posiciones

solo mostraron diferencias significativas entre cavernas. En la posición externa de las cavernas se registró un descenso significativo en los sólidos suspendidos totales y de los disueltos en abril de 2017 (periodo de transición a aguas bajas), mientras que en el interior permanecieron constantes y elevados en todos los muestreos, especialmente durante los eventos de alta precipitación. En el interior de la caverna Caracoles se registró la mayor concentración de sólidos disueltos totales ($p < 0,00001$), así como la mayor turbiedad, mientras que en Corintios predominaron los sólidos disueltos totales en el exterior y se presentó la menor turbiedad.

Tanto la concentración de oxígeno como la saturación fueron ligeramente menores en el interior que en el exterior ($p < 0,000001$). Asimismo, se presentaron concentraciones muy superiores en las cavernas Caracoles y Corintios comparadas con La Gruta ($p = 0,00$), caverna ubicada en un tramo con escasa pendiente y mucha intervención minera. En cuanto a la variabilidad temporal, se observaron mayores diferencias en el exterior de las cavernas, siendo notoriamente más altas las concentraciones, especialmente la saturación ($p = 2,2e^{-16}$), en el exterior durante abril.

Con respecto a la temperatura, la conductividad y el pH, hubo diferencias significativas entre los sitios (quebradas), la posición (interior/exterior) y los meses ($p < 0,005$). En todas las quebradas se registraron menores temperaturas en el interior que en el exterior, así como un ligero descenso de esta en abril de 2017 (transición a seca). La conductividad disminuyó notoriamente en abril en el interior de las cavernas y los menores valores en

todos los periodos se registraron en la caverna Caracoles. El pH tuvo una disminución significativa en el exterior de la caverna Caracoles en abril, mientras que en Corintios y la Gruta el pH se incrementó en el mismo periodo.

En cuanto a los nutrientes, los nitratos solo presentaron diferencias significativas en la quebrada Corintios, donde hubo mayores diferencias entre el interior y el exterior que en las otras quebradas ($p=0,000001$). En general, la concentración de nitratos, fosfatos y fósforo total fue mayor en el interior de las cavernas en octubre (lluvias) y menor en abril (transición a seca) ($p>0,05$), con los mayores valores de fósforo total en Caracoles y de ortofosfatos en Corintios. En cuanto a la contaminación fecal, se encontró una mayor concentración de coliformes en el exterior de las cavernas en octubre (lluvias), especialmente en Caracoles.

En general, la variabilidad ambiental explicó entre el 80 y el 100 % de la varianza espacial y temporal entre las muestras. Con respecto a la posición del sitio de muestreo en la corriente (interior/exterior de la caverna), el fósforo total, ortofosfatos y sólidos suspendidos totales fueron los parámetros que más influyeron en el interior de las cavernas, en tanto que los coliformes, el pH, la temperatura y los sólidos disueltos totales fueron los factores dominantes en el exterior (Figura 2a). En cuanto a las cavernas, La Gruta presentó los

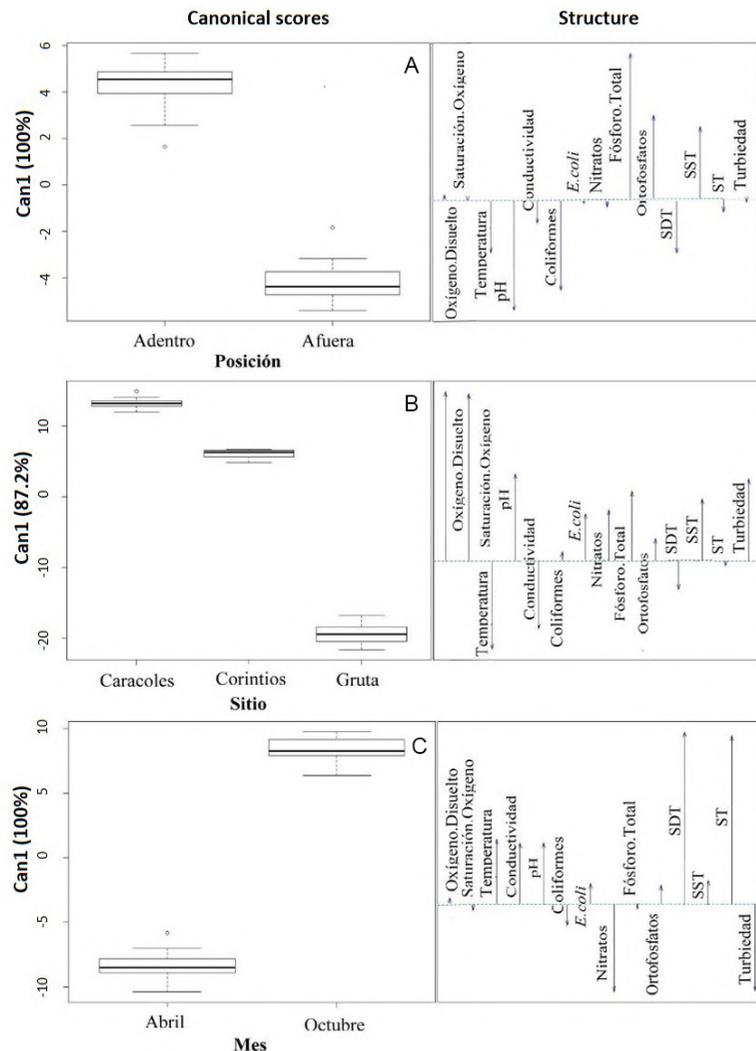


Figura 2. Análisis de discriminantes canónicos de la posición (adentro-afuera), el sitio (Caracoles, Corintios y La Gruta) y el mes de muestreo (abril y octubre) con base en parámetros fisicoquímicos

mayores cambios de temperatura, conductividad y sólidos disueltos totales, mientras que en Caracoles y Corintios sobresalieron los del oxígeno disuelto, la turbiedad y el pH (**Figura 2b**). La variabilidad temporal evidenció que los nitratos, la turbiedad y los coliformes tuvieron mayor influencia en abril, en tanto que los sólidos disueltos totales y, en menor medida, la temperatura, la conductividad, y el pH la tuvieron en octubre (**Figura 2c**).

Asociación entre los macroinvertebrados y su dependencia del ambiente

Se capturaron ejemplares de 53 géneros agrupados en 36 familias y 12 órdenes pertenecientes a 307 taxones de macroinvertebrados (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1260/2993>). Los más abundantes fueron los coleópteros (Elmidae), los efemerópteros (Baetidae y Leptophlebiidae, particularmente los géneros *Thraulodes sp.*, *Camelobaetidius* y *Microcyloopus*), y los tricópteros (Philopotamidae e Hydropsychidae). Se encontró en el interior de La Gruta una abundancia significativamente mayor, mientras que en el exterior de Corintios se encontró la más baja ($p=0,04$). Los Anova también mostraron diferencias significativas entre el interior y el exterior de las cavernas en la riqueza ($p=0,005$), pero no entre cavernas o periodos. La riqueza y la abundancia de macroinvertebrados fueron mayores en el exterior en ambos momentos hidrológicos (**Figura 3**), aunque tendieron a disminuir afuera y aumentar adentro durante la transición al periodo seco (abril). En general, la riqueza fue mayor en la quebrada Corintios, especialmente en abril.

El mayor índice de riqueza de macroinvertebrados se observó en el exterior de La Gruta (27 taxones), en tanto que en el interior de La Gruta y Corintios se registró el menor número de taxones, con 9 y 10 morfoespecies, respectivamente. El patrón de diversidad basado en los índices Q evidenció que la mayor riqueza (Q0) siempre se registró en el exterior, pero la mayor proporción de morfoespecies abundantes solo tuvo este patrón en abril. En cuanto a la dominancia, se observaron 0,5 y 5 veces más especies dominantes en Caracoles y Corintios que en La Gruta, especialmente en abril. La diferenciación de La Gruta también fue evidente en el análisis de similitud (**Figura 4**), en el que se destaca un grupo que compartía solo un 20 % de las taxones, independientemente del mes o la posición (interior/exterior). Esta diferencia se constató por la presencia exclusiva de los géneros *Baetodes*, *Hexatoma*, *Mesovelina* y la familia Leptophlebiidae, así como por la ausencia de géneros comunes a las otras quebradas, como *Anchytarsus*, *Pomacea* y *Psephenops*, además de la notable dominancia de *Thraulodes sp.* Asimismo, Caracoles y Corintios presentaron agrupaciones con apenas 40 % de similitud en la composición, lo que permite diferenciarlas, ya que sus respectivas asociaciones de especies difirieron en más de 20 géneros, entre ellos *Polycentropus*, *Anchytarsus*, *Hetaerina*, *Limnocoris* y *Psephenops*.

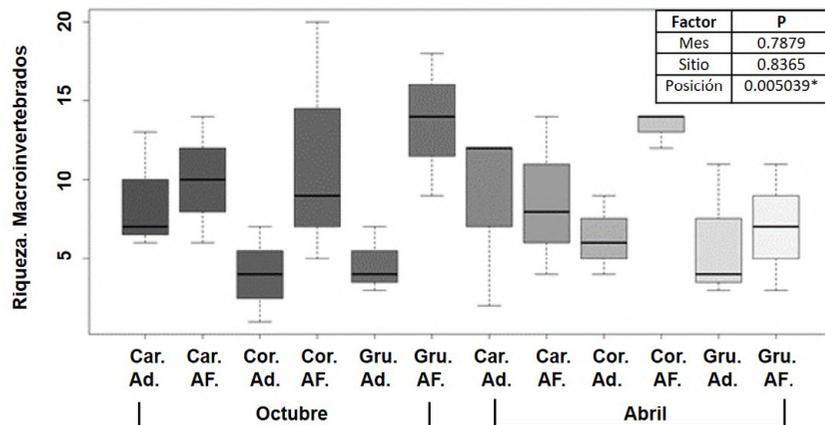


Figura 3. Análisis de varianza espacial y temporal de la riqueza de macroinvertebrados. Ad= adentro; Af: afuera; Car: Caracoles; Cor: Corintios; Gru: La Gruta

Asociación de los peces y su dependencia del ambiente

Se capturaron 72 individuos pertenecientes a 5 órdenes comunes en la región andina, catalogados en 8 familias y 10 géneros (Tabla 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1260/2993>). En la parte externa de Caracoles hubo mayor abundancia, con 18 individuos en octubre y 35 en abril. En octubre (lluvias) Corintios y La Gruta no tuvieron ictiofauna en el interior de la caverna, y en el exterior solo se capturaron alrededor de tres individuos (Figura 5). En ambos periodos los peces más abundantes pertenecían a *P. caucana*, con 16 y 37 individuos capturados en octubre y abril, respectivamente. Otras especies como *Astroblepus*, *Cichlidae*, *Synbranchus*, *Geophagus*, *Pimelodella*, *Argopleura*, *Hypostominaes* y *Trichomycterus* tuvieron escasa representación. Se registraron diferencias significativas entre cavernas ($p=0,016$) y posiciones ($p=0,046$), pero no en los meses de muestreo ($p=0,514$). El patrón de diversidad basada en los índices Q evidenció que la mayor proporción de riqueza (Q0), abundancia (Q1) y dominancia

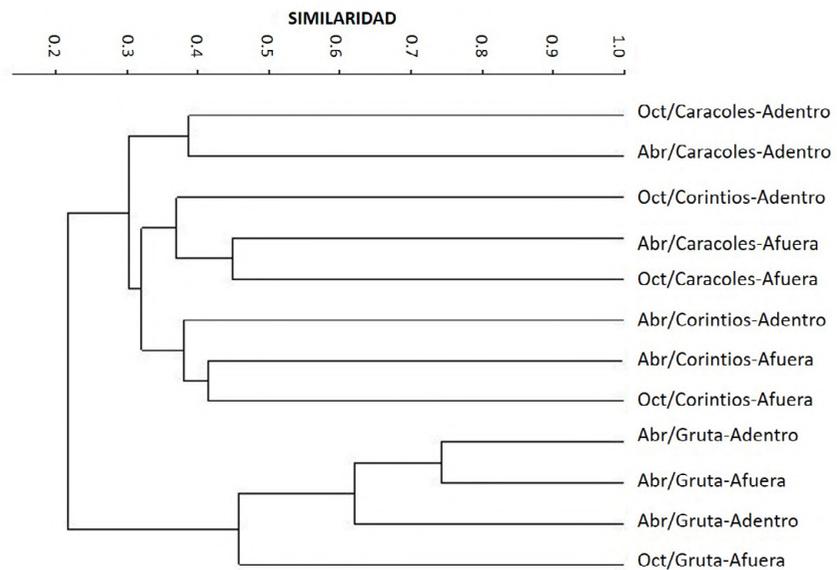


Figura 4. Conjunto de similitud en la composición de especies de macroinvertebrados entre sitios de muestreo durante el ciclo hidrológico 2016-2017

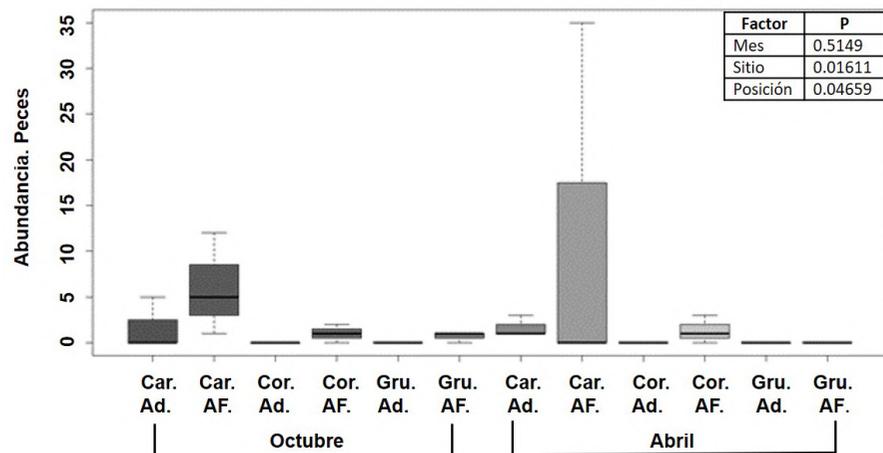


Figura 5. Análisis de la varianza espacial y temporal de la abundancia de peces. Ad: adentro; Af: afuera; Car: Caracoles; Cor: Corintios; Gru: La Gruta

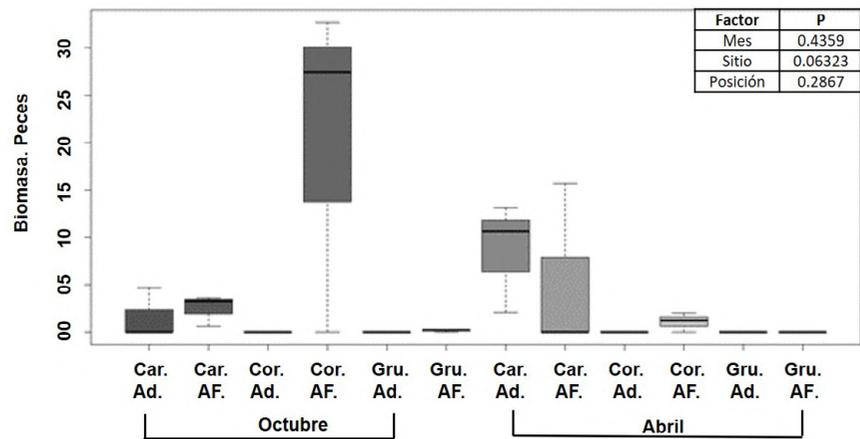


Figura 6. Análisis de la varianza espacial y temporal de la biomasa de peces. Ad: adentro, Af: afuera, Car: Caracoles; Cor: Corintios; Gru: La Gruta

(Q2) se registraron en el interior de Caracoles en octubre y en el exterior de Corintos en abril. La biomasa de peces (**Figura 6**), cuya magnitud fue muy baja, no mostró diferencias espaciales o temporales significativas.

Variabilidad espacio-temporal de macroinvertebrados y peces

Los valores de la variación espacio-temporal entre macroinvertebrados y peces fluctuaron entre 72,4 y 100 %. La abundancia y la biomasa de peces y la abundancia y la riqueza de macroinvertebrados predominaron sustancialmente en la posición externa de todas las cavernas (**Figura 7a**). Las corrientes en Caracoles y Corintios se diferenciaron por la biomasa y la abundancia de peces, respectivamente, en tanto que en La Gruta el factor más importante fue la abundancia de macroinvertebrados (**Figura 7b**). Por otro lado, la variabilidad temporal se explicó por una mayor abundancia de peces en abril de 2017 (transición a periodo seco) y mayor biomasa de peces y riqueza de macroinvertebrados en octubre de 2016 (lluvias) (**Figura 7c**).

Calidad del agua

Las familias de macroinvertebrados más representativas fueron Leptophlebiidae y Baetidae (Ephemeroptera), Elmidae (Coleoptera) y Philopotamidae e Hydropsychidae (Trichoptera). En general, se encontraron niveles I y II según el índice BMWP/Col, es decir que la calidad del agua osciló entre aceptable y buena (**Tabla 2**). No obstante, durante octubre la calidad del agua fue ligeramente menor que en abril, con valores dudosos en el índice por la presencia de familias asociadas con el enriquecimiento por materia orgánica (Chironomidae, Dugesiidae, Planorbidae, Lymnaeidae, entre otras), las cuales se encuentran principalmente en el interior del sistema kárstico. Al comparar las corrientes, se encontró que La Gruta presentaba las condiciones más variables, oscilando entre agua ligera y moderadamente contaminada, seguida por Corintios, con aguas limpias en la parte externa y moderadamente contaminadas en la parte interna. Por último, Caracoles presentó un sistema hídrico con mejores condiciones.

Discusión

Variabilidad ambiental

El comportamiento del pH en el agua concordó con la geología del sistema. Los valores de pH ligeramente ácidos, propios de corrientes en áreas boscosas, ricas en CO₂, facilitan la disolución de la roca caliza de los karst, lo que, a su vez, favorece un incremento en las concentraciones de iones básicos como el bicarbonato, de ahí la obtención de pH con valores entre 7,0 y 8,5 upH en las corrientes que cruzan las cavernas, tal como lo han

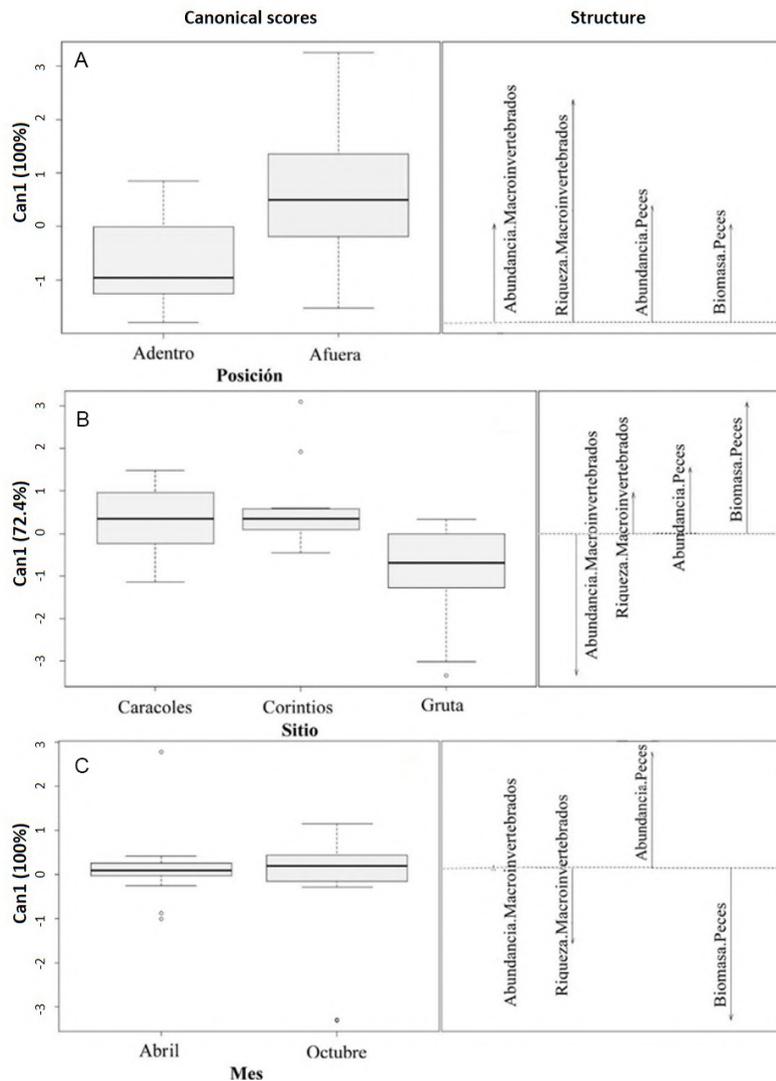


Figura 7. Análisis de discriminantes canónicos de la posición (adentro-afuera), sitio (Caracoles, Corintios y La Gruta) y mes de muestreo (abril y octubre) con base en los descriptores emergentes de las comunidades de peces y macroinvertebrados

documentado **Abril & Medrano (2010)**. Sin embargo, se encontró un pH más alto en la parte externa (aguas abajo) que en la interna, muy posiblemente asociado con procesos de lixiviación de las rocas calcáreas que interfieren, además, en la concentración de sólidos disueltos totales (**Boluda, 2000**) y, consecuentemente, en la conductividad. Los valores del oxígeno disuelto (OD) fueron favorables para la vida acuática en las tres cavernas. Sin embargo, fueron más altos en Caracoles y Corintios debido a la reaireación causada por la pendiente y la escasa perturbación antrópica. Por otro lado, el efecto de la temperatura es mayor en las áreas que reciben radiación directa (**Abril & Medrano, 2010; Eslava, et al., 2000**), por lo que en el exterior de las cavernas Caracoles y Corintios (que presentan mayor cobertura vegetal) se registraron menores temperaturas y mayores concentraciones de oxígeno disuelto que en La Gruta, especialmente en octubre (lluvias).

Con respecto a los nutrientes, no se encontró un patrón claro espacial o temporal, ni valores que sugirieran eutrofización. El fósforo permaneció en niveles bajos según los rangos de **Roldán & Ramírez (2008)** y tampoco se superaron los límites permisibles del ión NO_3^- según lo estipulado por la **Organización Mundial de la Salud-OMS (2006)**,

Tabla 2. Índice BMWP/Col (Álvarez, 2005) en los sitios de muestreo en los meses de octubre de 2016 y abril de 2017

Sitio	Octubre 2016	Clase	Calidad	Abril 2017	Clase	Calidad
Caracoles afuera	118	I	Buena (aguas limpias)	126	I	Buena (aguas limpias)
Caracoles adentro	82	II	Aceptable (ligeramente contaminadas)	63	II	Aceptable (ligeramente contaminadas)
Corintios afuera	125	I	Buena (aguas limpias)	150	I	Buena (aguas muy limpias)
Corintios adentro	56	III	Dudosa (moderadamente contaminadas)	60	III	Dudosa (moderadamente contaminadas)
Gruta afuera	126	I	Buena (aguas limpias)	80	II	Aceptable (ligeramente contaminadas)
Gruta adentro	45	III	Dudosa (moderadamente contaminadas)	62	II	Aceptable (ligeramente contaminadas)

correspondientes a 50 mg/L. Dicha concentración de fósforo total y ortofosfatos es limitada en estos ecosistemas de caverna, puesto que las altas concentraciones de oxígeno inhiben sus procesos de solubilización en la columna de agua y los retienen en los sedimentos (**Roldán & Ramírez, 2008**). Además de los potenciales procesos de eutrofización, otro factor que indica contaminación es la presencia de coliformes (**Hunter, et al., 2000**), particularmente de *E. coli*. Aunque no hubo una tendencia clara, aparentemente la incidencia fue mayor en el exterior debido al lavado de las deposiciones de vertebrados hipógeos como murciélagos y guácharos, pero no se descartan vertimientos puntuales, especialmente en la cuenca asociada con la caverna La Gruta.

De los 12 órdenes de macroinvertebrados registrados en el estudio, Ephemeroptera, Coleoptera y Trichoptera fueron los más abundantes en el exterior de las cavernas, mientras que Decapoda e Hygrophila, aunque poco comunes, presentaron este mismo patrón de abundancia. Lo anterior no solo concuerda con los órdenes que comúnmente se encuentran en sistemas lóticos superficiales, sino también con los resultados obtenidos por **Spangler & Barr (1995)**, **Peck, et al. (1998)**, **Creuzédes, et al. (2009)**, **Salavert, et al. (2011)**, **Taylor & Lopes (2012)**, **Vides-Navarro, et al. (2015)**, y **Resende, et al. (2015)** en sistemas de aguas subterráneas, donde, además de los órdenes Ephemeroptera, Coleoptera y Trichoptera, se han encontrado otros como Diptera y Hemiptera. La importancia de los efemerópteros, coleópteros y dípteros ha sido documentada en sistemas extracársticos de Santander (Colombia) por **Lasso, et al. (2019)**, quienes también encontraron que los organismos epigeos eran más diversos y abundantes que aquellos del interior de las cavernas.

En cuanto a sus hábitos, los efemerópteros son indicadores de buena calidad de agua, ya que viven en aguas limpias y bien oxigenadas (**Roldán, 1996**) y su diseminación se ve restringida por el hecho de que presentan un ciclo de vida largo en su estado de ninfas y son susceptibles a la alteración ecológica (**Rojas & Zúñiga, 1995**). Lo mismo ocurre con los coleópteros, propios de “corrientes lentas, aguas limpias, concentraciones altas de oxígeno y con tolerancia a valores altos de conductividad y temperatura” (**Roldán, 2003**) y con los tricópteros, que suelen ser buenos indicadores de aguas oligotróficas (**Villa, et al., 2005**). En cuanto a los decápodos, se sabe que viven en todo tipo de hábitats, incluidos los hidrotermales y las cuevas (**Raso & Ramírez, 2015**), ya que su dieta puede adaptarse al consumo de detritos, materia orgánica y organismos en descomposición. Los higrófilos,

en cambio, tienen una diversidad más limitada que los decápodos, ya que son indicadores de aguas duras y alcalinas, y viven en sistemas con altas concentraciones de oxígeno y carbonatos de calcio (Roldán, 1996, 2003). En la mayoría de los géneros no se ha documentado la especificidad por los sistemas kársticos, salvo excepciones como *Mesovelina*, que puede vivir en grietas, sobre rocas y en cavernas (Pacheco, 2010). Pese a que no existen diferencias notorias entre los dos muestreos en cuanto a la abundancia, durante abril se invirtió el patrón de riqueza y el mayor número de especies se encontró en el interior de las cavernas, lo cual se podría relacionar con el cambio en la disponibilidad de recursos según la temporada climática.

En cuanto a los peces, Reis, *et al.* (2016) describen que su diversidad, ecología y morfología están condicionadas por la profundidad del lecho, el tipo sustrato, la velocidad de flujo y por el estado de conservación de la vegetación ribereña, la cual proporciona refugio y heterogeneidad de hábitats a las comunidades ícticas (Sostoa, *et al.*, 2005; Poveda, *et al.*, 2018). Es por esto que La Gruta, con afectaciones más graves en dichos factores, presentó la menor abundancia y biomasa de peces, especialmente porque presenta una importante reducción del caudal y la profundidad en el exterior, condiciones más restrictivas para la movilidad de los peces que para los invertebrados.

A pesar de que la temperatura es considerada como el factor abiótico con mayor relevancia en la biología íctica, los rangos de tolerancia en peces de agua dulce usualmente no se conocen (Martínez, *et al.*, 2016). Aunque suele preferir temperaturas altas, *P. caucana* presenta una notable capacidad de aclimatación (Martínez, *et al.*, 2016) y los valores medidos se encuentran en el intervalo reportado por Gómez, *et al.* (1999), entre 23,6 y 29,2 °C. Además, esta especie se caracteriza por presentar una amplia distribución en fuentes hídricas de baja turbulencia y alto contenido de material vegetal en Colombia (Ortega-Lara, *et al.*, 2002). La presencia de pequeños ejemplares de los órdenes Siluriformes, loricáridos o Astroblápidos se explica porque son propios de ríos de montaña como los que cruzan los karsts. Según Mojica, *et al.* (2012) y Poveda, *et al.* (2018), no hay suficiente investigación sobre este grupo, ni sobre sus respuestas a las modificaciones del entorno; de hecho, solo se conoce que presentan hábitos nocturnos y buscan refugio en la vegetación sumergida y las cavernas en el día (Jiménez, *et al.*, 2014; Dahl, 1971). Sin embargo, en este caso particular no presentó un patrón de distribución preferencial por el interior de las cavernas, corroborando así el comportamiento documentado en el estudio de Mesa & Lasso (2019) en sistemas kársticos de Santander (Colombia), en el cual el orden Siluriformes fue el más representativo entre los peces epigeos.

Otros individuos menos abundantes como los pequeños carácidos fueron moderadamente más abundantes en el interior de la caverna Caracoles. *Bryconamericus caucanus*, por ejemplo, conocida por su gran capacidad de adaptación debido a su dieta generalista, que incluye desde insectos acuáticos (dípteros y coleópteros) y hormigas hasta semillas y material vegetal (Maldonado, *et al.*, 2005), predominó en las corrientes bajas con presencia de material vegetal sumergido (Jiménez, *et al.*, 2014). Esta característica la comparte con el género *Argopleura*, que es tolerante a hábitats con altos niveles de material en suspensión (Ortega-Lara, *et al.*, 2002). Otras especies recolectadas en este estudio, como *Trychomycterus striatus*, se caracterizan primordialmente por ser depredadores y estar en sistemas donde se encuentren insectos, macroinvertebrados (especialmente quironómidos) y arácnidos (Ortega-Lara, *et al.*, 2002; Lasso, *et al.*, 2019). Además, se sabe que el género *Trychomycterus* es característico de ecosistemas cavernícolas e incluye especies tanto troglobias como epigeas (Mesa *et al.*, 2018), mientras que los individuos de *Geophagus steindachneri*, a pesar de que se pueden ubicar en diversos tipos de hábitats, predominan en aquellos sistemas donde el sustrato que domine sea de tierra (Ortega-Lara, *et al.*, 2002). *Synbranchus marmoratus*, por su parte, además de sobrevivir en afluentes con bajos niveles de oxígeno (Graham, *et al.*, 1995), durante su fase juvenil se alimenta de insectos acuáticos y pequeños peces (Maldonado, *et al.*, 2005). Dado que su visión es pobre y caza en la oscuridad, era de esperar que un juvenil como el capturado en el estudio fuera exitoso explotando los recursos que ofrecen las cavernas.

Relación entre los macroinvertebrados, los peces y la variabilidad ambiental

La velocidad de una corriente, además de la temperatura y el oxígeno de un sistema, son determinantes para la presencia y distribución de los macroinvertebrados (Domínguez & Fernández, 2009) y peces (Reis, *et al.*, 2016). Lo cual se corroboró en este estudio, pues la presencia se vio favorecida tanto por las temperaturas relativamente bajas como por las altas concentraciones de oxígeno y de caudales, lo que permite la permanencia de dichas comunidades. No obstante, la varianza debida a las variables ambientales del estudio no explica el comportamiento de la abundancia, la riqueza y la biomasa de estos organismos, lo cual hace suponer que otras variables como el estado de conservación de los bosques y la dinámica y oferta de recursos tróficos pueden ser importantes agentes tensores en las cavernas (Bianucci, *et al.*, 2005), y resultan determinantes en la estructura de las asociaciones presentes en las cavernas del oriente antioqueño. Ello se deduce de que factores como la productividad primaria acuática del medio externo explicarían la mayor abundancia y riqueza de invertebrados, además de la abundancia y biomasa de peces en el exterior, especialmente en corrientes con mejor estado de conservación, en tanto que la cobertura vegetal provee recursos que son transportados por los invertebrados, por la ictiofauna o por la corriente al interior de las cavernas donde proveen de materia orgánica a sus habitantes (Ferreira & Martins, 1999), para luego ser lavados durante las crecientes con la consecuente movilización y disponibilidad de recursos en el sistema (Posada, *et al.*, 2000).

Conclusión

Las especies presentes en las corrientes de los ecosistemas kársticos de San Luis y Sonsón (Antioquia) en el periodo hidrológico de 2016-2017 fueron principalmente macroinvertebrados efemerópteros, coleópteros y tricópteros, así como pequeños peces no hipógeos, como *P. caucana* y, en menor proporción, carácidos y siluriformes. Ninguno de estos organismos con flexibilidad trófica mostró una dependencia particular de las variables fisicoquímicas del agua, pero se encontraron dentro o fuera de la caverna en función del periodo hidrológico. Ello sugiere una relación con la cobertura vegetal y la oferta de recursos de los organismos del interior de las cavernas, como lo evidencia la menor abundancia y particular composición de especies en la caverna La Gruta, caracterizada por el mayor impacto antrópico sobre los bosques. Esta aparente dependencia con la calidad de los bosques, los vertebrados y la vida acuática de las cavernas prevaleció sobre el efecto de la calidad química del agua.

Información suplementaria

Tabla 1S. Registro de la riqueza de especies de macroinvertebrados capturadas en los ecosistemas kársticos de Sonsón y San Luis entre octubre de 2016 y abril de 2017. Vea la tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1260/2993>

Tabla 2S. Registro de la abundancia de especies de peces capturadas en los ecosistemas kársticos de Sonsón y San Luis entre octubre de 2016 y abril de 2017. Vea la tabla 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1260/2993>

Agradecimientos

A la Universidad Católica de Oriente (UCO) por la financiación del proyecto, al Grupo en Limnología y Recursos Hídricos de la UCO, especialmente al ingeniero Esteban Peláez Sánchez por su apoyo durante los muestreos, y al Semillero de Ecología Acuática (SEA), liderado por la Dra. Silvia Lucía Villabona González, por su cooperación a lo largo de la investigación.

Contribución de los autores

DMJ: elaboración del resumen y la sección de área de estudio; obtención y análisis del método BMWP/Col adaptado por Roldán, revisión de la forma y ortografía del artículo; KM: tratamiento estadístico de los datos (Anova, discriminantes canónicos, gráfica de

similitud, tablas anexas) en los diferentes programas; toma de las muestras en campo, separación e identificación de macroinvertebrados y peces, búsqueda de información para la sustentación de la investigación, y elaboración del artículo; MIR: propuesta de los objetivos de la investigación, planteamiento de la metodología; identificación de la ictiofauna recolectada; participación en los análisis de datos, y el establecimiento de los lineamientos para la estructuración, corrección y mejora del artículo.

Conflicto de intereses

Ninguno que declarar

Referencias

- Abril, A. & Medrano, M.** (2010). Análisis limnológico de ecosistemas acuáticos del Parque Nacional Natural Cueva de los Guácharos. Análisis comparativo de los cuerpos de agua del Parque Nacional Natural Cueva de los Guácharos (Acevedo, Huila). Repositorio Universidad Nacional de Colombia, 9 - 18. https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/7541/INFORME_FINAL_CAMPO_CONTINENTAL_PNN_CUEVA_DE_LOS_GUACHAROS_II-2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Álvarez, L.** (2005). Metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C, Colombia. 263 p.
- Álvarez, L. F. & Roldán, G. A.** (1982). Estudio del orden Hemiptera (Heteroptera) en el departamento de Antioquia en diferentes pisos altitudinales. *Actualidades Biológicas*. **12**: 35-48.
- American Public Health Association, American Water Works, Water Environment Federation - APHA, AWWA, WEF.** (2016). Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. American Public Health Association. Washington, DC., USA: 541 p.
- Arango, M. C. & Roldán, G. A.** (1983). Odonatos inmaduros del departamento de Antioquia en diferentes pisos altitudinales. *Actualidades Biológicas*. **12**: 91-105.
- Aristizábal, H.** (2002). Los hemípteros de la película superficial del agua en Colombia. Parte 1. Familia Gerridae. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colección Jorge Álvarez Lleras. Bogotá, D.C., Colombia: 216 p.
- Aristizábal-García, H.** (2016). Hemípteros acuáticos y semiacuáticos del Neotrópico. Gente Nueva. Bogotá, D. C., Colombia: 984 p.
- Bedoya I. & Roldán, G. A.** (1984). Estudio de los dípteros acuáticos en diferentes pisos altitudinales en el departamento de Antioquia. *Revista Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*. **2**: 113-134.
- Bianucci, S. P., Ruperto, A. R., Depettris, C. A., Clemente, M. T.** (2005). Aplicación de indicadores de impacto ambiental al estudio de calidad de aguas continentales: caso de la laguna Los Lirios, Resistencia, Argentina. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*. **10**: 1-4. www.unne.edu.ar
- Boluda, N.** (2000). Efecto de vertederos municipales en la calidad de las aguas subterráneas del valle central de Costa Rica. *Información Tecnológica*, Repositorio Universidad de Alicante. **11**: 1-10. https://www.researchgate.net/publication/322580915_EFECTO_DE_VERTEDEROS_MUNICIPALES_EN_LA_CALIDAD_DE_LAS_AGUAS_SUBTERRANEAS_DEL_VALLE_CENTRAL_DE_COSTA_RICA
- Correa, M., Machado, T., Roldán, G. A.** (1981). Taxonomía y ecología del orden Trichoptera en el departamento de Antioquia en diferentes pisos altitudinales. *Actualidades Biológicas*. **10**: 35-48.
- Craig, A. L., Allgeier, J. E., Yeager, L. A., Stoner, E. W.** (2012) Thresholds of Ecosystem Response to Nutrient Enrichment from Fish Aggregations. *Ecology*. En: University of Georgia. (2012, December 11). Fish have enormous nutrient impacts on marine ecosystems, study finds. *ScienceDaily*. www.sciencedaily.com/releases/2012/12/121211163545.htm.
- Creuzédes, M., Juget, J., Lafont, M., Martín, P.** (2009). Subterranean aquatic Oligochaeta. *Freshwater Biology*. **54**: 678-690.
- Dahl, G.** (1971). Los Peces del Norte de Colombia. INDERENA - Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente. Bogotá, D.C., Colombia: 391 p.
- Decu, V.** (1986). Some considerations on the bat guano synusia. *Travaux de L'Institut de Spéologie "Emile Racovitza"*. **25**: 41 - 52.

- Domínguez, E. & Fernández, H.** (2009). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Primera Edición. Sistemática y Biología, Fundación Miguel Lillo. Tucumán, Argentina. 656 p.
- Domínguez, E., Hubbard, M. D., Pescador, M. L.** (1994). Los Ephemeroptera en Argentina. Fauna dulce de la República Argentina. **33**: 1-142.
- Domínguez, E., Molineri, C., Pescador, M., Hubbard, M., Nieto, C.** (2006). Ephemeroptera of South America, Aquatic Biodiversity of Latin America. En: Adis, J., Arias, JR., Rueda-Delgado, G., Wantzen, KM., editors. Aquatic Biodiversity of Latin America. Volume 2, Pensoft, Sofia-Moscow. 640 p.
- Erikson, F.H. & Nosanchuk, T. A.** (1977). Understanding Data. McGraw Hill. Toronto, Canadá. 376 p.
- Eslava, J., Bahamón, S., Romero, M.** (2000). Clasificación climática de los karst. Meteorología Colombiana. **2**: 67-72. <https://docplayer.es/33672011-Clasificacion-climatica-de-los-karst.html>
- Ferreira, R. L. & Martins, R. P.** (1999). Tropic structure and natural history of bat guano invertebrate communities, with special reference to Brazilian caves. Tropical Zoology. **12**: 231-252.
- Flórez, C., Estupiñán-Suárez, L. M., Rojas, S., Aponte, M., Quiñones, M., Acevedo, O., Jaramillo, U.** (2016). Identificación espacial de los sistemas de humedales continentales de Colombia. Biota Colombiana. **17**: 44-62.
- Florián, A.** (2008). Caracterización de la cantera para propagación de señales RF. Capítulo IV. Teoría de Diseño de Experimentos. Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica. Escuela de Ingeniería y Ciencias. Universidad de las Américas. Cholula-Puebla, México. 53-62. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/florian_m_a/capitulo4.pdf
- Graham, J., Lai, N., Chiller, D., Roberts, J.** (1995). The transition to air breathing in fishes. V. Comparative aspects of cardiorespiratory regulation in *Synbranchus marmoratus* and *Monopterus albus* (Synbranchidae). Journal of Experimental Biology. **198**: 1455-1467.
- Harris, J. A.** (1970). Bat – Guano cave environment. Science. **169**: 1342-1343.
- Heckman, C. W.** (2011). Encyclopedia of South American aquatic insects: Hemiptera - Heteroptera. Illustrated keys to known families, genera, and species in South America. Springer. New York, Estados Unidos: 329 p.
- Hunter, C., Hardwick, P., Perkins, J., Tranter, J.** (2000). Fecal bacteria in the waters of an upland area in Derbyshire, England: the influence of agricultural land use. Journal Environmental Quality. **29**: 1253-1261.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).** (1998). Conservación de los ecosistemas subterráneos en Colombia. Biosíntesis. **10**: 1-4. http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/32627/biosintesis_10.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Jiménez, L. F., Álvarez, L. E., Ochoa, A., Loaiza, J. P., Londoño, D., Restrepo, K., Aguirre, A., Hernández, J. D., Correa, J., Jaramillo, U.** (2014). Guía ilustrada de peces Cañón del Río Porce, Antioquia. EPM, Universidad de Antioquia, Herbario Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia: 110 p.
- Ladrera, R., Rieradevall, M., Prat, N.** (2013). Macroinvertebrados acuáticos como indicadores biológicos: una herramienta didáctica. Revista de Didáctica. **11**: 1-18. http://www.ehu.es/ikastorratza/11_alea/macro.pdf.
- Lasso, C.A., Barriga, J.C., Fernández-Auderset, J.** (Eds). (2019). Volumen VII. Biodiversidad subterránea y epigea de los sistemas cársticos de El Peñón (Andes), Santander, Colombia. Serie Editorial Fauna Silvestre Neotropical. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia. 476 p.
- Machado, T. & Rincón, J.** (1989). Distribución ecológica e identificación de los coleópteros acuáticos en diferentes pisos altitudinales del departamento de Antioquia. Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Biología. Medellín, Colombia: 324 p.
- Maldonado, J. A., Ortega, A., Usma, J. S., Galvis, G., Villa, F. A., Vásquez, L., Prada, S., Ardila, C., Calle, J. C.** (2005). Peces de los Andes de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia: 346 p. http://awsassets.panda.org/downloads/peces_de_los_andes_de_colombia.pdf
- Manzo, V.** (2005). Key to the South America genera of Elmidae (Insecta: Coleoptera with Distributional Data. Studies on Neotropical Fauna and Environment. **40**: 201-208.
- Martínez, J. D., Cadena, C. D., Torres, M.** (2016). Critical thermal limits of *Poecilia caucana* (Steindachner, 1880) (Cyprinodontiformes: Poeciliidae). Neotropical Ichthyology. **14**: 1-15. https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-62252016000100210

- Mesa, L., Lasso, C. A., Ochoa, L., DoNascimento, C.** (2018). *Trichomycterus rosablanca* (Siluriformes, Trichomycteridae) a new species of hipogean catfish from the Colombia Andes. *Biota Colombiana*. **19**: 95-116.
- Mesa, L. & Lasso, C. A.** (2019). Peces epígeos de El Peñón de y áreas adyacentes (Andes), Santander, Colombia, Colombia. Pp. 401-418. En: Lasso, C. A., Barriga, J. C., Fernández-Auderset (Eds). (2019). VII. Biodiversidad subterránea y epigea de los sistemas cársticos de El Peñón (Andes), Santander, Colombia. Serie Editorial Fauna Silvestre Neotropical. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia. 476 p.
- Mojica, J., Usma, J. S., Álvarez, R., Lasso, C.** (2012). Libro Rojo de Especies Dulceacuáticas de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, Fondo Mundial para la Naturaleza-WWF Colombia y Universidad de Manizales. Bogotá, D.C., Colombia: 319 p.
- Moreno, C.E., Barragán, F., Pineda, E. Pavón, N.P.** (2011). Reanálisis de la diversidad alfa: alternativas para interpretar y comparar información sobre comunidades ecológicas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. **82**: 1249-1261.
- Naranjo, C., Muñoz, S., Moreira, F. F., Curt, R. C.** (2010). Taxonomy and distribution of aquatic and semiaquatic Heteroptera (Insecta) from Cuba. *Biología Tropical*. **58**: 897-907.
- Organización Mundial de la Salud-OMS.** (2006). Guías para la Calidad del Agua Potable. Primer Apéndice a la tercera Edición. Biblioteca de la OMS. Gineve, Suiza: 408 p.
- Ortega-Lara, A., Usma, S., Bonilla, P., Santos, N.** (2002). Peces de la Cuenca Alta del Río Cauca, Colombia. *Biota Colombiana*. **7**: 39-54.
- Pacheco, B.** (2010). Guía Ilustrada para el estudio ecológico y taxonómico de los insectos acuáticos del orden Hemiptera en El Salvador. Editorial Universitaria de la Universidad de El Salvador. San Salvador, El Salvador: 49 p. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/9093/1/GUIA%20HEMIPTERA%20ACUATICOS%20EL%20SALVADOR%20%284.1MB%29.pdf>
- Peck, S. B., Ruíz-Baliú, A. E., Garcés-González, G. F.** (1998). The cave-inhabiting beetles of Cuba (Insecta: Coleoptera): Diversity, distribution and ecology. *Journal of Cave and Karst Studies*. **60**: 156-166.
- Posada, J. A., Roldán, G. A., Ramírez, J. J.** (2000). Caracterización físico-química y biológica de la calidad de las aguas de la cuenca de la Quebrada Piedras Blancas. *Revista de Biología Tropical*. **48**: 59 -70.
- Poveda, J. L., López, E. O., Villa, F. A.** (2018). Efecto de la cobertura vegetal de ribera en las comunidades ícticas del bosque húmedo premontano y muy húmedo premontano del Alto Magdalena, Colombia. *Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **42**: 216-226.
- Posada, J. A. & Roldán, G. A.** (2003). Clave ilustrada y diversidad de las larvas de Trichoptera en el noroccidente de Colombia. *Caldasia*. **25**: 169-192. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/39407/41298>
- Pussey, B. & Arthington, A.H.** (2003). Importance of the riparian zone to the conservation and management of freshwater fish: a review. *Marine and Freshwater Research*. **54**: 1-16.
- Raso, J. E. & Ramírez, Á. M.** (2015). Orden Decapoda. *Revista Ibero Diversidad Entomológica Accesible IDE@.* **80**: 1-17. http://sea-entomologia.org/IDE@/revista_80.pdf
- Reis, R. E., Albert, J. S., Di Darios, F., Mincarone, M. M., Petry, P., Rocha, L. A.** (2016). Fish biodiversity and conservation in South America. *Fish Biology*. **89**: 12 - 47.
- Resende, L. P., Zepon, T., Paula, C. C., Selegim, M. H., Bichuette, M. E.** (2015). Inventario preliminar de comunidade aquática microbiana e de macroinvertebrados em cavernas de Presidente Olegários, Minas Gerais. Pp. 109-116. En: Rasteiro, M. A., Sallun - Filho, W (Orgs). Congreso Brasileiro De Espeleología.
- Rojas, A.M. & Zúñiga, M. del C.** (1995). Contribución al conocimiento del orden Plecoptera en Colombia y su relación con la calidad del agua. Pp 101-119. En: Memorias Seminario de Invertebrados Acuáticos y su Utilización en Estudios Ambientales. Sociedad Colombiana de Entomología y Universidad de Colombia (Eds). Santafé de Bogotá, Colombia.
- Roldán, G. A.** (1996). Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. Editorial Santa Fe de Bogotá: FEN Colombia. Bogotá, D.C., Colombia: 359 p.
- Roldán, G. A.** (2003). Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: Uso del método BMWP/Col. Editorial Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia: 170 p.
- Roldán, G. A.** (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y en Latinoamérica. *Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **40**: 254-274.

- Roldán, G. A. & Ramírez, J. J.** (2008). Fundamentos de Limnología Neotropical. 2da. Ed. Editorial Universidad de Antioquia, Universidad Católica de Oriente y Academia Colombiana de Ciencias Exactas y Naturales. Medellín, Colombia: 440 p.
- Salavert, V., Zamora-Muñoz, C., Tinaut, A.** (2011). Distribución de tricópteros troglófilos (Trichoptera, Limnephilidae) en cuevas andaluzas (Andalucía, España). Boletín Asociación Española de Entomología. **35**: 325-344.
- Sostoa, A., García, D. García, E.** (2005). Metodología para el establecimiento del estado ecológico según la directiva marco del agua en la Confederación Hidrográfica del Ebro. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, España: 235 p.
- Spangler, P. J. & Bar, C. B.** (1995). A new genus and species of stygobiontic dytiscid beetle, *Comaldessus stygius* (Coleoptera: Dytiscidae: Bidessini) from Comal Springs, Texas. Insecta Mundi. **9**: 301-308.
- Spangler, P. J. & Santiago-Fragoso, S.** (1992). The Aquatic Beetle Subfamily Larainae (Coleoptera: Elmidae) in México, Central America, and the West Indies. Smithsonian Institution Contribution to Zoology. **528**: 1-74.
- Taylor, E. & Lopes, R.** (2012). Determinants on the structure of an aquatic invertebrate community in a Neotropical limestone cave. Revista Brasileira de Espeleologia. **2**: 1-12.
- Vides-Navarro, F., Montes-Calderón, A., Fernández-Cuello, G., Rojas-Martínez, E.** (2015). Caracterización espeleológica e inventario biológico de la caverna del Diablo en el municipio de Becerril, Departamento del Cesar, Colombia. Respuestas. **20**: 93-104.
- Villa, F. A., Reynoso, G., Losada, S., Bernard, M. H., Esquivel, H. E., García, J. E., Vejarano, M. A.** (2005). Biodiversidad faunística y florística de la cuenca del río Prado- Diversidad regional Fase II. Informe técnico. Cortolima-Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia. 1308 p.

Original article

Early silvicultural performance of eucalypt species grown in environmental conditions of the tropical dry forest of Colombia

Desempeño silvicultural temprano de especies de eucalipto en las condiciones ambientales del bosque seco tropical de Colombia

Camila Andrea Báez-Aparicio, Ana Milena López-Aguirre, Alonso Barrios-Trilleras*

Grupo de investigación "Madera & Bosques", Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

Abstract

The establishment of new forest plantations requires making important decisions starting with the selection of the species to be planted, as well as the choice of an adequate planting spacing to guarantee the maximization of wood production. The aim of this study was to evaluate the performance of nine eucalypt species planted with three different spacings under the environmental conditions of the tropical dry forest of the inter-Andean valleys of Colombia. A split-plot arrangement with two replicates was used as the experimental design. The planting spacing factor (three planting spacings) was assigned to the main plots and the species factor (nine eucalypt species) was assigned to the subplots. Survival and growth were evaluated at twenty-four months of age. The study identified the Brazilian provenances of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, *Eucalyptus grandis* W. Hill, and *Eucalyptus pellita* F. Muell. and the Colombian provenance of *Eucalyptus pellita* F. Muell. as promising for commercial reforestation programs in areas with a water deficit in the tropical dry forest. Planting spacings of 3×2 m (1666 stems·ha⁻¹) and 3×2.5 m (1333 stems·ha⁻¹) maximized the production of basal area and the volume for the species evaluated. Finally, no interaction was detected between species and planting spacing factors, therefore, the species identified had a better performance regardless of the planting spacing used.

Keywords: Adaptation; Reforestation; Spacing; Species selection.

Resumen

El establecimiento de nuevas plantaciones forestales requiere la adopción de decisiones importantes, comenzando por la selección de las especies que se van a plantar, así como la elección de un espaciamiento de plantación adecuado para maximizar la producción de madera. El objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento de nueve especies de eucalipto plantadas en tres espaciamientos diferentes en las condiciones ambientales del bosque seco tropical de los valles interandinos de Colombia. Se utilizó un arreglo en parcelas divididas con dos repeticiones como diseño experimental. El factor de espaciamiento de siembra (tres espaciamientos) se asignó a las parcelas principales y el factor de especie (nueve especies de eucalipto) se asignó a las subparcelas. La supervivencia y el crecimiento se evaluaron a los veinticuatro meses de edad. Se identificaron las procedencias brasileñas de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, *Eucalyptus grandis* W. Hill y *Eucalyptus pellita* F. Muell. y la procedencia colombiana de *Eucalyptus pellita* F. Muell. como prometedoras para los programas comerciales de reforestación en áreas con déficit hídrico en el bosque seco tropical. Los espaciamientos de plantación de 3×2 m (1.666 árboles·ha⁻¹) y 3×2,5 m (1.333 árboles·ha⁻¹) maximizaron la producción de área basal y de volumen de las especies evaluadas. Por último, no se detectó interacción entre las especies y el espaciamiento de plantación, por lo tanto, las especies identificadas se desempeñaron mejor independientemente del espaciamiento de plantación usado.

Palabras clave: Adaptación; Reforestación; Espaciamiento; Selección de especies.

Citación: Báez-Aparicio CA, López-Aguirre AM, Barrios-Trilleras A. Early silvicultural performance of eucalypt species grown in environmental conditions of the tropical dry forest of Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):449-461, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1288>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Alonso Barrios-Trilleras;
abarriost@ut.edu.co

Received: August 8, 2020

Accepted: March 2, 2021

Published: June 17, 2021



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

Introduction

The establishment of forest plantations with fast-growth species, such as the genus *Eucalyptus* (Myrtaceae), represents a high profitability option for commercial reforestation (Obregon & Restrepo, 2006). Eucalypts have a great capacity of adaptation to a wide range of site conditions, different management systems, and different end uses (Moura, 2001); moreover, they cover more than 20 million hectares around the world (Ferreira, et al., 2019) mainly in tropical and sub-tropical countries. In Colombia, the genus *Eucalyptus* is one of the most used by forestry companies and it is estimated that approximately 57 thousand hectares are planted with this genus in the country (PROFOR, 2017).

One of the most important decisions to consider when establishing new forest plantations is the selection of the species to be planted, as well as the choice of an adequate planting spacing to ensure the maximization of wood production. The selection of suitable species is a fundamental stage in forestry (Rollan, et al., 2018). Choosing the right species for each environment favors the formation of high-yield plantations. In tropical regions, the most important selection factors for assigning a species are the level of productivity, the resistance to pests and diseases, the tolerance to drought, and the suitability of wood properties (Gonçalves, et al., 2013).

Several studies evaluating *Eucalyptus* growth in different environmental conditions have shown that the yield of the same species varies according to the place where it is grown (Coutinho, et al., 2004; Delgado-Matas & Pukkala, 2011; du Toit, et al., 2017; Ferreira, et al., 2017). Since each species develops in a specific environment, the species selection process needs to be site-specific, an approach that results in satisfactory yields according to the potential environmental site conditions (Del Quiqui, et al., 2001; Moura, 2001). In this regard, species trials are a useful tool to evaluate species and select the one with the highest productivity and the best adaptation to the planting site.

The climate in tropical dry forests is characterized by evapotranspiration that greatly exceeds precipitation during most of the year with subsequent water deficit (Pizano & García, 2014). These conditions make plant productivity dependent on the amount of water available and its efficient use by the organism (Yepes & Buckeridge, 2011). According to Gonçalves, et al. (2013; 2017), in the case of the *Eucalyptus* genus, the most drought-tolerant pure and hybrids species are *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Eucalyptus tereticornis* Sm., *E. grandis* × *E. urophylla*, *E. grandis* × *E. camaldulensis*, and *E. urophylla* × *E. camaldulensis*. In Colombia, the frequent use of at least six eucalypt species by forest producers has been documented (Borrvalho & Nieto, 2012). However, there is still a lot of uncertainty regarding the species to be planted and their potential productivity, especially in marginal sites with water restrictions.

On the other hand, the selection of an adequate planting spacing is important because it affects site occupation, average log sizes, and wood quality, which are key components in the forest plantation economy (Akhtar, et al., 2008). Determining the planting density is a complex and important decision for producers since it affects the whole cycle given its significant effect on individual trees and stand growth (Guerra, et al., 2014). In eucalypt forest plantations the initial space between trees has been based on spacing trials, which usually range between 1000 and 2500 stems·ha⁻¹ (Bernardo, et al., 1998; Meskimen & Franklin, 1978).

High tree densities provide higher growth per hectare implying more intense competition for resources and faster site occupation (Chen, et al., 2011; Forrester, et al., 2013). Additionally, in high-density plantations the maximum current (CAI) and mean annual increments (MAI) may also occur earlier during stand development. For the production of *Eucalyptus* pulp and paper, 3×2 m (1666 stems·ha⁻¹) and 3×2.5 m (1333 stems·ha⁻¹) spacings have frequently been implemented (Caterina, 2017). Previous studies have shown that higher densities also have effects on wood properties. For instance, Rocha, et al. (2016) found that the planting of *E. grandis* × *E. camaldulensis* clones in a 4.5 to 9.0 m² (2222 to 1111 stems·ha⁻¹) spacing increased wood density and resulted in the production of raw materials more suitable for energy purposes.

Conversely, lower densities generated trees with larger sizes but took longer to occupy the site completely while the growth rate of the stand may be slower and the rotation age occurred later (Forrester, et al., 2013; Stape & Binkley, 2010). For the production of high-quality saw timber, a wider initial spacing (500 to 800 stems·ha⁻¹) is recommended in sites of good quality as it ensures a high potential for increasing diameter during the first three years (Nutto, et al., 2006).

Planting densities in Colombia have often been prescribed without considering the capacity of the site, the species, and the interaction site-species, which has led to a waste of the productive capacity of the sites (Barrios, et al., 2011). Therefore, it is important to evaluate the species, as well as their interaction with planting density, to maximize site productivity. In this context, the objective of this study was to evaluate the early silvicultural performance of nine species of *Eucalyptus* in three planting spaces under the environmental conditions of tropical dry forests in a site located in the inter-Andean valleys of Colombia.

Materials and methods

The species trial was conducted in an experimental area of the *Universidad del Tolima* located in the municipality of Armero, Tolima, Colombia (5°00'58.1"N; 74°54'27.2"W) (Figure 1) in a tropical dry forest (Holdridge, 1947) of the inter-Andean valleys at 227 meters above sea level, a mean annual temperature of 28 °C and average relative humidity of 71 %, the total annual precipitation is 1700 mm with a bimodal distribution: a rainy period from April to June and another one from October to December. As regards the climatic water balance (precipitation – evapotranspiration), there are eight months with climatic water deficit (Fernández, et al., 2014). The landscape geomorphology corresponds to that of piedmont with a terrace-fan relief, low slopes of 0-3 %, and soils with sandy clay loam texture (IGAC, 2004).

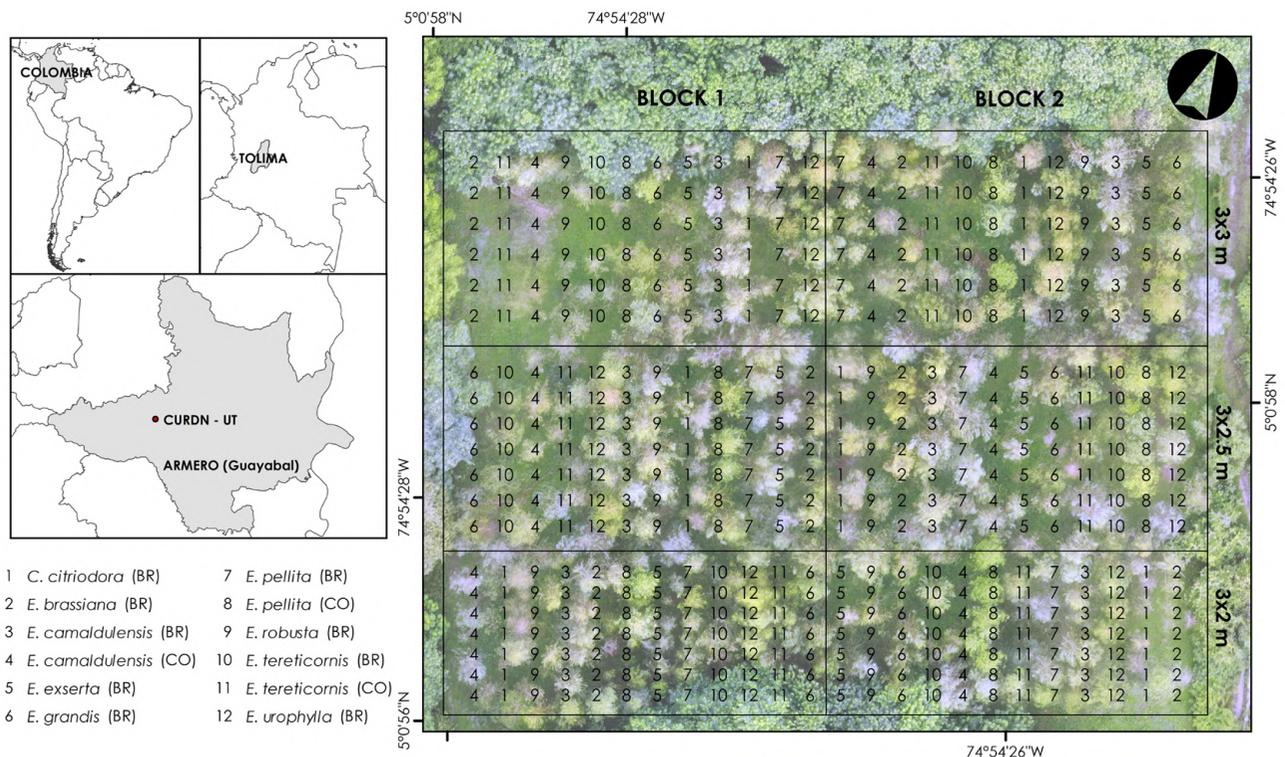


Figure 1. Study area location and experimental design of the eucalypt species trial in Armero (Guayabal), Tolima, Colombia. BR: Provenance from Brazil; CO: Provenance from Colombia

We used seeds of nine eucalypt species for seedlings production. All the nine eucalypt species were provenances from Brazil (BR). We also evaluated three provenances from Colombia (CO) (**Table 1**). The seedlings were kept in the nursery for three months until they reached an average height of 30 cm, approximately. Site preparation included sub-soiling at a 60 cm depth and the use of a hydro-retaining polymer for each individual at the moment of planting. We applied two fertilizations during the first year and carried out at least four yearly mechanical weed controls.

We used a split-plot design where the whole plots (main plots) were the planting spacing factor with three levels: 3×2 m (1666 stems·ha⁻¹), 3×2.5 m (1333 stems·ha⁻¹), and 3×3 m (1111 stems·ha⁻¹) while subplots were the species factor with 12 levels (**Table 1**), and two replicates (blocks). The stand densities evaluated are commonly associated with management prescriptions for pulp and saw timber production (**Barrios, et al., 2011**). Each subplot was comprised of a row of around 6 to 7 trees of each of the species under evaluation as recommended for species trials (**Lott & Wardill, 2009**) (**Figure 1**). The split-plot design is commonly used in forestry research, as it is suitable for two-factor experiments in which the levels of one of the factors require a larger plot size while the other requires smaller size plots (**Jayaraman, 1999; Lott & Wardill, 2009**).

We began taking measurements after 12 months of planting and repeated them at 18 and 24 months. The variables measured included diameter at breast height (dbh), total height, crown diameter, basal area, volume, and survival. We measured the dbh 1.3 m above ground level with a diameter tape, the total height with a laser hypsometer (Nikon Forestry 550), and the crown diameter with a laser range finder (Meco® Laser Distance Meter, DLDM60). We determined the volume (*v*) per individual tree as $g \times h \times ff$ where (*g*) is the basal area, *h* the total height (m), and *ff* the form factor assumed as 0.5. This form factor was selected based on previous studies on eucalypts. **Nieto & Gasca (2010)** used a form factor of 0.5 to evaluate *Eucalyptus pellita* superior trees in Colombia. **Delgado & Pukkala (2011)** reported a form factor of 0.51 for different species of tropical *Eucalyptus* growing in Africa. Likewise, **Hernández-Ramos, et al. (2017)** reported a form factor of 0.45 for *Eucalyptus urophylla* in Tabasco, México, and **Acosta (2018)** one that varied from 0.46 to 0.54 for *Eucalyptus grandis* grown in Chimborazo, Ecuador.

The basal area and the volume per hectare were obtained from each treatment's plot level and then expanded to a hectare. The mean annual volume increment (MAI) corresponded to the quotient between the volume per hectare and the actual age of the trial. The

Table 1. Species and provenances of eucalypt evaluated

Number	Species	Provenance	Source
1	<i>Corymbia citriodora</i> (Hook.) K.D.Hill & L.A.S.Johnson	Restinga, São Paulo, Brasil	IPEF (SPA)
2	<i>Eucalyptus brassiana</i> S.T. Blake	Urbano Santos, Maranhão, Brasil	IPEF (SPA)
3	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh.	Açailândia, Maranhão, Brasil	IPEF (SPA)
4	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh.	Ibagué, Tolima, Colombia	Semicol (SPA)
5	<i>Eucalyptus exserta</i> F. Muell.	Itatinga, São Paulo, Brasil	IPEF (SPA)
6	<i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill	Anhembi, Sao Paulo, Brasil	IPEF (SO)
7	<i>Eucalyptus pellita</i> F. Muell.	Anhembi, Sao Paulo, Brasil	IPEF (SPA)
8	<i>Eucalyptus pellita</i> F. Muell.	Villanueva, Casanare, Colombia	Refocosta (SPA)
9	<i>Eucalyptus robusta</i> Sm.	Itatinga, São Paulo, Brasil	IPEF (SPA)
10	<i>Eucalyptus tereticornis</i> Sm.	Urbano Santos, Maranhão, Brasil	IPEF (SPA)
11	<i>Eucalyptus tereticornis</i> Sm.	Cáqueza, Cundinamarca, Colombia	El Semillero (SPA)
12	<i>Eucalyptus urophylla</i> S.T. Blake	Anhembi, Sao Paulo, Brasil	IPEF (SPA)

* IPEF: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais; SPA: Seed production area; SO: Seedling orchard

survival (in percentage) was determined as the quotient between the number of live trees and the overall planted trees. Additionally, to evaluate the adaptation of eucalypt species to the environmental conditions of the study area, we evaluated the global phytosanitary status of each tree considering four levels of affectation modified from Carrasco, *et al.* (2019) (1= healthy; 2= mildly affected, i.e., < 25 % affected; 3= moderately affected, i.e., between 25 and 50 % affected, and 4= severely affected, i.e., > 50 % affected).

At 24 months of age, we submitted the experimental data to an analysis of variance using the Statistical Analysis System (SAS) software (SAS Institute Inc., 2009). The Kolmogorov-Smirnov normality test was used to assess the normality of the data and homogeneity of variances was verified by observing the fitted model residuals distribution. Prior to the statistical analysis, the survival data were transformed applying an arcsine square root transformation to meet normality. We used the following model for the split-plot design (Montgomery, 2004; Littell, *et al.*, 2006):

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \gamma_k + (\alpha\gamma)_{ik} + \varepsilon_{ijk} \quad (\text{Eq. 1})$$

where Y_{ijk} is the response variable, μ the overall mean, α_i the effect of the i^{th} planting spacing, β_j the block random effects, $(\alpha\beta)_{ij}$ the random error of whole plots, γ_k the effect of k^{th} species, $(\alpha\gamma)_{ik}$ the interaction between planting spacing and species, and ε_{ijk} the random error of subplots. When the analysis of variance found significant differences for some factors, we used a Tukey multiple comparison test to find the treatments that were different. All statistical analyses were performed considering a level of significance of $\alpha=0.05$.

Results

The analysis of variance found significant differences between species for all the variables evaluated ($p<0.05$). Conversely, planting spacing only had a significant effect on the basal area ($p<0.01$) and the volume ($p<0.05$) (Table 2). The analysis of variance also provided evidence to discard the interaction between the planting spacing and species factors for all the variables evaluated ($p>0.05$) (Table 2).

In general, all the species showed a good adaptation to the environmental conditions of the study area with survival rates between 67.9 % and 97.6 % (overall mean of 82.2 %). Among the species evaluated, we highlight the Brazilian provenances of *E. camaldulensis* and *E. pellita* with survival rates of 97.6 % and 92.5 %, respectively (Table 3). Conversely, *E. robusta* (BR) and *E. tereticornis* (BR) showed the lowest survival rates with 67.9 % (Table 3). When comparing the species from different origins, we found that the survival of the Brazilian provenances of *E. camaldulensis* and *E. pellita* was 19.8 and 10.3 % higher than the Colombian provenances, respectively. Contrarily, the survival rate of the Colombian provenance of *E. tereticornis* was 8.7 %, higher than the Brazilian provenance.

The species with the highest volume after 24 months of planting were the Brazilian provenances of *E. camaldulensis* ($91.07 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$), *E. urophylla* ($73.87 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$), *E. grandis* ($68.11 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$), and the Colombian ($55.15 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) and Brazilian provenances of *E. pellita* ($46.39 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$). These species also showed the best growth performance. Considering

Table 2. Analysis of variance of the main interactive effects of planting spacing and species

Source of variation	Df	Survival	Dbh	Total height	Crown diameter	Basal area	Volume
Planting spacing (P)	2	1.14 ^{ns}	2.51 ^{ns}	0.97 ^{ns}	0.12 ^{ns}	11.17 ^{**}	8.44 [*]
Species (S)	11	2.52 [*]	17.1 ^{***}	14.18 ^{***}	4.19 ^{**}	17.68 ^{***}	19.1 ^{***}
P×S	22	1.29 ^{ns}	0.92 ^{ns}	0.86 ^{ns}	0.74 ^{ns}	0.43 ^{ns}	0.42 ^{ns}

For each variable, the F-value and the significance level of the analysis of variance is shown: *, ** and *** indicate significant effects at $p<0.05$, $p<0.01$, and $p<0.0001$, respectively; ns: Non-significant

Table 3. Means and Tukey's grouping of survival and growth variables for eucalypt species at 24 months of planting. Means with different letters are statistically different ($p < 0.05$).

Species	Survival (%)		Dbh (cm)		Total height (m)		Crown diameter (m)		Basal area (m ² /ha)		Volume (m ³ /ha)		MAI (m ³ ·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)
<i>C. citriodora</i> (BR)*	81.75	ab	8.16	cdef	10.48	abcd	4.27	abc	6.29	defg	34.31	def	17.16
<i>E. brassiana</i> (BR)	84.13	ab	6.42	fg	8.44	de	3.12	bc	4.97	efg	27.09	ef	13.55
<i>E. camaldulensis</i> (BR)	97.62	a	11.27	ab	12.62	a	4.41	ab	13.79	a	91.07	a	45.54
<i>E. camaldulensis</i> (CO)	77.78	ab	5.80	g	6.91	e	3.00	c	3.37	g	13.96	f	6.98
<i>E. exserta</i> (BR)	88.10	ab	6.69	efg	8.53	de	3.39	abc	4.31	fg	20.05	ef	10.03
<i>E. grandis</i> (BR)	85.32	ab	10.55	ab	12.24	ab	4.46	ab	10.57	abc	68.11	abc	34.06
<i>E. pellita</i> (BR)	92.46	ab	9.09	bcd	10.03	bcd	4.43	ab	8.65	bcde	46.39	bcde	23.19
<i>E. pellita</i> (CO)	82.14	ab	10.06	abc	11.43	abc	4.44	ab	9.25	bcd	55.15	bcd	27.57
<i>E. robusta</i> (BR)	67.86	b	7.04	defg	8.69	de	3.55	abc	4.17	fg	22.13	ef	11.07
<i>E. tereticornis</i> (BR)	67.86	b	7.30	defg	9.05	de	3.79	abc	4.42	fg	23.90	ef	11.95
<i>E. tereticornis</i> (CO)	76.59	ab	9.03	bcde	9.15	cde	3.86	abc	7.65	cdef	40.64	cdef	20.32
<i>E. urophylla</i> (BR)	84.13	ab	11.46	a	12.04	ab	4.55	a	11.72	ba	73.87	ba	36.93
Overall mean	82.15		8.57		9.97		3.94		7.43		43.06		21.53

* BR: provenance from Brazil; CO: provenance from Colombia

volume production, the Colombian provenances of *E. pellita* and *E. tereticornis* were slightly higher than those of Brazil. However, the Brazilian provenance of *E. camaldulensis* was far superior to that of Colombia (**Table 3**).

As for stand basal area and volume, the 3×2 m and 3×2.5 m treatments were not significantly different ($p > 0.05$); however, they were significantly different from the 3×3 m treatment ($p < 0.05$) (**Table 2**). The analysis showed that the planting spacings of 3×2 m and of 3×2.5 m maximized the production of the basal area and volume reaching an average of 8.52 m²·ha⁻¹ and 49.19 m³·ha⁻¹, and 7.86 m²·ha⁻¹ and 46.13 m³·ha⁻¹, respectively. Conversely, the basal area and volume production notoriously decreased (5.92 m²·ha⁻¹, 33.86 m³·ha⁻¹) with the higher spacing (3×3 m).

Figure 2a shows the development of the mean annual volume increment (MAI) for each of the species under evaluation from the 12th to the 24th month: 24 months after planting, the MAI showed an average of 21.53 m³·ha⁻¹·year⁻¹ ranging from 6.98 to 45.54 m³·ha⁻¹·year⁻¹. Interestingly, the lowest MAI was that of the Colombian provenance of *E. camaldulensis* and the highest that of the Brazilian provenance of *E. camaldulensis*. As shown in **figure 2a**, the Brazilian provenances of *E. camaldulensis*, *E. urophylla*, *E. grandis*, and the Colombian and Brazilian provenances of *E. pellita* were the fastest-growing species among those under evaluation. Narrow planting spaces promoted a higher growth among the species evaluated reaching an average MAI of 24.59 and 23.06 m³·ha⁻¹·year⁻¹ for 3×2 m and 3×2.5 m planting spacings, which were 45 and 36 % higher than the MAI reached by the 3×3 m planting spacing (16.93 m³·ha⁻¹·year⁻¹), respectively (**Figure 2b**).

Although all the species showed some level of phytosanitary affectation, *E. camaldulensis* (BR) and *E. pellita* (CO) had the best adaptation to the study area with 69.2 % and 48.5 % of healthy trees while we found a higher percentage of trees severely affected for *E. grandis* (BR) (82.3 %) (**Figure 3**). The main damages were defoliation of the tree canopy caused by leafcutter ants and the occurrence of termites in the bark and semi-occluded dead branches of the trees. Additionally, bark lesions (e.g., bark splitting) were observed at the base of the stems in some trees, especially *E. grandis* specimens.

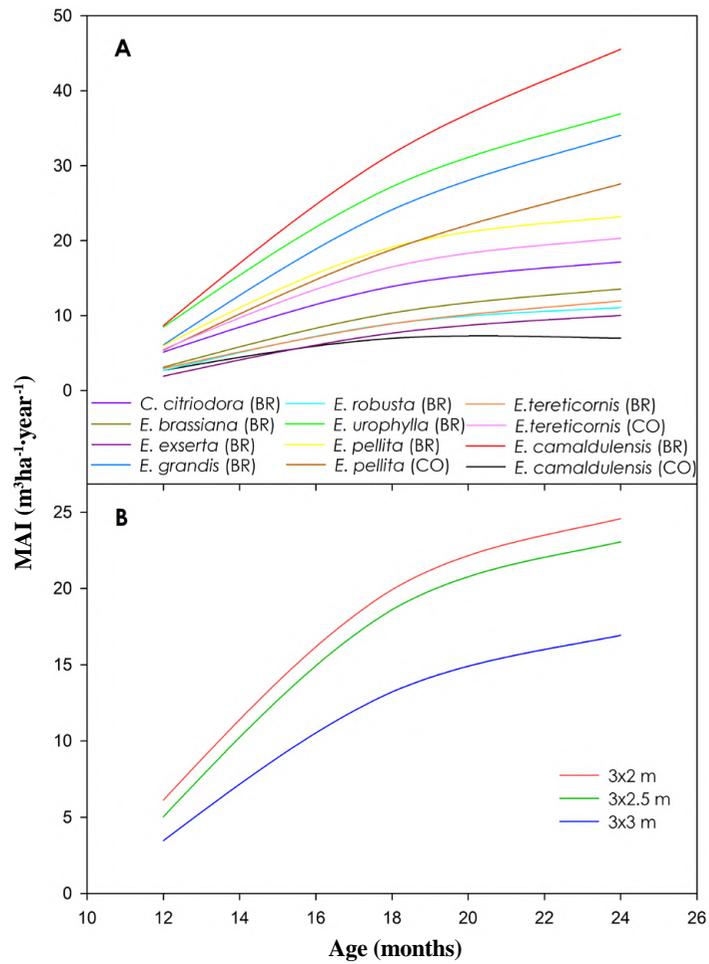


Figure 2. Development of the mean annual volume increment for each eucalypt species (A) and planting spacing (B). BR: Provenance from Brazil; CO: Provenance from Colombia.

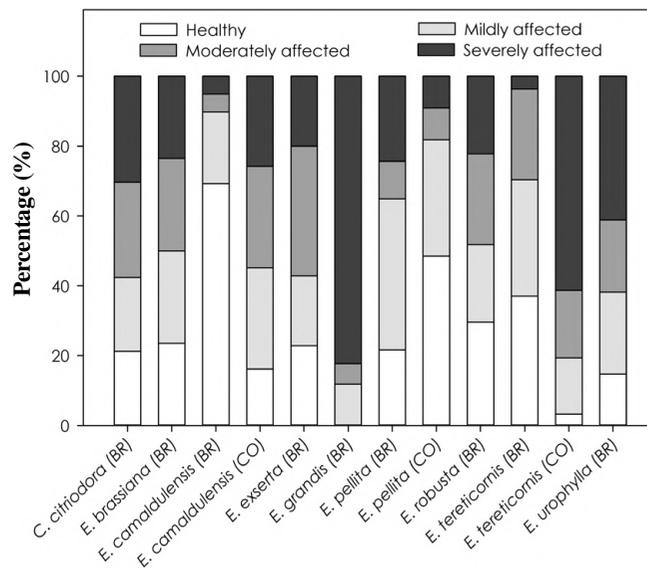


Figure 3. Percentage of trees with phytosanitary affection for each eucalypt species. BR: Provenance from Brazil; CO: Provenance from Colombia

Discussion

We found significant differences among the eucalypt species under study in a tropical dry forest site in terms of survival, dbh, total height, crown diameter, basal area, and volume. In general, high survival rates ranging between 67.86 and 97.62 % were obtained for all the species evaluated. Survival is a relevant variable for the evaluation of species adaptation; however, the selection and recommendation of any genotype must also consider growth and productivity, resistance to drought, pests, and diseases (Fernandes, *et al.*, 2018).

Eucalyptus camaldulensis (Brazil provenance) was superior in terms of survival (18.8 % over the overall mean) and growth (111.5 % over the overall mean) compared to the other species evaluated. Bush, *et al.* (2013) and Costa, *et al.* (2012) also reported high survival rates among the provenances and progenies of this species. These authors have highlighted the great environmental plasticity of *E. camaldulensis* to adapt to nutrient-poor and low rainfall sites and tolerate moderately saline and humid soil conditions. Conversely, the Colombian provenance of *E. camaldulensis* was the species with the lowest growth and yield in the study. This contradictory result could be explained by the differences in the quality and the genetic improvement of the seeds between the Brazilian and Colombian provenances. However, previous studies have also reported wide variations among *E. camaldulensis* provenances. Del Quiqui, *et al.* (2001) registered survival rates between 75 and 96 % and an MAI between 28.81 and 40.21 m³·ha⁻¹·year⁻¹ among *E. camaldulensis* provenances in the state of Paraná, Brazil.

Other species showing good adaptation to the study area were *E. urophylla*, *E. grandis*, and *E. pellita* (Colombia and Brazil provenances), with survival rates of 84.1 %, 85.3 %, 82.1 %, and 92.5 % and an MAI of 36.93, 34.06, 27.57, and 23.19 m³·ha⁻¹·year⁻¹, respectively. In a previous study with provenances of *E. urophylla* and *E. grandis* in Colombia, Wright & Osorio (1996) reported stem volumes 50 % higher for *E. grandis* than for *E. urophylla*. However, in the present study, the individual stem volume of *E. urophylla* was 16 % greater than that of *E. grandis*. For *E. grandis*, Albaugh, *et al.* (2015) have reported an MAI between 50 and 108 m³·ha⁻¹·year⁻¹ in fertilization trials in six sites distributed in the Colombian Andes.

Our results agree with those reported by Silva, *et al.* (2019a; 2019b) when evaluating survival and growth in 3-year progeny trials of *E. urophylla* and *E. grandis* in different climatic zones of Brazil. These authors reported a survival rate of 51 % to 92 % and an MAI of 19 to 46 m³·ha⁻¹·year⁻¹ for *E. urophylla* and of 28 to 89 % and 20.5 and 48.4 m³·ha⁻¹·year⁻¹ for *E. grandis*.

The provenances of *E. pellita* had a favorable adaptation to the test site with similar growth and slightly different survival. In our study, both provenances of *E. pellita* showed a higher MAI compared to that reported by Ferreira, *et al.* (2017) of 18.2 m³·ha⁻¹·year⁻¹ for this species growing in the state of Rio de Janeiro, Brazil. The growth reached by the Colombian *E. pellita* provenance is consistent with that reported by Nieto, *et al.* (2016) in the Colombian Orinoco after 4 years of growth. However, Nieto & Gasca (2010) reported an average MAI of 19.5 m³·ha⁻¹·year⁻¹ for *E. pellita* growing in Casanare, Colombia, which is lower than that reported in the present study. Nieto, *et al.* (2016) highlight the potential of *E. pellita* to adapt to high humidity site conditions. However, in our study, the species showed good adaptation to low rainfall compared to its natural distribution, which may be explained by the fact that although water deficits are common in our study area, they are not as severe as in other areas of the tropical dry forest of Colombia.

Eucalyptus tereticornis, *C. citriodora*, *E. brassiana*, *E. robusta*, and *E. exserta* yields were below the average in most of the variables evaluated. Although *E. tereticornis* has been planted on the Colombian Atlantic Coast due to its resistance to drought with an MAI of 32.8 m³·ha⁻¹·year⁻¹ (Hernández, 1993), in our study the species did not show a good adaptation.

Given the limited experience with *C. citriodora*, *E. brassiana*, *E. robusta*, and *E. exserta* commercial plantations, there is little information on their silvicultural requirements and field behavior; however, previous studies agree with ours regarding the low growth rates of

these species. **Poersch, et al.** (2017) reported a survival rate of 52.7 %, a height of 6.0 m, and collar diameter of 8.5 cm for *C. citriodora* 19 months after planting. In Madagascar, *E. robusta* grows well in low and medium altitude areas and acid and infertile soils, with an MAI between 11.3 and 15.8 m³·ha⁻¹·year⁻¹ two years after planting (**Verhaegen, et al.**, 2014). In a species test, *E. robusta* reached a volume of 247.8 m³·ha⁻¹ eight years after planting, one of the lowest in the study due to its high mortality in the field (**Bôas, et al.**, 2009). **Drumond, et al.** (1998) tested three provenances of *E. brassiana* at eight years with a survival of 98 % and an MAI of 13.5 m³·ha⁻¹·year⁻¹ as their best result. In the south of China, *E. exserta* plantations were established to stop soil erosion given their ability to tolerate sandy soils with low nutrient content, however, their growth rates were very low, between 4 and 8 m³·ha⁻¹·year⁻¹ (**Turnbull, 2007**).

According to **Gonçalves, et al.** (2017), the MAI in eucalypt plantations in regions with nutritional deficiencies and water stress ranges between 20 and 45 m³·ha⁻¹·year⁻¹ depending on the level of environmental stress. Taking as reference the lower limit reported by these authors, half of the evaluated species achieved favorable growth rates while the remaining showed lower growth rates, possibly due to inadequate site conditions for appropriate performance. The Brazilian provenances of *E. camaldulensis*, *E. urophylla*, *E. grandis*, *E. pellita*, and the Colombian provenance of *E. pellita* showed high survival rates and the highest growth rates. **Poersch, et al.** (2017) had similar results with *E. urophylla*, *E. camaldulensis*, *E. grandis*, and *E. saligna* Sm. showing the best adaptation in a study in the state of Mato Grosso do Sul, with a mortality rate lower than 10 % during the early stages of development.

In our study, the interaction between planting spacing and species was not significant for all the variables under evaluation, which indicates that a species that performs adequately in a specific planting spacing keeps the same behavior in the other evaluated spacings.

Planting spacing had a significant effect only on stand basal area and volume. In our study, narrow spaces showed the greatest increases in basal area and volume, and a contrary trend was presented in wider spaces. The average MAI ranged from 16.9, 23.1 to 24.6 m³·ha⁻¹·year⁻¹ for 3×3, 3×2.5, and 3×2 m, respectively. Previous studies on *Eucalyptus* have shown that larger planting spacings promoted the development of individual trees while narrow spacings increased production at the stand level (**Nagar, et al.**, 2015; **Hakamada, et al.**, 2020). **Nagar, et al.** (2015) obtained the maximum total utilizable biomass (72.72 kg·tree⁻¹) from the wider spacing of 3×3 m and the maximum total biomass (113.59 ton·ha⁻¹) from the narrowest spacing of 3×1 m for *E. camaldulensis* in India. Similar findings were reported by **Forrester, et al.** (2013) in their study of the basal area growth of *E. globulus* Labill. planted in five sites with different qualities and six stand densities. Moreover, they reported no interaction between site quality and spacing; consequently, the effects of planting spacing obtained in a specific site quality may be generalized to other sites with different qualities.

Likewise, **Filho, et al.** (2018) found that eucalypt stands planted with low densities (667 stems·ha⁻¹) showed a lower mortality rate compared to those with higher densities (1111 stems·ha⁻¹), a result attributed to lower competition between trees in the stands with lower densities. In our study, there were no significant differences in survival between planting spacings, however, the highest survival rates were obtained with narrow planting spaces possibly because the specimens were young and the crown had not closed yet, after which the competition is expected to increase within the stand.

The non-significant effect of planting spacing on the total height is supported by the hypothesis that this variable is not influenced by the competition and the stand density (**Vospornik & Sterba, 2015**). Although there were no significant effects of planting spacing on dbh and crown diameter, other studies have reported a strong effect of this factor on these variables and a strong relationship between them (**França, et al.**, 2017; **Schuler, et al.**, 2013). **Nutto, et al.** (2006), **Pinkard & Neilsen** (2003), and **Xue, et al.** (2011) found for *E. urophylla*, *E. grandis*, and *E. nitens* (H. Deane & Maiden) Maiden

stands that both the dbh and crown diameter decreased when the stand density increased. These authors agree that increasing stand density generates more intense competition for resources, which makes the above-ground space more limited affecting the photosynthetic specific area and, consequently, reducing the dbh growth.

In our study, we evaluated the global phytosanitary status of each tree to identify the damage present in the trees and the possible causal agents. All the species showed some type of phytosanitary affectation, which was the main cause of mortality and growth decrease in the trial. Our results showed that the Brazilian *E. camaldulensis* provenance and the Colombian *E. pellita* provenance registered the fewest pests and diseases.

The main damages identified in the trial were defoliation by leafcutter ants and termites in the bark and semi-occluded dead branches. The study made no attempt to taxonomically identify the causative agents, nevertheless, those we identified coincided with previous studies by **Ospina, et al.** (2006) and **Nieto & Gasca** (2010) who identified the genus *Atta* spp. (Hymenoptera order) and *Heterotermes* spp. (Isoptera order) as the main causal agents of defoliation and damages on dead branches and bark. **Wilcken, et al.** (2002) reported four groups of termites that caused some damage in eucalypt plantations in Brazil: a) seedling/sapling termites, b) heartwood termites, c) bark termites, and d) wood termites.

The bark splitting we report here has been previously related to affectations by eucalypt canker (*Chrysosporthe* spp.) in some species like *E. grandis* (**Ospina, et al.**, 2006; **Juárez, et al.**, 2013), *E. urophylla* (**Juárez, et al.**, 2013), and *E. pellita* (**Chocontá, et al.**, 2017). Pest and disease outbreaks become more common with increasing water stress, especially in tropical regions, posing a serious threat to the productivity of eucalypt plantations (**Gonçalves, et al.**, 2017).

The variations found in this study regarding the behavior of eucalypt species highlight the importance of studies on species selection and the need to deepen research in genetic and silvicultural strategies necessary for forest management in eucalypt plantations under water stress conditions.

Conclusions

The eucalypt species we evaluated presented an adequate adaptation to the study site with an average survival of 82 % 24 months after planting. The Brazilian provenances of *E. camaldulensis*, *E. urophylla*, *E. grandis*, and *E. pellita*, and the Colombian provenance of *E. pellita* were identified as promising for commercial reforestation programs in areas with water limitations in Colombian tropical dry forests. Our study showed that the development of each species is independent of planting spacings and that those of 3×2 m and 3×2.5 m maximized the basal area and the volume production of the species evaluated. Finally, the study showed that species with different origins vary in productivity at the same site while pests, diseases, and the quality of genetic material can modify growth and yield.

Acknowledgments

The authors thank the office of research and scientific development of the *Universidad del Tolima* for the financial support granted to the first author and to project 620120516 conducted by the “*Madera & Bosques*” research group.

Author contributions

The authors declare to have actively participated in each of the phases and sections of the study and in everything related to the collection, handling, processing, and analysis of data and the discussion of the results.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no conflicts of interest.

References

- Acosta, F.E.** (2018). Determinación del factor de forma de la especie *Eucalyptus saligna* (eucalipto) en una plantación forestal comercial del sector Tambillo Bajo, Cantón Colta, Provincia de Chimborazo, Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 71 p.
- Akhtar, J., Saqib, Z., Qureshi, R., Haq, M., Iqbal, M., Marcar, N.** (2008). The effect of spacing on the growth of *Eucalyptus camaldulensis* on salt-affected soils of the Punjab, Pakistan. *Can. J. For. Res.* **38**: 2434-2444. Doi: 10.1139/X08-085
- Albaugh, T., Rubilar, R., Fox, T., Lee Allen, H., Urrego, J., Zapata, M., Stape, J.** (2015). Response of *Eucalyptus grandis* in Colombia to mid-rotation fertilization is dependent on site and rate but not frequency of application. *For. Ecol. Manage.* **350**: 30-39. Doi: 10.1016/j.foreco.2015.04.030
- Barrios, A., López, A., Nieto, V.** (2011). Experiencias y avances en el manejo silvícola de plantaciones forestales comerciales. Bogotá, Colombia: Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal. 100 p.
- Bernardo, A., Reis, M., Reis, G., Harrison, R., Firme, D.** (1998). Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita* and *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. *For. Ecol. Manage.* **104**: 1-13. Doi: 10.1016/S0378-1127(97)00199-0
- Bôas, O., Max, J., Melo, A.** (2009). Crescimento comparativo de espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* no município de Marília, SP. *Revista Instituto Florestal.* **21**: 63-72.
- Borralho, N. & Nieto, V.** (2012). *Eucalyptus* para la Orinoquia: Retos y oportunidades. *El Mueble y la Madera.* **75**: 26-33.
- Bush, D., Marcar, N., Arnold, R., Crawford, D.** (2013). Assessing genetic variation within *Eucalyptus camaldulensis* for survival and growth on two spatially variable saline sites in southern Australia. *For. Ecol. Manage.* **306**: 68-78. Doi: 10.1016/j.foreco.2013.06.008
- Carrasco, Á., Guzmán, J.R., Ruiz, J.M., Rodríguez, S.** (2019). Manual de diagnóstico fitosanitario. Andalucía: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. 130 p.
- Caterina, G.** (2017). Curvas de crescimento de *Eucalyptus spp.* em plantios de diferentes espaçamentos. Botucatu, Brazil: Ph.D. thesis Universidade Estadual Paulista.
- Chen, S., Arnold, R., Li, Z., Li, T., Zhou, G., Wu, Z., Zhou, Q.** (2011). Tree and stand growth for clonal *E. urophylla* × *grandis* across a range of initial stockings in southern China. *New Forests.* **41**: 95-112. Doi: 10.1007/s11056-010-9213-
- Chocontá, A., Pinzón, O., Nieto, V.** (2017). Susceptibility and prevalence of *Eucalyptus pellita* F. Muell. to the cancer caused by *Chrysosporthe cubensis* (Bruner) Gryzenhout & M. J. Wingf. at the Colombian Orinoquia. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales.* **8**: 150-176. Doi: 10.29298/rmcf.v8i42.23
- Costa, R., Azevedo, L., Martínez, D., Tsukamoto Filho, A., Fernandes, D., Oliveira, O., Resende, M.** (2012). Avaliação genética de *Eucalyptus camaldulensis* no Estado de Mato Grosso. *Pesq. Flor. Bras.* **32**: 165-173. Doi: 10.4336/2012.pfb.32.70.49
- Coutinho, J., Santos, V., Ferreira, R., Nascimento, J.** (2004). Avaliação do comportamento de espécies de *Eucalyptus spp.* na Zona da Mata Pernambucana. I: Resultados do primeiro ano - 2001. *Árvore.* **28**: 771-775. Doi: 10.1590/S0100-67622004000600001
- Del Quiqui, E., Martins, S., Shimizu, J.** (2001). Avaliação de espécies e procedências de *Eucalyptus* para o Noroeste do Estado do Paraná. *Acta Scientiarum.* **23**: 1173-1177. Doi: 10.4025/actasciagron.v23i0.2571
- Delgado-Matas, C. & Pukkala, T.** (2011). Comparison of the growth of six *Eucalyptus* species in Angola. *International Journal of Forestry Research*, ID 980259. Doi: 10.1155/2011/980259
- Drumond, M., Oliveira, V., Carvalho, O.** (1998). Comportamento silvicultural de especies e procedencias de *Eucalyptus* na regioa dos Tabuleiros Costeiros do Estado de Sergipe. *Árvore.* **22**: 137-142.
- Du Toit, B., Malherbe, G., Kunneke, A., Seifert, T., Wessels, C.** (2017). Survival and long-term growth of eucalypts on semi-arid sites in a Mediterranean climate, South Africa. *Southern Forests.* **79**: 235-249. Doi: 10.2989/20702620.2016.1254914
- Fernandes, J., Conceição Júnior, V., Barreto-García, P.** (2018). Field performance of *Eucalyptus* hybrids at Planalto da Conquista, Bahia, Brazil. *Floresta e Ambiente.* **25**: e20160594. Doi: 10.1590/2179-8087.059416
- Fernández, F., Melo, O., Álvarez, E., Pérez, U., Lozano, A.** (2014). Status of knowledge, conservation and management of tropical dry forest in the Magdalena river Valley, Colombia. In Sánchez-Asofeifa, A., Power, J., Fernandes, G., & Quesada M. (eds.). *Tropical dry forest in the Americas* (pp. 35-68). CRC Press. Taylor & Francis Group.

- Ferreira, D., Leles, P., Oliveira Neto, S., Paula, T., Coutinho, R., Silva, R.** (2017). Crescimento e produção de eucalipto na região do Médio Paraíba do Sul, RJ. *Floresta e Ambiente*. **24**: e00131315. Doi: 10.1590/2179-8087.131315
- Ferreira, V., Boyero, L., Calvo, C., Correa, F., Figueroa, R., Gonçalves, J. et al.** (2019). A global assessment of the effects of *Eucalyptus* plantations on stream ecosystem functioning. *Ecosystems*. **22**: 629-642. Doi: 10.1007/s10021-018-0292-7
- Filho, A., Mola-Yudego, B., González-Olabarria, J., Scolforo, J.** (2018). Thinning regimes and initial spacing for *Eucalyptus* plantations in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. **90**: 255-265. Doi: 10.1590/0001-3765201720150453
- Forrester, D., Wiedemann, J., Forrester, R., Baker, T.** (2013). Effects of planting density and site quality on mean tree size and total stand growth of *Eucalyptus globulus* plantations. *Can. J. For. Res.* **43**: 846-851. Doi: 10.1139/cjfr-2013-0137
- França, F., Vidaurre, G., Nutto, L., Abad, J., Batista, D., Moulin, J.** (2017). Relation between dendrometric variables and growth stress in *Eucalyptus*. *Floresta e Ambiente*. **24**: e00128215. Doi: 10.1590/2179-8087.128215
- Gonçalves, J., Alvares, C., Higa, A., Silva, L., Alfenas, A., Stahl, J. et al.** (2013). Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *For. Ecol. Manage.* **301**: 6-27. Doi: 10.1016/j.foreco.2012.12.030
- Gonçalves, J., Alvares, C., Rocha, J., Brandani, C., Hakamada, R.** (2017). Eucalypt plantation management in regions with water stress. *Southern Forests*. **79**: 169-183. Doi: 10.2989/20702620.2016.1255415
- Guerra, E., Célis, F., Moreno, N.** (2014). Efecto de la densidad de plantación en la rentabilidad de plantaciones de *Eucalyptus globulus*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. **20**: 21-31. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.08.051
- Hakamada, R., Hubbard, R., Moreira, G., Stape, J.L., Campoe, O., Ferraz, S.** (2020). Influence of stand density on growth and water use efficiency in *Eucalyptus* clones. *For. Ecol. Manage.* **466**: 118125. Doi: 10.1016/j.foreco.2020.118125
- Hernández, R.** (1993). Evaluación del efecto de la densidad en el crecimiento del *Eucalyptus tereticornis* en la costa atlántica, Colombia. Medellín, Colombia: Forest Engineering thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- Hernández-Ramos, J., Santos-Posadas, H., Valdéz, J. R., Tamarit, J. C., Ángeles, G., Hernández, A., Méndez, B., Peduzzi, A.** (2017). Estimación del volumen comercial en plantaciones de *Eucalyptus urophylla* con modelos de volumen total y de razón. *Agrociencia*. **51**: 561-580.
- Holdridge, L.** (1947). Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science*. **105**: 367-368. Doi: 10.1126/science.105.2727.367
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC.** (2004). Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento del Tolima. Bogotá, Colombia: IGAC, Subdirección de agrología, grupo interno de trabajo levantamiento de suelos. 358 p.
- Jayaraman, K.** (1999). A statistical manual for forestry research. Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 240 p.
- Juárez, J., Honorato, J., Vázquez, L., Parraguirre, J.** (2013). Patogenicidad de *Chrysoporthe cubensis* en clones de *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en el sureste de México. *Madera y Bosques*. **19**: 17-36. Doi: 10.21829/myb.2013.191344
- Littell, R., Milliken, G., Stroup, W., Wolfinger, R., Schabenberger, O.** (2006). SAS® for Mixed Models, Second Edition. Cary, USA: SAS Institute Inc. 814 p.
- Lott, R. & Wardill, T.** (2009). Designing silvicultural research trials. Canberra: Rural Industries Research and Development Corporation. RIRDC Publication No. 08/197, 94 pp.
- Meskimen, G. & Franklin, E.** (1978). Spacing *Eucalyptus grandis* in southern Florida - A question of merchantable versus total volume. *Southern Journal of Applied Forestry*. **2**: 3-5. Doi: 10.1093/sjaf/2.1.3
- Montgomery, D.** (2004). Diseño y análisis de experimentos. Ciudad de México, México: Limusa Wiley. 692 p.
- Moura, V.** (2001). Potencial e uso de espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* de acordo com locais e uso. Brasília, Brazil: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. 32 p.
- Nagar, B., Rawat, S., Rathiesh, P., Sekar, I.** (2015). Impact of initial spacing on growth and yield of *Eucalyptus camaldulensis* in arid region of India. *World Applied Sciences Journal*. **33**: 1362-1368. Doi: 10.5829/idosi.wasj.2015.33.08.247
- Nieto, V., Giraldo-Charria, D., Sarmiento, M., Borrhalho, N.** (2016). Effects of provenance and genetic variation on the growth and stem formation of *Eucalyptus pellita* in Colombia. *Journal of Tropical Forest Science*. **28**: 227-234.

- Nieto, V. & Gasca, G.** (2010). Experiencias y avances en el manejo de *Eucalyptus pellita* F.Muell en la Orinoquia colombiana. Bogotá, Colombia: Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal. 98 p.
- Nutto, L., Spathelf, P., Seling, I.** (2006). Management of individual tree diameter growth and implications for pruning for Brazilian *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. *Floresta*. **6**: 397-413. Doi: 10.5380/rf.v36i3.7519
- Obregón, C. & Restrepo, N.** (2006). El Eucalipto: Una opción de alta rentabilidad. *El Mueble y la Madera*. **53**: 14-20.
- Ospina, C., Hernández, R., Rodas, C., Urrego, J., Godoy, J., Aristizábal, F.** (2006). Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina colombiana: el Eucalipto (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden). Bogotá, Colombia: Cenicafé. 51 p.
- Pinkard, E. & Nielsen, W.** (2003). Crown and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: Implications for thinning. *For. Ecol. Manage.* **172**: 215-227. Doi: 10.1016/S0378-1127(01)00803-9
- Pizano, C. & García, H.** (2014). El Bosque Seco Tropical en Colombia. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 349 p.
- Poersch, N., França Filho, L., Miguel, E., Cruz, G., Francisquette, K., Cavalheiro, S.** (2017). Influence of climate variables in the initial growth of *Corymbia citriodora* and different species of *Eucalyptus*. *Bioscience Journal*. **33**: 1452-1464. Doi: 10.14393/BJ-v33n6a2017-36735
- Programa para los Bosques (PROFOR).** (2017). Situación actual y potenciales de fomento de plantaciones forestales con fines comerciales en Colombia. Bogotá, Colombia: Banco Mundial. 172 p.
- Rocha, M., Vital, B., Carneiro, A., Carvalho, A., Cardoso, M., Hein, P.** (2016). Effects of plant spacing on the physical, chemical and energy properties of *Eucalyptus* wood and bark. *Journal of Tropical Forest Science*. **28**: 243-248.
- Rollan, C., Li, R., San Juan, J., Dizon, L., Ong, K.** (2018). A planning tool for tree species selection and planting schedule in forestation projects considering environmental and socio-economic benefits. *Journal of Environmental Management*. **206**: 319-329. Doi: 10.1016/j.jenvman.2017.10.044
- SAS Institute Inc.** (2009). SAS/STAT® 9.2 User's Guide, Second Edition. Cary, USA: SAS® Publishing.
- Schuler, J., Cueni, J., Spiecker, H., Guo, W.** (2013). Modelling growing space of four valuable broadleaved tree species in southern China. *Forest Science and Practice*. **15**: 167-178. Doi: 10.1007/s11632-013-0301-z
- Silva, P., Brune, A., Alvares, C., Amaral, W., Teixeira, M., Grattapaglia, D., Paula, R.** (2019a). Selecting for stable and productive families of *Eucalyptus urophylla* across a country-wide range of climates in Brazil. *Can. J. For. Res.* **49**: 87-95. Doi: 10.1139/cjfr-2018-0052
- Silva, P., Marco, M., Alvares, C., Lee, D., Teixeira, M., Paula, R.** (2019b). Selection of *Eucalyptus grandis* families across contrasting environmental conditions. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*. **19**: 47-54. Doi: 10.1590/1984-70332019v19n1a07
- Stape, J. & Binkley, D.** (2010). Insights from full-rotation Nelder spacing trials with *Eucalyptus* in São Paulo, Brazil. *Southern Forests*. **72**: 90-97. Doi: 10.2989/20702620.2010.507031
- Turnbull, J.** (2007). Development of sustainable forestry plantations in China: a review. Canberra, Australia: Australian Centre for International Agricultural Research. 78 p.
- Verhaegen, D., Randrianjafy, H., Rakotondraoelina, H., Trendelenburg, M., Andriamampianina, N., Montagne, P.** (2014). *Eucalyptus robusta* pour une production durable de bois énergie à Madagascar: Bilan des connaissances et perspectives. *Bois et Forêts des Tropiques*. **320**: 15-30. Doi: 10.19182/bft2014.320.a20541
- Vospertnik, S. & Sterba, H.** (2015). Do competition-density rule and self-thinning rule agree? *Annals of Forest Science*. **72**: 379-390. Doi: 10.1007/s13595-014-0433-x
- Wilcken, C., Raetano, C., Forti, L.** (2002). Termite pest in *Eucalyptus* forest of Brazil. *Sociobiology*. **40**: 179-190.
- Wright, J. & Osorio, L.** (1996). Comparison of *Eucalyptus urophylla* provenance performance at half-rotation in Colombia and hybrid strategies with *Eucalyptus grandis*. *For. Ecol. Manage.* **83**: 117-122. Doi: 10.1016/0378-1127(95)03681-4
- Xue, L., Pan, L., Zhang, R., Xu, P.** (2011). Density effects on the growth of self-thinning *Eucalyptus urophylla* stands. *Trees*. **25**: 1021-1031. Doi: 10.1007/s00468-011-0576-4
- Yepes, A. & Buckeridge, M.** (2011). Respuestas de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global - Revisión. *Colombia Forestal*. **14**: 213-232. Doi: 10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2011.2.a06

Original article

On the distribution of three exotic geckos of genus *Hemidactylus* Gray, 1825 (Squamata, Gekkonidae), and an unusual record of the native lizard *Gymnophthalmus speciosus* (Hallowell, 1861) outside its elevational range in Colombia

Sobre la distribución de tres geckos exóticos del género *Hemidactylus* Gray, 1825 (Squamata, Gekkonidae) y un registro inusual del lagarto nativo *Gymnophthalmus speciosus* (Hallowell, 1861) fuera de su intervalo altitudinal en Colombia

✉ Jose J. Henao-Osorio^{1,2}, ✉ Ana M. Pereira-Ramírez³, ✉ Alexandra Cardona-Giraldo⁴,
✉ Héctor Fabio Arias-Monsalve^{5,6}, ✉ Julián A. Rojas-Morales^{2,7}, ✉ José Rancés Caicedo-Portilla⁸,
✉ Héctor E. Ramírez-Chaves^{1,2,*}

¹ Programa de Biología, Departamento de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

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

³ Grupo de Herpetología, Programa de Biología, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

⁴ Programa de Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Manizales, Manizales, Colombia

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

⁶ Fundación Ecológica Cafetera, Manizales, Colombia

⁷ Facultad de Ciencias Básicas, Corporación Universitaria Santa Rosa de Cabal (UNISARC), Risaralda, Colombia

⁸ Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI, Sede Principal, Leticia, Colombia

Citation: Henao-Osorio JJ, Pereira-Ramírez AM, Cardona-Giraldo A, *et al.* On the distribution of three exotic geckos of genus *Hemidactylus* Gray, 1825 (Squamata, Gekkonidae), and an unusual record of the native lizard *Gymnophthalmus speciosus* (Hallowell, 1861) outside its elevational range in Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):462-473, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1356>

Editor: Martha Patricia Ramírez Pinilla

***Corresponding autor:**

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

Received: December 6, 2020

Accepted: March 2, 2021

Published: June 17, 2021



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

Abstract

The study of the introduction of exotic species in Colombia has been a trending topic in the last decade due to their effects on local diversity. The records of exotic reptile species of the genus *Hemidactylus* have increased based on museum vouchers and fieldwork. However, there are still plenty of information gaps regarding their current distribution in the country. Similarly, there is limited information on unusual reptile distributions caused by human transport inside the country. Here, we present an update to the distribution of the exotic house geckos *Hemidactylus frenatus*, *H. garnotii*, and *H. mabouia* based on several new localities and historical records. We also present an atypical record of the golden spectacled tegu *Gymnophthalmus speciosus* in paramo ecosystems from the Central Andes of Colombia, almost 2000 meters above the upper elevational known limit for this species. The distribution update shows that *H. frenatus* is widely distributed in 30 of the 32 departments of Colombia with no records for Chocó and Guainía. *H. garnotii* is currently known only from the Cauca River basin of the departments of Antioquia, Caldas, and Risaralda, while *H. mabouia*, previously known from the Amazon basin of the country, is now reported for the Andean region. Finally, *Gymnophthalmus speciosus* presence in a paramo ecosystem, considered unusual as it is not part of its distribution area, was probably the result of an accidental transport from a typical lowland locality (below 1000 meters above sea level).

Keywords: Biological collections; Human-mediated transport; Invasive species; Northern Andes; Reptilia.

Resumen

El estudio de las especies exóticas en Colombia ha sido un tema de interés en las últimas décadas debido a los efectos que estas pueden tener en la diversidad local. Los registros de especies exóticas de reptiles del género *Hemidactylus* se ha incrementado a partir de los datos disponibles en colecciones científicas y las observaciones en campo. Sin embargo, existen vacíos de información en torno a su distribución actual en el país y a su presencia inusual en ciertos entornos como producto de la acción humana. Se presenta una actualización de la distribución de tres geckos caseros, *Hemidactylus frenatus*, *H. garnotii* y *H. mabouia*, a partir de registros históricos y en varias localidades nuevas, así como el hallazgo atípico del lagarto nativo *Gymnophthalmus speciosus* en ecosistemas de páramo en los Andes centrales de Colombia, casi 2.000 m por encima del límite altitudinal conocido para la especie. Esta actualización de la distribución evidenció que *H. frenatus* se distribuye ampliamente en 30 de los 32 departamentos de Colombia, sin registros para Chocó y Guainía. Los registros actuales de *H. garnotii* son de la cuenca del río Cauca en los departamentos de Antioquia, Caldas y Risaralda, en tanto que *H. mabouia*, previamente conocida en el país por registros en la cuenca del Amazonas, actualmente también se ha encontrado en la región andina. Por último, se reporta la inusual presencia del lagarto nativo *Gymnophthalmus speciosus* en un ecosistema de páramo que no hace parte de su área de distribución, probablemente mediada por el transporte accidental desde una localidad típica de las tierras bajas (inferior a los 1.000 m sobre el nivel del mar).

Palabras clave: Andes del Norte; colecciones biológicas; Especies invasivas; Reptilia; Transporte mediado por humanos.

Introduction

Exotic species are those displaced from their historical natural environment to other localities with or without human intention (**Invasive Species Specialist Group - ISSG**, 2000). They become invasive when they manage to establish and reproduce in the new area generating an alien population, which can cause strong ecological pressures on the local biodiversity, especially in mega-diverse countries (**Mooney & Hobbs**, 2000; **Frehse et al.**, 2016). The effects caused by the action of invasive species include the migration of local species, the transmission of pathogens, and the local extinctions, among others (**Clavero & García-Berthou**, 2005; **Díaz et al.**, 2020; **Milardi et al.**, 2020). This problem has increased in recent years due to cargo shipments associated with market globalization (**Levine & D'Antonio**, 2003; **Meyerson & Mooney**, 2007) and human migrations (**Veitch & Clout**, 2001; **Hulme**, 2009; **Lockwood, et al.**, 2013) evidencing the strong relationship between industrial development and the establishment of foreign species with clear examples in Asia and America (**Lin, et al.**, 2007; **Mayerson & Mooney**, 2007; **Ramírez-Albores, et al.**, 2019).

With more than 150 currently recognized species, geckos of the genus *Hemidactylus* (Lacertilia: Gekkonidae) are among the most diversified and widely distributed lizards in the world (**Carranza & Arnold**, 2006; **Giri & Bauer**, 2008; **Uetz, et al.**, 2020). Some taxa have been recognized as potentially invasive species (e.g., *H. angulatus*, *H. frenatus*, *H. garnotii*, *H. mabouia*, *H. platyurus*, *H. parvimaculatus*, and *H. turcicus*) causing the decline of local species including other native lizards, especially in island ecosystems (**Case, et al.**, 1994; **Dame & Petren**, 2006). Due to their establishment and naturalization capabilities, *H. frenatus*, originally native to Asia and the Indo-Pacific region, is one of the most successful invasive geckos (**Bauer & Baker**, 2012) with the largest distribution within the genus (**Case, et al.**, 1994; **Carranza & Arnold**, 2006). Similarly, the Indo-Pacific Gecko *H. garnotii*, native to Tahiti in French Polynesia, is widely distributed in the tropical and subtropical zones of the Asian Pacific with well-established populations in transformed environments of the American continent (**Carranza & Arnold**, 2006). Furthermore, *H. mabouia*, originally distributed in Central and Eastern Africa (**Kluge**, 1969; **Carranza & Arnold**, 2006), has colonized and established in West Africa, the Caribbean Region, part of South America, and the state of Florida in the USA (**Krysko & Daniels**, 2005; **Carranza & Arnold**, 2006; **Rödger, et al.**, 2008).

In Colombia, there are recent records of the establishment of four *Hemidactylus* species (*H. angulatus*, *H. frenatus*, *H. garnotii*, and *H. mabouia*) in continental and insular localities including remote regions, such as the Amazon basin (Caicedo-Portilla & Dulcey-Cala, 2011; Vásquez-Restrepo & Lapwong, 2018; Caicedo-Portilla, 2019). Rapid dispersion of the alien geckos introduced in Colombia has been elucidated through the review of specimens in collections and photographs in the wild (Castaño-Mora, 2000; Vásquez-Restrepo & Lapwong, 2018). Additionally, atypical records of native Colombian reptiles outside their normal distribution ranges have been scarcely documented in the country (Gutiérrez, *et al.*, 2012). One of the most common causes of unusual records of reptiles in the country is their accidental human transportation, but not all cases are the consequence of an apparent human intervention (Marín, *et al.*, 2017). Some examples of unusual distributional records not yet considered exotic for the country include the introduction of the spectacled caiman (*Caiman crocodilus*) on San Andrés and Providencia Islands (Forero-Medina, *et al.*, 2012) and recent records of the yellow-headed gecko (*Gonatodes albogularis*) in eastern Colombia (Caicedo-Portilla & Gutiérrez-Lamus, 2020).

The reports of alien species are important to explore possible risks caused by their introduction in the areas they colonize (Rodríguez, 2001; Abarca, 2006). This is key for highly affected ecosystems by habitat transformation such as the Andean cordilleras, (Armenteras, *et al.*, 2003) concentrating the highest proportion of roads and human settlements in the country (Acevedo, *et al.*, 2009). Similarly, documenting unusual records of native species outside their known ranges but clearly not representing range extensions is relevant to evaluate how populations may establish in other areas with or without human intervention. In this study, we present new records of *H. frenatus*, *H. garnotii*, and *H. mabouia* from the Central Andes of Colombia and update their distribution. Additionally, we provide evidence of an atypical record of *Gymnophthalmus speciosus* (Hallowell, 1861) in a paramo ecosystem at 4.000 m.a.s.l.

Methodology

To update the distribution of *Hemidactylus frenatus*, *H. garnotii*, and *H. mabouia* we reviewed specimens deposited in the reptile collections of the *Centro de Museos, Museo de Historia Natural, Universidad de Caldas* (MHN-UCa-R) in Manizales, *Universidad de Los Andes* (ANDES-R) in Bogotá, and photographs of specimens housed at the herpetological collection of the *Universidad del Quindío* (UQ) in Armenia, Colombia. We also included photo-vouchered records obtained by us during 2019 and 2020 in the inter-Andean Cauca River basin in the departments of Caldas and Cauca, as well as records in the literature (Renjifo & Lundberg, 1999; Carranza & Arnold, 2006; Angarita-Sierra, 2010; Cárdenas-Arévalo, *et al.*, 2010; Vanegas-Guerrero, *et al.*, 2016; Díaz-Pérez, *et al.*, 2017; Mueses-Cisneros & Caicedo-Portilla, 2018; Medina-Rangel, *et al.*, 2019; Díaz-Pérez, *et al.*, 2020), and museum databases.

To identify the reviewed specimens, we used the taxonomic keys of Krysko & Daniels (2005) and other morphological traits (Kluge, 1969; Zug, *et al.*, 2007; Caicedo-Portilla & Dulcey-Cala, 2011; Vásquez-Restrepo & Lapwong, 2018). The characters examined were: (1) the arrangements of the subdigital lamellae of fingers and toes, especially the fourth toe; (2) the fourth toe length; (3) the body size (snout vent-length and tail length, SVL and TL, respectively) (Table 1S, <https://www.raccefn.co/index.php/raccefn/article/view/1356/3036>) taken with a dial caliper to the nearest 0.01 mm; (4) the shape and arrangement of the dorsal scales; (5) the arrangement of the second chin shields, and (6) the disposition of the scales on the tail.

Additionally, we present an unusual (human transported) record of the golden spectacled tegu, *G. speciosus* based on one specimen found in a paramo ecosystem in the department of Caldas, Central Andes of Colombia. The specimen died after being captured and was preserved in 70% ethanol (MHN-UCa-R 431). We corroborated its identity by comparing the size, shape, and number of head scales, as well as its lack of eyelids (Avila-Pires, 1995; Hernández-Ruz, 2006). To confirm that MHN-UCa-R 431 specimen was

an unusual record, we searched for additional localities in the literature (Meza-Joya & Ramos-Pallares, 2015) and listed the ecosystems and elevational range where the species has been documented.

Results

We updated the distribution of the exotic house geckos *Hemidactylus frenatus* (Figure 1A), *H. garnotii* (Figure 1B), and *H. mabouia* (Figure 2A) based on several new localities, as well as historical records. We also present an atypical record of the golden spectacled tegu *Gymnophthalmus speciosus* (Figure 2B) in the Central Andes of Colombia. We found that *H. frenatus* is widely distributed in Colombia with records in all regions and 30 of the 32 departments of the country (Table 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1356/3037>). We identified three specimens of *H. frenatus* (MHN-UCa-R 213, 525, 591) for the Central Andes of Colombia filling gaps in the distribution of the species in the Cauca and Magdalena river basins. Based on photographic records, we detected the presence of *H. frenatus* in two additional localities on the western slope of the Central Cordillera in the departments of Caldas, Cauca, and Risaralda (Figure 3A). The photographed specimens were recorded vocalizing at night (around 20:00 hours) on the walls of human settlements and identified as *H. frenatus* due to the presence of flat dermal tubercles on the dorsal surface of the body, as well as spines and protuberances on the tail (Figure 3B). For *H. garnotii*, we only found records from the Colombian Cauca River basin (Figure 1B). We identified two specimens of *H. garnotii* (MHN-UCa-R 214, 511) representing the southernmost known records in the Central Andes of Colombia. They come from Caldas and Risaralda (Figure 3C) and are the first confirmed records for both departments. For *H. mabouia* (Figure 3D), we found records for the Cauca River basin based on photographs obtained in the cities of Popayán (Cauca) and Armenia (Quindío) (Figure 2A). In Popayán (Figure 2B), the records corresponded to specimens found inhabiting houses in the peri-urban area in 2020 and are the first documented for the department.

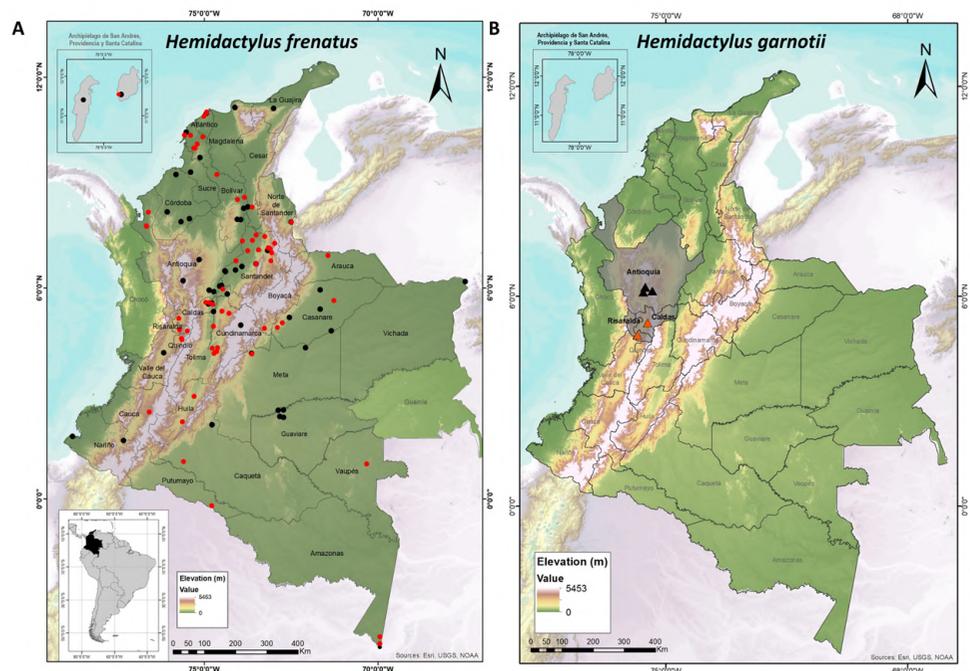


Figure 1. Distribution of two exotic *Hemidactylus* in Colombia. **A.** *Hemidactylus frenatus*: black dots denote records in literature and red dots show new records for the country. **B.** *Hemidactylus garnotii*: black triangles represent records in the literature and orange triangles are the new records extending its distribution in the Central Andes of Colombia.

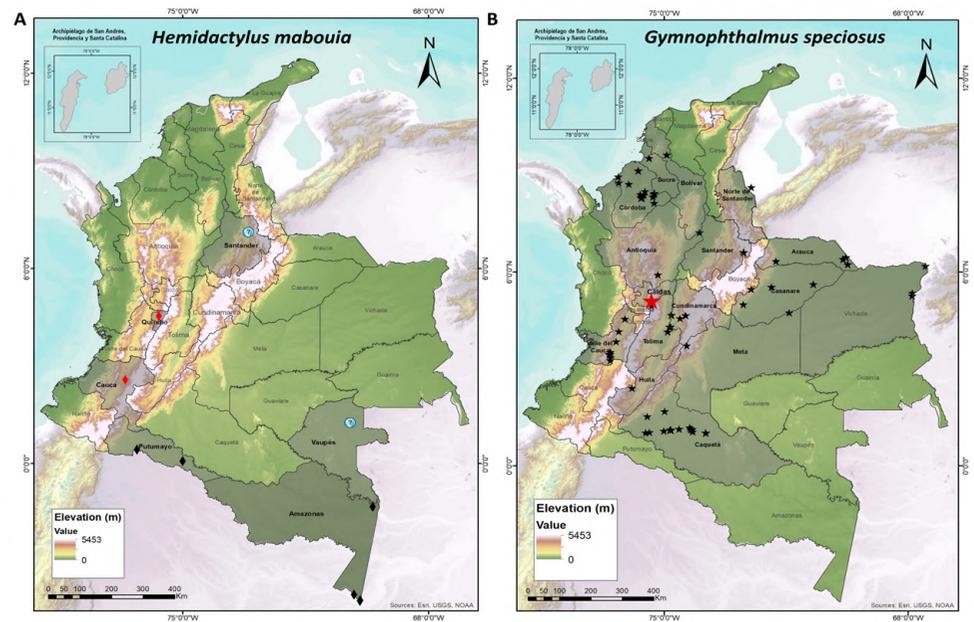


Figure 2. Distribution of an exotic *Hemidactylus* and an unusual record of a golden tegu, *Gymnophthalmus speciosus*, in Colombia. **A.** *Hemidactylus mabouia*: black rhombus are records in the literature and the red ones represent new records from the departments of Quindío and Cauca in the Central Andes of Colombia; question marks denote dubious records of *H. mabouia* in international museums. **B.** The unusual (transported) record of *G. speciosus* (red star) in paramo ecosystems of Colombia. Black stars show available records in the lowlands (up to 1,000 m.a.s.l.) in Colombia.

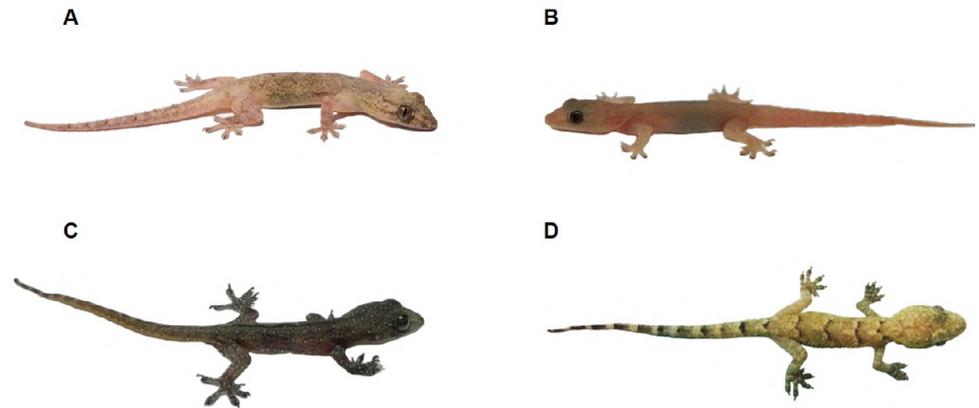


Figure 3. Records of three exotic house geckos from Colombia. **A.** *Hemidactylus frenatus* (SVL 48.10 mm) found in human houses in the municipality of Pereira, department of Risaralda (MHN-UCa-R 591). **B.** *Hemidactylus frenatus* photographed in the municipality of Chinchiná, department of Caldas. **C.** *Hemidactylus garnotii* juvenile (SVL 21,87 mm) from the municipality of Manizales, department of Caldas (MHN-UCa-R 511). **D.** *Hemidactylus mabouia* photographed in the municipality of Popayán, department of Cauca

The records from Armenia are based on photographs wrongly reported in the literature as *H. frenatus* by **Vanegas-Guerrero et al., 2016; Figure 3B** while the specimen really corresponds to *H. mabouia*. A preserved specimen (UQ-0269) collected in the department of Quindío also belongs to this species. The *H. mabouia* photographed presents the dorsal pattern of the species consisting of V-shaped bands with the vertex of each band directed posteriorly and dark brown posterior margins of the bands (**Figure 3D**). The fourth toe

of the specimen UQ-0269 presents lamellae that do not reach its base, a morphological characteristic of *H. mabouia*. We also found two unconfirmed records of *H. mabouia* from the departments of Santander and Vaupés in museum databases (**Table 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1356/3037>) that we include here as dubious.

Furthermore, we observed previous suggested external differences that help to differentiate between *H. garnotii* and *H. frenatus* specimens: The chin shields are not in contact with the infralabial scales in *H. garnotii* but they do in *H. frenatus*. The dorsal surface of *H. garnotii* presents homogeneous scales along the body vs. flat dermal tubercles and some intermixed granulations in the dorsal surface of *H. frenatus*. The tail of *H. garnotii* has cylindrical serrated margins without spines or tubercles vs. serrated margins in the tail with spines or tubercles in *H. frenatus* (**Krysko & Daniels, 2005**). We identified additional external differences between both species including the number of sub-digital lamellae on the fourth digit (8 to 13 in *H. garnotii* vs. 7 to 9 in *H. frenatus*) and wider lamellar structures in *H. frenatus* than in *H. garnotii* (**Figure 4**).

Finally, we present a record of *G. speciosus* based on an individual found alive on December 14, 2018, 12:00 h, in the parking lot in “Brisas”, Los Nevados National Natural Park (4.937886° N, -75.349758° W, 4,057 m.a.s.l.). The locality is part of a paramo ecosystem in Caldas Central Andes. The record is unusual as this species is known only in the lowland (up to 900 m.a.s.l.) of the Caribbean, Orinoquia, and the dry Inter-Andean valleys of the Magdalena and Cauca rivers. Our literature search showed that the closest elevational records are 3.100 m away from the locality where MHN-UCa-R 431 was found. Considering that the lowest paramo ecosystems in Colombia start at elevations around 3.500 m.a.s.l in the Central Andes (**Cuatrecasas, 1958**), and the absence of confirmed *G. speciosus* records from sub-Andean and Andean ecosystems (1,000-3,500 m.a.s.l.), it is very unlikely that Los Nevados, Caldas, is part of the normal range of the species. We discarded that the specimen MHN-UCa-R 431 might represent a different species due to the morphological characters that cast no doubt on its identification including the small-size (SVL 34,65 mm), the lack of eyelids, the presence of a large pentagonal scale in the parietal area, two internasal scales connected in their medial part, large pre-frontal scale, small and pentagonal frontal scale, and seven supralabial and five infralabial scales (**Figure 5**).

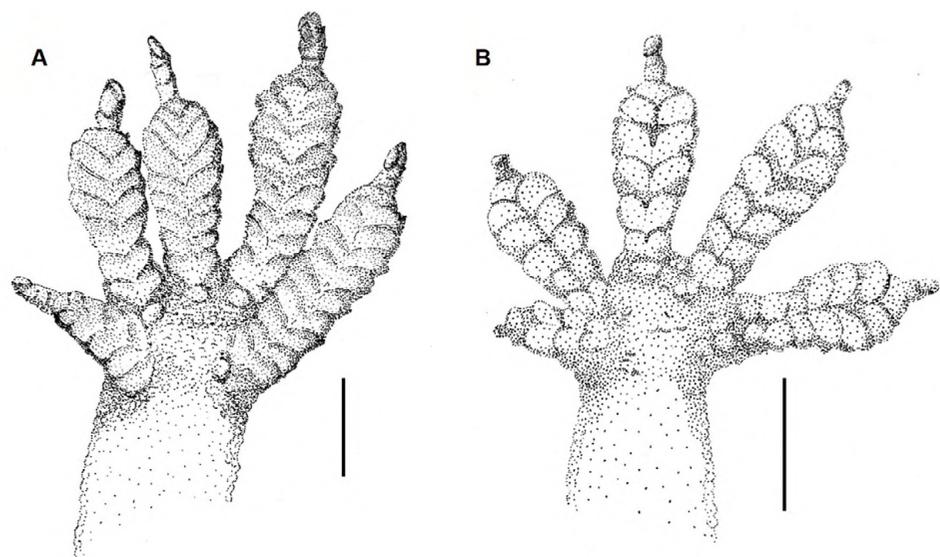


Figure 4. Plantar view of the forefoot (manus) of (A) *Hemidactylus garnotii* (MHN-UCa-R 416) and (B) *Hemidactylus frenatus* (MHN-UCa-R 591) showing the differences in the structure of subdigital lamellae. Scale: 2 mm

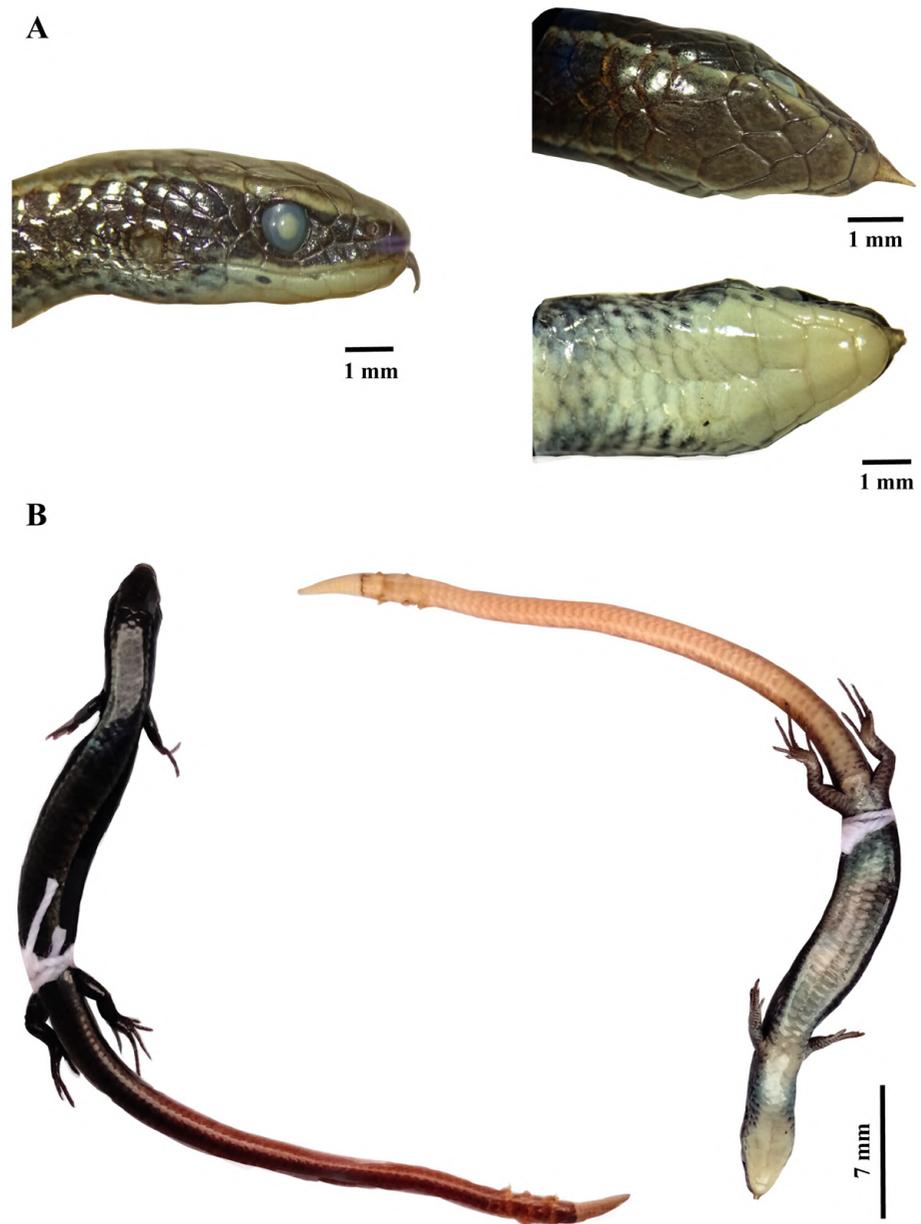


Figure 5. *Gymnophthalmus speciosus* (SVL 34.65 mm) captured at the entrance of Los Nevados National Park, Villamaría, Caldas, Colombia (MHN-UCa-R 431). **A.** Details of the head in lateral, dorsal, and ventral views. **B.** Dorsal and ventral views of the head and body

Discussion

Unintentional human transport of fauna may be favored by characteristics of an organism's natural history, such as the morphology, the boldness, and the exploratory habits displayed by animals used to living in urban environments (Chapple, *et al.*, 2012). These behaviours lead urban-adapted animals to interact with commonly transported products like fruit thus dispersing to and invading new territories (Chapple, *et al.*, 2011). Likewise, species living in an area close to another with high levels of anthropic transformation are more likely to be transported by humans (Hulme, 2009). In our study, two of the new records of *Hemidactylus* were reported in areas of high vehicular flow (municipal transport terminal, parking lot), and their presence there probably responds to the reasons previously exposed.

The origin of *H. garnotii* individuals in Colombia is still unclear, however, **Vásquez-Restrepo & Lapwong** (2018) suggested their possible arrival from Florida, USA, where the largest population of this species is found. Florida represents a mandatory loading-shipment point between North and South America and geckos can be unintentionally transported. Similarly, the arrival of *H. frenatus* to the country may have occurred through ports in the Caribbean or our border with Venezuela where this species was first registered in the year 2000 (**Caicedo-Portilla & Dulcey-Cala**, 2011; **Torres-Carvajal**, 2015). As for *H. mabouia*, its arrival to the Amazon region probably followed the pattern of human expansion in this region (**Avila-Pires**, 1995). At a regional scale, it is still unknown how and when these species arrived and if all three are successfully established in the Central Andes of Colombia.

In Colombia, *H. garnotii* was recently recorded in the department of Antioquia from museum specimens collected in the early 2000 and 2010s (**Vásquez-Restrepo & Lapwong**, 2018). Based on our results, *H. garnotii* is registered for the first time for the departments of Caldas and Risaralda in the country's Central Andes in similar habitats to those reported in the department of Antioquia (**Vásquez-Restrepo & Lapwong**, 2018). The new records extend the distribution in about 150 km linear to the south from the nearest known locality (municipality of Caldas, department of Antioquia) (**Vásquez-Restrepo & Lapwong**, 2018). However, the records of this species seem to be isolated and further fieldwork should be done to define if the species is well established and if it occupies a different niche with respect to native geckos (**Perella & Behm**, 2020). With our records, *H. garnotii* is currently known in six localities in the Colombian Andes (**Figure 1B**) (**Table 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1356/3037>).

Hemidactylus frenatus is the most common exotic gecko in Colombia (**Caicedo-Portilla & Dulcey-Cala**, 2011). Nevertheless, ours constitute the first documented records for the Cauca River basin on the western opposite slope in the Central Cordillera (**Caicedo-Portilla & Dulcey-Cala**, 2011) evidencing that the species is extending its distribution to the west and southern part of the Colombian Andes and is likely well established currently. Including our records, *H. frenatus* is present in 99 localities in 30 of the 32 departments of Colombia and only the Chocó and Guainía have no confirmed records for this species. This shows a rapid dispersal of the species within the territory and our inability to monitor it at the same speed considering that previous papers on this species in Colombia included only records for 20 of its 32 departments (**Caicedo-Portilla & Dulcey-Cala**, 2011). We believe that the absence of records of this species in Chocó and Guainía may be the result of limited fieldwork in those areas.

Hemidactylus mabouia is mainly distributed east of the Andes in transformed habitats of the Colombian Amazon (**Medem**, 1968; **Ayala**, 1986). The presence of *H. mabouia* in the cities of Armenia and Popayán is the first documented in the Colombian Andes and the second known for a trans-Andean locality (**Carvajal-Campos & Torres-Carvajal**, 2010). The *H. mabouia* records from the department of Santander in museum databases (**Table 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1356/3037>) need to be reviewed to confirm whether the species is most widespread in trans-Andean Colombia. An additional record from the department of Vaupés in museum databases (**Table 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1356/3037>) also needs to be verified. Based on the specimens we reviewed the species is present in the department of Vaupés (**Table 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1356/3037>) but this unconfirmed record dates from 1967. If confirmed, it would give us valuable information about the historical dispersion of the species in Colombia.

Besides the exotic geckos documented, the finding of the golden spectacled tegu *G. speciosus* in a paramo ecosystem is most certainly a consequence of accidental transport of the individual from the lowland ecosystems where the species inhabits (**Meza-Joya & Ramos-Pallares**, 2015). The fact that all the previously known distributional and ecological information shows that the species is a typical lowland reptile supports our assertion. *G. speciosus* distribution in Colombia comprises the lowland dry forests zones of the Caribbean region, the moist forests across inter-Andean valleys, and the

Orinoquian savannahs below 900 m (**Hernández-Ruz, 2006; Meza-Joya & Ramos-Pallares, 2015**), which means that this unusual record is almost 3.000 m above the highest known elevational record and very likely its origin was the Magdalena Valley where the closest confirmed populations have been identified (**Meza-Joya & Ramos-Pallares, 2015**). This exchange of biota between lowlands and Andean areas may be more common than previously thought due to the high vehicular flow to which this region is exposed (**Jarrin-V, 2003**). Therefore, documenting unusual records is relevant to evaluate possible routes of colonization or unintentional transport of exotic species. *G. speciosus* was not previously recorded for the department of Caldas and our report should be handled with caution. There is a high probability of finding lowland populations of *G. speciosus* in Caldas in locations near to the Magdalena River basin where this species occurs (**Meza-Joya & Ramos-Pallares, 2015**).

Finally, additional sampling should be carried out in the main cities of the Colombian Andes to verify whether species of exotic geckos have established there with viable populations. The efforts should also consider the effects that these invasive species can generate on the ecological responses of local assemblages (see **Perella & Behm, 2020**, for a discussion on this topic). The study of the biotic and abiotic factors that influence the colonization of exotic geckos in South American biomes, especially across the Andes, is urgent. Molecular studies are required to shed light on the origin of the foreign species registered in the country and to establish the possible genotypic variations of these populations throughout the national territory.

Supplementary information

Table 1S. Morphometric data (mm) of voucher specimens at the Museo de Historia Natural, Universidad de Caldas (MHN-UCa-R), Manizales, Colombia. Specimens from additional collections were not measured due to limited access to museums during the Covid-19 quarantine. See the table 1S in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1356/3036>

Table 2S. Compilation of distributional records of *Hemidactylus frenatus*, *H. garnotii* and *H. mabouia* in Colombia. See the table 1S in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1356/3037>

Acknowledgments

To Luis David Montoya for sharing the record and information on the specimen collected at *Parque Nacional Natural los Nevados*. To Natalia Ramírez, Bernardo Ramírez, and Elsa Chaves who provided photographs of the specimens from Popayán, Cauca. To Sofía Terán Sánchez and two anonymous reviewers for their comments that improved this manuscript. JRCP thanks Ángela Suárez for allowing the review of *Hemidactylus* specimens housed at the Reptile collection of *Universidad de los Andes*. To Alejandro Corrales García who kindly shared the data of *Hemidactylus* in the ANDES-R collection.

Author contributions

Project design: JJHO, JARM, HERC, JRCP; data collection: JJHO, AMPR, ACG, HFAM, JRCP, HERC; data analysis and interpretation: JJHO, JARM, HERC, ACG; writing review and editing: JJHO, JARM, HERC, ACG, AMPR, JRCP, HFAM.

Conflicts of interest

None.

References

Abarca, J. (2006). Gecos caseros (*Hemidactylus*): Biología e impacto en Costa Rica. *Ambientico*, **159**: 2-16.

- Acevedo, J., Bocarejo, J.P., Lleras, G.C., Echeverry, J.C., Ospina, G., Rodríguez, A.** (2009). El transporte como soporte al desarrollo de Colombia: una visión al 2040. Bogotá DC, Colombia: Universidad de Los Andes. 300 pp.
- Angarita-Sierra, T.** (2010). Reptiles: culebras, lagartijas y tortugas. In J. Infante-Betancour, A. Tiboche-García. (Ed.), Flora y fauna de los humedales y bosques de la zona plana del municipio de Andalucía (213-221). Bogotá DC, Colombia. Coldelsel. pp. 211-221.
- Armenteras, D., Gast, F., Villareal, H.** (2003). Andean forest fragmentation and the representativeness of protected natural areas in the eastern Andes Colombia. *Biol Conserv.* **113** (2): 245-256.
- Avila-Pires, T.C.S.** (1995). Lizards of Brazilian Amazonia (Reptilia: Squamata). *Zool Verh.* **299**: 1-706.
- Ayala, S.C.** (1986). Saurios de Colombia: lista actualizada y distribución de ejemplares colombianos en los museos. *Caldasia.* **15** (71-75): 555-575.
- Bauer, A.M. & Baker, B.W.** (2012). The Lake Champaign Frontier as a portal of accidentally introduced Asian geckos. *IRCF Reptiles and Amphibians.* **19**: 60-63.
- Bellard, C., Leroy, B., Thuiller, W., Rysman, J.F., Courchamp, F.** (2016). Major drivers of invasion risks throughout the world. *Ecosphere.* **7** (3): e01241. Doi: 10.1002/ecs2.1241.
- Caicedo-Portilla, J.R.** (2019). Presencia de *Hemidactylus frenatus* y *Hemidactylus mabouia* (Squamata: Gekkonidae) en Leticia, Amazonia colombiana. *Biota Colombiana.* **20** (2): 120-127.
- Caicedo-Portilla, J.R. & Dulcey-Cala, C.J.** (2011). Distribución del gecko introducido *Hemidactylus frenatus* (Dumeril y Bribon 1836) (Squamata: Gekkonidae) en Colombia. *Biota Colombiana.* **12** (2): 45-56.
- Caicedo-Portilla, J.R. & Gutiérrez-Lamus, L.** (2020). New distributional records for *Gonatodes albogularis* (Squamata: Sphaerodactylidae) from eastern Colombia. *Biota Colombiana.* **21** (2): 101-107.
- Cárdenas-Arévalo, G., Castaño-Mora, O.V., Carvajal-Cogollo, J.E.** (2010). Comunidad de reptiles en humedales y áreas aledañas del departamento de Córdoba. In J.O. Rangel-Ch. (Ed.), Colombia Diversidad Biótica IX: Ciénagas de Córdoba: biodiversidad-ecología y manejo ambiental (381-398). Bogotá, Colombia: Editores Impresores LTDA.
- Carranza, S. & Arnold, E.N.** (2006). Systematics, biogeography, and evolution of *Hemidactylus* geckos (Reptilia: Gekkonidae) elucidated using mitochondrial DNA sequences. *Mol Phylogenetics Evol.* **38** (2): 531-545.
- Carvajal-Campos, A. & Torres-Carvajal, O.** (2010). *Hemidactylus mabouia* Moreau De Jonnès, 1818 and *H. frenatus* Schlegel, 1836 in western Ecuador: new records reveal range extension. *Herpetozoa.* **23** (1/2): 90-91.
- Case, T.J., Bolger, D.T., Petren, K.** (1994). Invasions and competitive displacement among house geckos in the tropical Pacific. *Ecology.* **75**: 464-477.
- Castaño-Mora, O.V.** (2000). Invasores en el Magdalena Medio: primer registro de la presencia de *Hemidactylus frenatus* (Reptilia: Sauria: Gekkonidae), en Colombia. In P. Muñoz, J. Aguirre. (Ed.), Memorias del I Congreso Colombiano de Zoología (19). Bogotá DC, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Chapple, D.G., Simmonds, S.M., Wong, B.B.** (2011). Know when to run, know when to hide: can behavioral differences explain the divergent invasion success of two sympatric lizards? *Ecol Evol.* **1** (3): 278-289.
- Chapple, D.G., Simmonds, S.M., Wong, B.B.** (2012). Can behavioral and personality traits influence the success of unintentional species introductions? *Trends Ecol Evol.* **27**: 57-64.
- Clavero, M. & García-Berthou, E.** (2005). Invasive species are a leading cause of animal extinctions. *Trends Ecol Evol.* **20** (3): 110.
- Cuatrecasas, J.** (1958). Aspectos de la vegetación natural de Colombia. *Rev Acad Colomb Cienc Ex Fis y Nat.* **10** (4): 221-264.
- Dame, E.A. & Petren, K.** (2006). Behavioural mechanisms of invasion and displacement in Pacific island geckos (*Hemidactylus*). *Anim Behav.* **71** (5): 1165-1173.
- Díaz-Pérez, J., Sampedro-Marín, A., Ramírez-Pinilla, M.** (2017). Actividad reproductiva y dieta de *Hemidactylus frenatus* (Sauria: Gekkonidae) en el norte de Colombia. *Pap Avulsos Zool.* **57** (36): 459-472.
- Díaz-Pérez, J., Torres, R., Paternina, L., Santana, D., Miranda, R.** (2020). Traveling with an invader: ectoparasitic mites of *Hemidactylus frenatus* (Squamata: Gekkonidae) in Colombia. *Cuad Herpetol.* **34**: 79-82.
- Forero-Medina, G., Moreno-Arias, R., Gutiérrez, F.P.** (2012). *Caiman crocodilus* (Linnaeus 1758). In F.P. Gutiérrez, C.A. Lasso, M.P. Baptiste, P. Sánchez-Duarte, A.M. Díaz. (Ed.),

- VI. Catálogo de la biodiversidad acuática exótica y trasplantada en Colombia: moluscos, crustáceos, peces, anfibios, reptiles y aves (247-250). Bogotá DC, Colombia: Instituto de Investigación de los Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).
- Frehse, F.A., Braga, R.R., Nocera, G.A., Vitule, J.R.S.** (2016). Non-native species and invasion biology in a megadiverse country: scientometric analysis and ecological interactions in Brazil. *Biol Invasions*. **18**: 3713-3725.
- Giri, V. & Bauer, A.M.** (2008). A new ground-dwelling *Hemidactylus* (Squamata: Gekkonidae) from Maharashtra, with a key to the *Hemidactylus* of India. *Zootaxa*. **1700**: 21-34.
- Gutiérrez, F.P., Lasso, C.A., Baptiste, M.P., Sánchez-Duarte, P., Díaz, A.M.** (2012). VI. Catálogo de la biodiversidad acuática exótica y trasplantada en Colombia: moluscos, crustáceos, peces, anfibios, reptiles y aves. Bogotá DC, Colombia: Instituto de Investigación de los Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). 335 p.
- Hernández-Ruz, E.J.** (2006). *Gymnophthalmus speciosus* (Hallowell 1861) (Squamata, Gymnophthalmidae) en Colombia. *Caldasia*. **28**: 79-88.
- Hulme, P.E.** (2009). Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization. *J Appl Ecol*. **46**: 10-18.
- Invasive Species Specialist Group – ISSG.** (2000). Guidelines for the prevention of biodiversity loss caused by alien invasive species. Gland, Switzerland: International Union for Conservation of Nature – IUCN.
- Jarrin-V, P.** (2003). An unusual record of *Peropteryx macrotis* (Chiroptera: Emballonuridae) in the Andean highlands of Ecuador. *Mammalia*. **67** (4): 613-616.
- Kluge, A.G.** (1969). The evolution and geographic origin of the New World *Hemidactylus mabouia-brookii* complex (Gekkonidae, Sauria). *Misc Publ Mus Zool Univ Mich*. **138**: 1-78.
- Krysko, K.L. & Daniels, K.J.** (2005). A key to the geckos (Sauria: Gekkonidae) of Florida. *Caribb J Sci*. **41**: 28-36.
- Levine, J.M. & D'antonio, C.M.** (2003). Forecasting biological invasions with increasing international trade. *Conserv Biol*. **17**: 322-326.
- Lin, W., Zhou, G., Cheng, X., Xu, R.** (2007). Fast economic development accelerates biological invasions in China. *PLoS ONE*. **2** (11): e1208.
- Lockwood, J.L., Hoopes, M.F., Marchetti, M.P.** (2013). *Invasion ecology*, 2nd Edition. New York, United States: Wiley-Blackwell.
- Medem, F.** (1968). El desarrollo de la herpetología en Colombia. *Rev Acad Colomb Cienc Exactas Fis Nat*. **13** (50): 149-200.
- Medina-Rangel, G.F., Méndez-Galeano, M.A., Calderón-Espinosa, M.L.** (2019). Herpetofauna of San José del Guaviare, Guaviare, Colombia. *Biota Colombiana*. **20**: 75-90.
- Meyerson, L.A. & Mooney, H.A.** (2007). Invasive alien species in an era of globalization. *Front Ecol Environ*. **5** (4): 199-208.
- Meza-Joya, F. & Ramos-Palares, E.** (2015). New records, range extensions and updated distribution of two gymnophthalmid lizards from the Caribbean Region, Colombia. *Check List*. **11** (5): 1735.
- Milardi, M., Gavioli, A., Soana, E., Lanzoni, M., Fano, E.A., Castaldelli, G.** (2020). The role of species introduction in modifying the functional diversity of native communities. *Sci Total Environ*. **699**: 134364.
- Mooney, H.A. & Hobbs, R.J.** (2000). *Invasive species in a changing world*. Washington DC, United States: Island Press.
- Moreno-Arias, R.A., Medina-Rangel, G.F., Castaño-Mora, V.O.** (2008). Lowland reptiles of Yacopí (Cundinamarca, Colombia). *Rev Acad Colomb Cienc Exactas Fis Nat*. **32**: 93-103.
- Mueses-Cisneros, J.J. & Caicedo-Portilla, J.R.** (2018). Anfibios y reptiles. In C. Vriesendorp, N. Pitman, D. Alvira-Reyes, A. Salazar-Molano, R. Botero-García, A. Arciniegas, L. De Souza, A. Del Campo, D.F. Stotz, T. Wachter, A. Ravikumar, y A. Peplinski. (Ed.), Colombia: La Lindosa, Capricho, Cerritos (117-126 y 220-225). Chicago, United States: The Field Museum.
- Perella, C.D. & Behm, J.** (2020). Understanding the spread and impact of exotic geckos in the greater Caribbean region. *Biodivers Conserv*. **29**: 1109-1134.
- Ramírez-Albores, J.E., Badano, E.I., Flores, J., Flores-Flores J.L., Yáñez-Espinosa, L.** (2019). Scientific literature on invasive alien species in a megadiverse country: advances and challenges in Mexico. *NeoBiota*. **48**: 113-127.
- Renjifo, J.M. & Lundberg, M.** (1999). *Guía de campo anfibios y reptiles de Urrá*. Medellín, Colombia: Editorial Colina. 96 p.

- Rödger, D., Solé, M., Böhme, W.** (2008). Predicting the potential distributions of two alien invasive house geckos (Gekkonidae: *Hemidactylus frenatus*, *Hemidactylus mabouia*). *North-West J Zool.* **4** (2): 236-246.
- Rodríguez, J.P.** (2001). La amenaza de las especies exóticas para la conservación de la biodiversidad suramericana. *Interciencia.* **26** (10): 479-483.
- Taylor-Brown, A., Booth, R., Gillett, A., Mealy, E., Ogbourne, S.M., Polkinghorne, A., Conroy, G.C.** (2019). The impact of human activities on Australian wildlife. *PLoS ONE.* **14**: e0206958.
- Torres-Carvajal, O.** (2015). On the origin of South American populations of the common house gecko (Gekkonidae: *Hemidactylus frenatus*). *NeoBiota.* **27**: 69-79.
- Townsend, J.H. & Krysko, L.K.** (2003). The distribution of *Hemidactylus* (Sauria: Gekkonidae) in northern peninsular Florida. *Florida Scientific.* **66** (3): 204-208.
- Uetz, P., P. Freed, Hošek, J.** (2020). The Reptile Database. World-wide electronic publication. Accessed: November 17, 2020. Available from: <http://www.reptile-database.org/>
- Vanegas-Guerrero, J., Fernández, C., Buitrago-González, W., Vargas-Salinas, F.** (2016). Urban Remnant Forests: Are they important for herpetofaunal conservation in the Central Andes of Colombia? *Herpetol Rev.* **47** (2): 180-185.
- Vásquez-Restrepo, J.D. & Lapwong, Y.** (2018). Confirming the presence of a fourth species of non-native house gecko of the genus *Hemidactylus* Oken, 1817 (Squamata, Gekkonidae) in Colombia. *Check List.* **14** (4): 665-669.
- Veitch, C.R. & Clout, M.N.** (2001). Human dimensions in the management of invasive species in New Zealand. In J.A. McNeely. (Ed.), *The Great Reshuffling: human dimensions of invasive alien species* (242). Gland and Cambridge, Switzerland and United Kingdom: International Union for Conservation of Nature – IUCN.
- Zug, G.R., Vindum, J.V., Koo, M.S.** (2007). Burmese *Hemidactylus* (Reptilia, Squamata, Gekkonidae): taxonomic notes on tropical Asian *Hemidactylus*. *Proc Calif Acad Sci.* **58** (19): 387-405.

Artículo original

Mamíferos (Mammalia) de la Amazonía colombiana

Mammals (Mammalia) of the Colombian Amazon

 Darwin M. Morales-Martínez

Grupo de Fauna, Programa de Ecosistemas y Recursos Naturales, Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas - SINCHI, Bogotá, Colombia

Resumen

La Amazonía se considera una de las zonas con mayor diversidad de mamíferos a escala mundial. El conocimiento de dicha diversidad en Colombia es aún parcial y fragmentado. En ese contexto, se elaboró la lista de las especies de mamíferos conocidas y de las probables en la Amazonía colombiana a partir de la información contenida en la literatura especializada y en las bases de datos de biodiversidad. Se tuvieron en cuenta la división política-administrativa de la región y las tres provincias biogeográficas: Amazonía, Guayana y Norandina. Se evaluó la representatividad geográfica de los especímenes y se determinaron las áreas prioritarias para realizar inventarios y complementar el conocimiento actual de la diversidad de mamíferos en la región. Se registraron 265 especies de mamíferos: 94 en la provincia Norandina, 196 en la Amazonía y 183 en la Guayana. En los departamentos se ha registrado un rango de especies que va desde 26 en el Cauca hasta 157 en Caquetá y Putumayo. Del orden Chiroptera se registraron 137 especies, seguido por Rodentia, con 45 especies; en los otros órdenes se registraron entre una y 23 especies. Se encontró que la mayor parte del territorio está inexplorado y sin especímenes en las colecciones. Además, hay una gran probabilidad de que en la mayor parte del territorio de la Amazonía se encuentren, por lo menos, 70 especies no registradas, lo que la convierte en un área ideal para nuevos inventarios biológicos. Los resultados indican que la diversidad de mamíferos está subestimada y es necesario incrementar las exploraciones biológicas con el personal y la intensidad de muestreo apropiados, fortalecer colecciones biológicas e impulsar el uso de herramientas moleculares.

Palabras clave: Andes; Inventarios; Biodiversidad; Escudo Guayanés, Neotrópico.

Abstract

The Amazon is one of the areas with the greatest diversity of mammals worldwide. However, the knowledge about this biodiversity in the Colombian Amazon is still partial and fragmented. A list of the known and probable mammal species in the Colombian Amazon was prepared from the information in the literature and several biodiversity databases according to the political and administrative division of the region and three biogeographic provinces: Amazon, Guyana, and Norandean. The geographic representativity of the specimens was assessed and the priority areas for mammal inventories were identified. We registered 265 mammal species in the region: 94 in the Norandean province, 196 in the Amazon province, and 183 in the Guyana province. By departments, we registered between 26 in Cauca and 157 species in Caquetá and Putumayo. The species registered per order showed 137 belonging to the Chiroptera, followed by 45 belonging to the Rodentia; other orders had between one and 23 species. Most of the Amazon area in Colombia is unexplored and there are no specimens in natural history collections. Therefore, it is highly probable that almost 70 unregistered species may be found in most of the Amazon area, which makes it an ideal territory to conduct future inventories. These results show that the diversity of mammals is underestimated, as well as the need to increase the biological explorations with enough personnel and the proper sampling intensity, reinforce biological collection and encourage the use of molecular tools.

Keywords: Andes; Inventories; Biodiversity; Guiana Shield; Neotropics.

Citación: Morales-Martínez DM. Mamíferos (Mammalia) de la Amazonía colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):474-488, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1318>

Editor: Martha Patricia Ramírez Pinilla

Correspondencia:

Darwin M. Morales-Martínez;
dmmoralesmar@gmail.com

Recibido: 1 de octubre de 2020

Aceptado: 6 de marzo de 2021

Publicado: 17 de junio de 2021



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

Introducción

Acrecentar el conocimiento de la biodiversidad en Colombia es una prioridad nacional que se enmarca en el Convenio de Diversidad Biológica suscrito por el país en 1995 y en la Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (**Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS**, 2012), instrumentos con los que el país se comprometió a acopiar el conocimiento suficiente de la biodiversidad para su valoración, conservación y aprovechamiento sostenible. Sin embargo, ello contrasta con el incipiente conocimiento actual de la biodiversidad en Colombia (**Boron, et al.**, 2019), incluidos los mamíferos, a pesar de que Colombia alberga alrededor de la décima parte (cerca de 533 especies) (**Sociedad Colombiana de Mastozoología - SCMas**, 2017) de su diversidad mundial (6.400 especies) (**Burgin, et al.**, 2018; **Ramírez-Chaves, et al.**, 2016). Por ejemplo, entre el 2000 y el 2019 se describieron 122 especies de roedores en Suramérica, pero ninguna en Colombia, a diferencia de los países vecinos donde se describieron desde tres hasta más de 40 especies (**Dalapicolla & Percequillo**, 2020).

La Amazonía es una de las regiones que alberga una de las faunas de mamíferos más ricas en el mundo (**Simmons & Voss**, 1998; **Bonvicino & Wesksler**, 2012) y se ha estimado que también es una de las regiones con mayor diversidad de mamíferos en Colombia (**Alberico & Rojas-Díaz**, 2000; **Rodríguez-Mahecha, et al.**, 2006). Sin embargo, en otros estudios se ha estimado que la diversidad es similar a la de otras regiones del país, como la Orinoquía (**Pardo-Martínez & Rangel-Churio**, 2010). El conocimiento de la riqueza y la distribución de los mamíferos en la Amazonía colombiana aún es precario debido a varios factores: hay grandes zonas históricamente inexploradas (**Hernández-Camacho, et al.**, 1992; **Montenegro**, 2007; **Trujillo, et al.**, 2018); la representatividad de la región amazónica en las contribuciones científicas es baja (**Montenegro**, 2007), y los inventarios locales con esfuerzos de muestreo intensivos son pocos (**Sánchez-Palomino, et al.**, 1993; **Montenegro-Díaz & Romero-Ruíz**, 1999; **Polanco-Ochoa, et al.**, 1999; **Mantilla-Meluk, et al.**, 2017; **Morales-Martínez, et al.**, 2020a), así como los inventarios regionales, los cuales se han concentrado en la Estrella Fluvial del Inírida (**Ferrer-Pérez, et al.**, 2009) y en los departamentos de Caquetá (**Marín-Vásquez & Aguilar-González**, 2005), Cauca (**Ramírez-Chaves & Pérez**, 2010) y Putumayo (**Ramírez-Chaves, et al.**, 2013).

Dado el vacío en el conocimiento de la diversidad de mamíferos en la Amazonía colombiana, es necesario hacer una revisión de la información disponible para determinar la riqueza de especies de este grupo en la región y así identificar lo que falta por conocer en el contexto geográfico y taxonómico, con el fin de planear futuros estudios y estrategias de conservación complementarias. En este estudio se recopiló la información sobre la riqueza de mamíferos en la Amazonía, se determinaron los vacíos de la información geográfica disponible en las bases de datos de biodiversidad, y se sugieren áreas prioritarias para incrementar el conocimiento de la diversidad de mamíferos en la región.

Materiales y métodos

Área de estudio

La Amazonía colombiana *sensu lato* (*s.l.*) comprende cerca de 477.274 km² y se extiende en sentido oriente-occidente desde la divisoria de aguas de las cordilleras Centro-Oriental y Oriental de los Andes hasta los límites con Venezuela y Brasil, y en sentido norte-sur desde el sur del río Ariari hasta su desembocadura en el río Guaviare y la franja de bosque del norte del río Guaviare hasta los ríos Putumayo y Amazonas en su extremo sur (**Murcia, et al.**, 2006), área que cubre la totalidad de los departamentos de Amazonas, Caquetá, Guainía, Guaviare y Putumayo, y parcialmente, los departamentos de Cauca (oriente), Nariño (oriente), Meta (sur) y Vichada (sur).

Para facilitar la clasificación geográfica de las especies registradas se utilizó el mapa de distribución de la Amazonía en Colombia del Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas-SINCHI (**Murcia, et al.**, 2006), con base en el cual se delimitaron tres provincias

biogeográficas siguiendo a **Hernández-Camacho, et al.** (1992): la provincia Norandina, la provincia de la Guayana y la provincia de la Amazonía. La provincia Norandina fue delimitada a partir de la cota de 1.000 m de altitud, la cual separa todo el gradiente de vegetación montano (incluidas las selvas subandinas hasta el páramo) (**Cuatrecasas, 2017; Rangel-Churio, et al., 1997**) de las provincias biogeográficas de la Guayana y la Amazonía situadas por debajo de los 1.000 m (**Figura 1**).

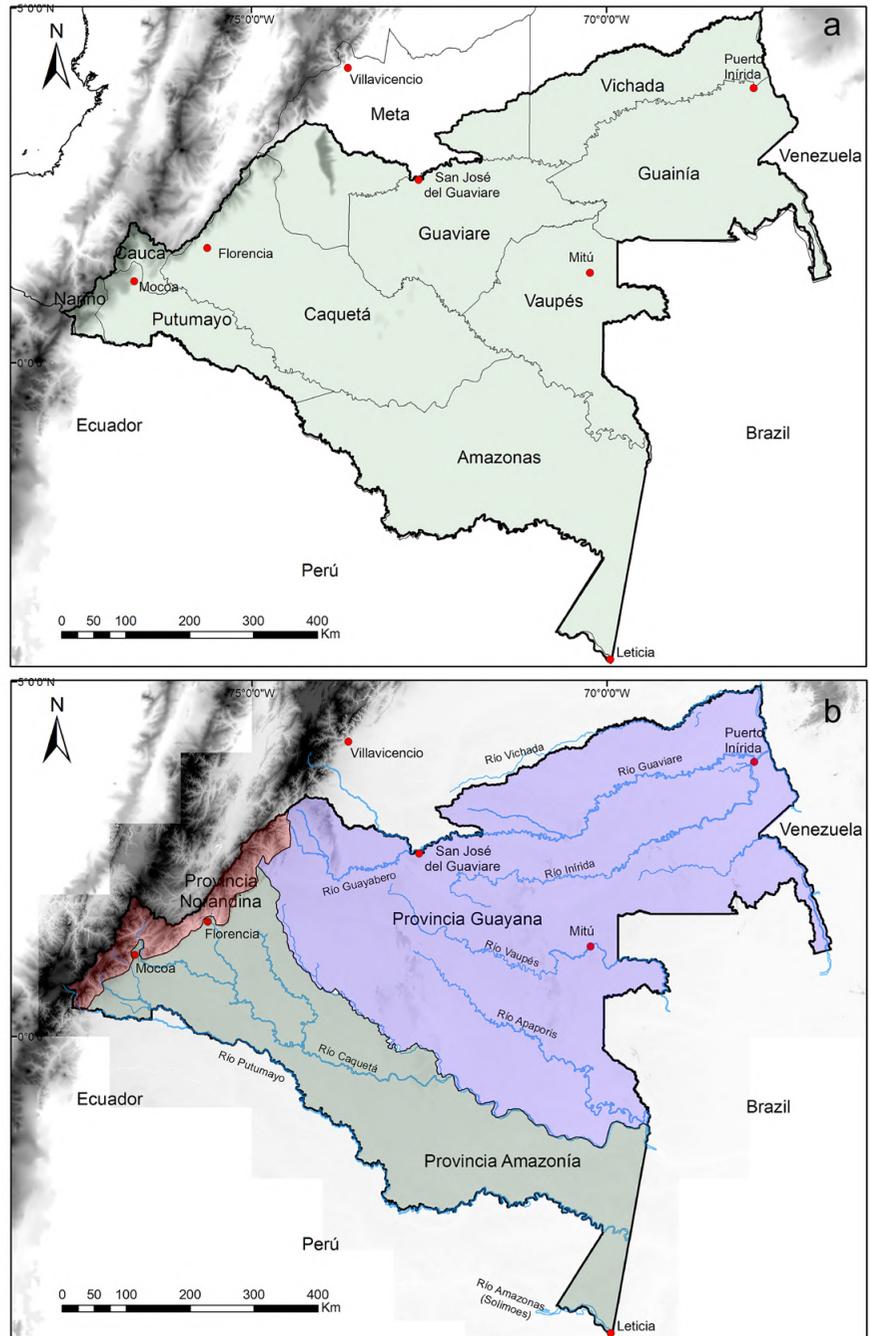


Figura 1. Delimitación de la Amazonía colombiana. **a.** Delimitación político-administrativa de la Amazonía en Colombia. **b.** Provincias biogeográficas según **Hernández-Camacho, et al.,** (1992), en rojo, provincia Norandina (delimitada a partir de la cota de 1.000 metros de altitud); en azul, provincia Guayana; en verde, provincia Amazonía.

Riqueza y distribución de especies de mamíferos en la Amazonía

Para establecer la riqueza de mamíferos en la Amazonía se partió de la más reciente lista de especies de mamíferos de Colombia (SCMas, 2017), y su distribución se complementó con la revisión de la información reportada en las listas de especies de mamíferos del país desde el 2000 (Alberico, *et al.*, 2000; Solari, *et al.*, 2013; Ramírez-Chaves & Suárez-Castro, 2014; Ramírez-Chaves, *et al.*, 2016), de la literatura asociada a registros de especies, incluidas listas regionales y por departamentos (Ferrer-Pérez, *et al.*, 2009; Marín-Vásquez & Aguilar-González, 2005; Ramírez-Chaves & Pérez, 2010; Ramírez-Chaves, *et al.*, 2013), y una búsqueda en la base de datos mundial de la biodiversidad *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF) (<https://www.gbif.org/es/>; doi: 10.15468/dl.d8pm6b) que incluyó solamente los datos correspondientes a especímenes preservados (*preserved specimens*) en las colecciones biológicas nacionales e internacionales en los límites de la Amazonía colombiana (Figura 1). Se siguió la taxonomía descrita en la base de datos de mamíferos del mundo (<https://mammaldiversity.org>) (Burgin, *et al.*, 2018). Además, con base en las mismas fuentes se recopiló la información de las especies con presencia potencial en la Amazonía según la distribución geográfica estimada en la región y en áreas adyacentes a las fronteras del país.

Cobertura geográfica de los especímenes de mamíferos

Para estimar los lugares en los que se ha muestreado en la Amazonía, determinar la cobertura geográfica de los especímenes y confirmar su presencia en los departamentos de Colombia pertenecientes a esta región, se utilizaron los registros encontrados en la GBIF y se determinó la cobertura geográfica mediante un análisis de densidad de puntos con el algoritmo de Kernel en un radio de 10 km. De esta forma se obtuvo un mapa con diagramas de calor que representan la densidad de especímenes recolectados. El análisis se hizo para cada orden, con excepción de los órdenes Cingulata, Cetacea, Lagomorpha y Perissodactyla debido al bajo número de registros, por lo que para ellos solo se presenta la distribución de los puntos de recolección. Para los análisis se utilizó el componente ArcMap™ del paquete ArcGIS® por Esri.

Áreas recomendadas para los inventarios de mamíferos

Se determinaron las áreas con una alta probabilidad de complementar la riqueza conocida utilizando el paquete de R WhereNext (Velázquez-Tibatá, 2019). Este paquete utiliza el modelamiento generalizado de disimilitud (Ferrier, *et al.*, 2007) e identifica las áreas biológicamente distintas a las previamente muestreadas, lo que permite predecir áreas y puntos idóneos para llenar los vacíos en la información sobre la biodiversidad con base en datos preexistentes.

Para este análisis se recopilaron todos los registros disponibles en Colombia en la plataforma de la GBIF sin limitarse a los especímenes en las colecciones, ya que WhereNext no permite esa segregación. Se realizaron análisis considerando todos los mamíferos, así como análisis individuales para los órdenes con mayor riqueza (más de 15 especies): Carnívora, Chiroptera, Didelphimorphia, Primates y Rodentia. Los modelos incorporaron todo el país y no se limitaron a la región amazónica, ya que la predicción de áreas complementarias utiliza un mínimo de localidades (puntos de muestreo con coordenadas) con más de un episodio de muestreo (basado en fechas), un número mínimo de especies registradas y una completitud mínima del muestreo (basado en el estimador Chao 2) (Velázquez-Tibatá, 2019). Los puntos de muestreo con valores para estos parámetros considerados mínimos (Tabla 1) son casi ausentes o inexistentes en la Amazonía, lo que hace imposible calcular el modelo únicamente para la región. Los parámetros que se utilizaron en los modelos se presentan en la tabla 1. El modelo resultante corresponde a un mapa de calor en que se señalan las áreas y el punto de mayor probabilidad de complementariedad según los parámetros mínimos establecidos. Las áreas de mayor complementariedad en el primer muestreo del modelo se consideraron como áreas recomendadas para el inventario de mamíferos.

Resultados

Riqueza de especies de mamíferos en la Amazonía

Se registraron 265 especies de mamíferos silvestres en la Amazonía colombiana *s.l.* (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1318/3030>; referencias de la lista en: **Anexo 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1318/3024>; y comentarios a la lista en: **Anexo 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1318/3029>). De estas, 94 se registraron en la provincia Norandina (>1.000 m s.n.m.), 196 en la Amazonía y 183 en la Guayana (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1318/3030>). La riqueza registrada en departamentos como Amazonas (142 especies), Caquetá (157 especies), Guaviare (128 especies), Meta (143 especies) y Putumayo (157 especies) es superior o cercana al 50 % (48,30 - 59,24 %) del total de las especies registradas en toda la Amazonía colombiana (**Tabla 2**). En los departamentos de Guainía, Vaupés y Vichada se han registrado entre 57 y 91 especies, que representan entre el 21,51 y el 34,34 % del total de especies registradas en la Amazonía colombiana, en tanto que en los departamentos de Cauca y Nariño se han registrado 26 y 38 especies, respectivamente, es decir, el 9,81 y el 14,34 % del total de las especies registradas en la Amazonía colombiana (**Tabla 2**).

El orden Chiroptera presentó el mayor número de especies, con 137, seguido de Rodentia, con 45, Primates, con 23, Carnivora, con 20, Didelphimorphia, con 17, Artiodactyla, con siete, Pilosa, con seis, Cingulata, con cuatro, Cetacea y Perissodactyla con

Tabla 1. Parámetros usados en los modelos de estimación de áreas prioritarias de muestreo en la Amazonía colombiana mediante el análisis de complementariedad

Grupo	Número mínimo de muestreos	Número mínimo de especies	% completitud	Número de localidades (celdas) para modelo
Mamíferos	2	25	75	10
Carnivora	2	3	75	30
Chiroptera	2	20	75	15
Didelphimorphia	2	3	80	16
Primates	2	4	75	22
Rodentia	2	8	75	11

Tabla 2. Número de especies registradas con base en especímenes en cada departamento y porcentaje de representatividad con respecto al número de especies reportadas para toda la Amazonía

Departamento	Número de especies	Representatividad con respecto a especies reportadas (%)	Número de especímenes
Amazonas	142	53,59	1582
Caquetá	157	59,24	1339
Cauca	26	9,81	63
Guainía	57	21,51	224
Guaviare	128	48,30	378
Meta	143	53,96	3611
Nariño	38	14,34	10
Putumayo	157	59,24	1524
Vaupés	91	34,34	546
Vichada	57	21,51	63

Tabla 3. Número de especies de mamíferos por orden en cada una de las provincias de la Amazonía y número y representatividad de especímenes recolectados en la Amazonía por orden

	Total	Norandina	Amazonía	Guayana	Especies probables	Especímenes	% Especímenes
Artiodactyla	7	4	5	5		166	1,80
Carnivora	20	12	16	15	3	246	2,60
Cetacea	2		2	1		25	0,30
Chiroptera	137	49	93	101	31	6418	68,90
Cingulata	4	1	4	4		42	0,40
Didelphimorphia	17	8	16	12	8	324	3,50
Lagomorpha	1	1	1	1		17	0,20
Perissodactyla	2	1	1	1		38	0,40
Pilosa	6	4	6	5	1	59	0,60
Primates	23	2	20	12	1	658	7,00
Rodentia	45	12	31	26	26	1346	14,40
Sirenia	1		1			1	0,01
Total	265	94	196	183	70	9340	

dos cada uno, y Lagomorpha y Sirenia con una cada uno (**Tabla 3**). Esta misma tendencia se repitió en los tres sectores de la Amazonía (**Tabla 3**). En general, en la provincia de la Amazonía se registró un mayor número de especies en órdenes como Didelphimorphia, Pilosa, Primates y Rodentia que en las otras dos provincias, en tanto que en la Guayana se presentó un mayor número de especies del orden Chiroptera (**Tabla 3**).

El número de especies probables para la Amazonía *s.l.* fue de 70 (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1318/3030>), la mayoría de ellas perteneciente a los órdenes Chiroptera, con 31, y Rodentia, con 26. El resto de las especies pertenecen a los órdenes Didelphimorphia, con ocho, Carnivora, con tres, y Pilosa y Primates, con una cada uno (**Tabla 3**).

Cobertura geográfica de las recolecciones hechas en la Amazonía colombiana

De los 9.340 registros de especímenes que aparecen en la GBIF con coordenadas en la zona de estudio, el 69 % pertenece al orden Chiroptera (6.418 registros), Rodentia aparece con 1.346 registros (14 %) y le sigue Primates con 658 registros (7 %). El resto de órdenes aparece con menos de 350 registros, es decir, una representatividad menor al 3,5 % (**Tabla 3**).

Según los diagramas de densidad de las recolecciones en la Amazonía (**Figuras 2 y 3**), la representatividad geográfica de los especímenes es baja. Seis áreas presentan una alta densidad de especímenes (alrededor de 300) de mamíferos, y se concentran en los dos extremos de la Serranía de La Macarena (Meta), el piedemonte de Caquetá, en el sector de Belén de los Andaquíes, y en las cabeceras municipales de las capitales de Leticia (Amazonas), Mitú (Vaupés), y Mocoa (Putumayo). En el resto de la Amazonía no hay información sobre especímenes o estos son pocos (menos de 10). En cuanto a la cobertura geográfica según los órdenes, en todos los casos la mayor parte del territorio no presenta registros de especímenes en colecciones, incluso en el Orden Chiroptera, que tiene el mayor número de especímenes en la GBIF (**Figuras 2 y 3**).

La fragmentada cobertura geográfica de los registros de especímenes reportada en la GBIF se observa también en la distribución de los especímenes por departamento, siendo Meta el que mayor número de especímenes (3.611) registra, concentrados en los dos extremos de la Serranía de La Macarena, seguido de Caquetá, Amazonas y Putumayo,

con 1.339, 1.582 y 1.524 especímenes, respectivamente, concentrados en las cabeceras municipales de Florencia, Leticia y Mocoa. El resto de los departamentos presentan menos de 600 especímenes, y Cauca, Nariño y Vichada no alcanzan los 100 especímenes (**Tabla 2**) (**Figuras 2 y 3**).

Áreas prioritarias para la exploración

Los seis modelos de predicción de las áreas con mayor probabilidad de complementar la riqueza conocida a nivel de Colombia priorizaron la Amazonía como un área importante para ampliar el conocimiento de la diversidad del país (**Figura 4**). Con respecto a los mamíferos, la mayor parte del territorio de la Amazonía aparece con una probabilidad por encima del 40 % de complementariedad, con los mayores valores en los departamentos de Amazonas, Cauca, Nariño, Putumayo y Vaupés, y a lo largo de la cordillera Oriental en Caquetá (60 - 100 %), y, en menor proporción, los departamentos de Guainía y Vichada (40 - 80 %). En cuanto al orden Carnivora, la mayor parte de las zonas bajas de la Amazonía aparecen con altos valores de probabilidad de complementariedad

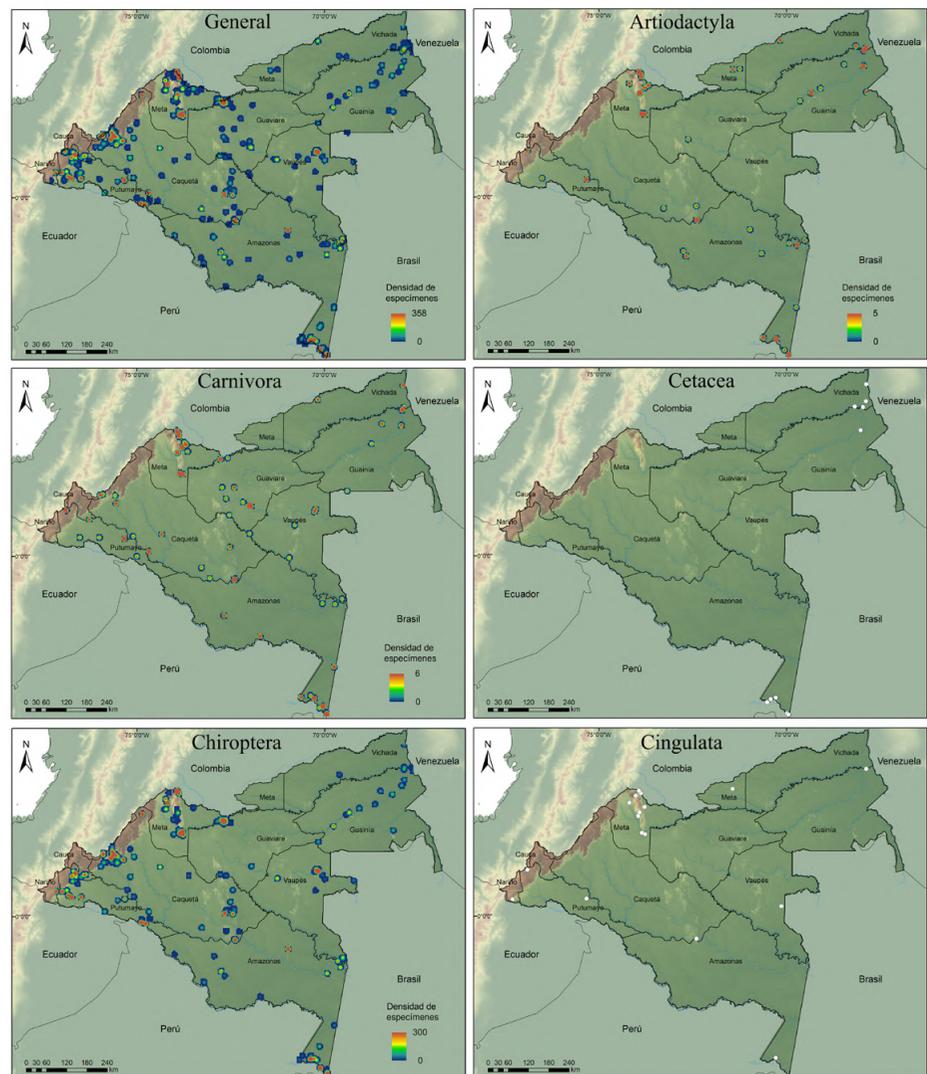


Figura 2. Distribución geográfica de los especímenes de mamíferos en la Amazonía. Para mamíferos en general y los órdenes Artiodactyla, Carnivora y Chiroptera se muestran diagramas de densidad de registros. Para los órdenes Cetacea y Cingulata se muestran los puntos de los registros.

(>60 %). Con respecto al orden Chiroptera, en la cordillera Oriental, algunas zonas del departamento del Meta (donde se ubica la Serranía de La Macarena), y la mayoría de la extensión de los departamentos de Amazonas, Caquetá, Guainía, Putumayo, Vaupés y Vichada, se estiman valores por encima del 60 % de probabilidad de complementariedad. Para el orden Didelphimorphia se predicen áreas de complementariedad por encima del 40 % en las zonas bajas de la mayoría de los departamentos (con excepción de Putumayo), y superiores al 60 % (60 – 100 %) desde el centro y hacia el oriente de la Amazonía. Para el orden Primates, en la mayor parte de la Amazonía se presentan áreas con una complementariedad superior al 40 %; en los departamentos de Cauca, Nariño, Putumayo, y algunas zonas de Amazonas, Guaviare, Guainía y Vaupés, podrían alcanzarse niveles de complementariedad superiores al 60 % (60 - 80 %). Por último, el orden Rodentia tiene una mayor probabilidad de complementariedad (40 - 100 %) en la mayoría de las zonas bajas de la Amazonía, lo que se incrementa hacia el nororiente en los departamentos de Guaviare, Guainía, Meta y Vichada, y en menor proporción, en los departamentos de Amazonas y Vaupés (**Figura 4**).

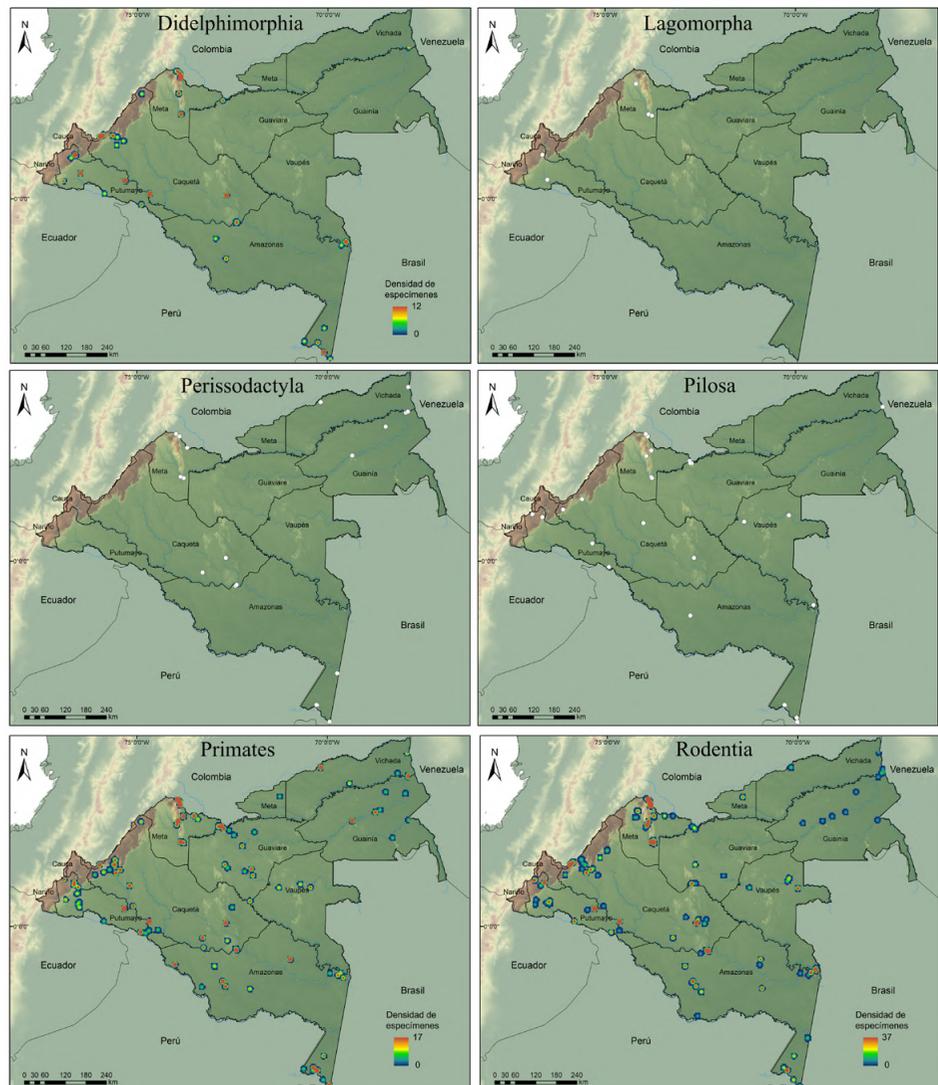


Figura 3. Distribución geográfica de los especímenes de mamíferos en la Amazonía. Para los órdenes Didelphimorphia, Primates y Rodentia se muestran diagramas de densidad de registros. Para los órdenes Lagomorpha, Perissodactyla y Pilosa se muestran los puntos de los registros.

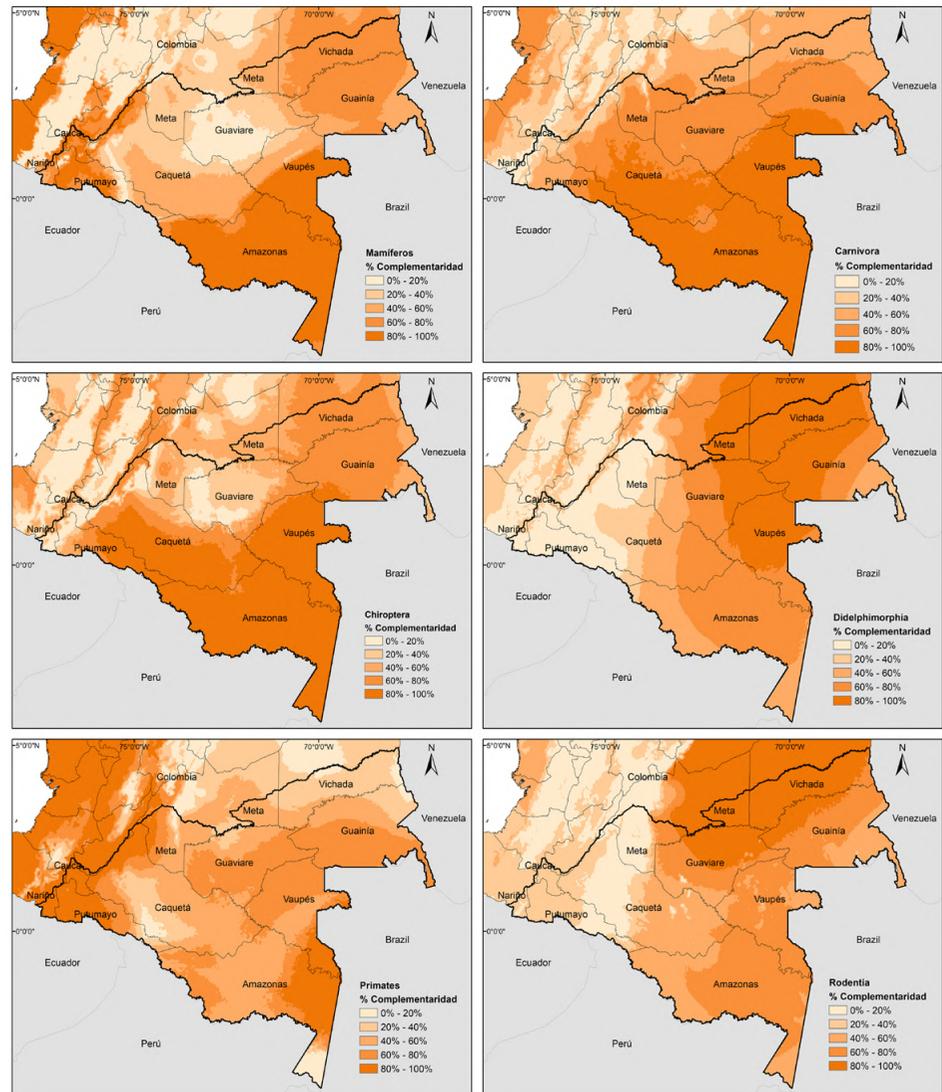


Figura 4. Mapas de porcentaje de probabilidad de complementariedad que señalan las áreas recomendadas (mayor probabilidad) para llenar los vacíos de información existentes en la Amazonía en torno a los mamíferos y los órdenes con mayor diversidad: Carnívora, Chiroptera, Didelphimorphia, Primates y Rodentia

Discusión

Diversidad de especies en la Amazonía colombiana

En la Amazonía colombiana se ha registrado alrededor del 50 % (265 especies) de la diversidad de mamíferos del país (cerca de 533 especies) (SCMas, 2017), pero es muy probable que dicha diversidad esté subestimada. Por una parte, la mayoría del territorio de la Amazonía del país sigue inexplorada y hay vastas áreas sin un solo espécimen en las colecciones, además, en la mayoría de las localidades con inventarios no se han hecho muestreos sistemáticos. Además, la creciente tendencia de descripción de especies de mamíferos a partir de revisiones taxonómicas – incluso en grupos considerados bien conocidos como los hormigueros del género *Cyclopes*; Miranda, *et al.*, 2017), los armadillos (Feijó & Cordeiro-Estrela, 2016), las ardillas (de Abreu-Jr, *et al.*, 2020) o los felinos (Oliveira & Feijó, 2017) –, la presencia de varios géneros en los cuales no hay certeza de cuál o cuáles especies tienen distribución en la región (*Guerlinguetus*, *Holochilus*,

Leptosciurus, *Monodelphis*, *Neacomys*, *Sylvilagus*) (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1318/3030>), y la alta probabilidad de complementariedad de áreas de la Amazonía según los modelos generados, confirman que la región es potencialmente mucho más rica en especies de mamíferos de lo reportado. Tomando en cuenta las especies potenciales incluidas en este estudio, el valor de submuestreo de la diversidad en la Amazonía colombiana sería superior al 25 %; sin embargo, este podría ser mayor considerando el conocimiento fragmentado de la taxonomía y la distribución de pequeños mamíferos como los marsupiales, los murciélagos y los roedores, así como las proyecciones que señalan la región tropical como una de las zonas con mayor número de especies de mamíferos descritas recientemente y con mayor potencial de albergar especies no descritas (**Patterson, 2000; Reeder, et al., 2007; Ceballos & Ehrlich, 2009; Burgin, et al., 2018; Dalapicolla & Percequillo, 2020**). Por último, el número de especies reportado es menor comparado con los valores de riqueza en la Amazonía de Perú (292) (**Pacheco, et al., 2009**) y Brasil (399) (**Paglia, et al., 2012**), este último con una mayor riqueza de pequeños mamíferos como los marsupiales (27 Vs. 17 especies), los roedores (93 Vs. 45 especies) y los murciélagos (146 Vs. 137), pero también con un área amazónica mayor.

El número de especies reportadas en la Amazonía colombiana, tanto en sus provincias biogeográficas como en cada departamento, está lejos de ser definitivo, ya que existe un vacío de conocimiento generalizado en todos los órdenes de mamíferos (**Ramírez-Chávez, et al., 2013; Morales-Martínez, et al., en prensa**), lo que se confirma con los resultados obtenidos aquí, los cuales reflejan, a su vez, la necesidad de hacer inventarios en la mayor parte del territorio. Los departamentos que registran menos de 100 especies tienen serios vacíos de conocimiento de su biodiversidad. Por ejemplo, Cauca y Nariño presentan bajos valores de riqueza (26 y 38 especies, respectivamente), a pesar de que en un área pequeña de la vertiente amazónica de la cordillera Oriental tienen un amplio rango altitudinal donde cabe esperar que la diversidad sea mucho mayor, ya que dicha vertiente se considera una de las áreas con mayor diversidad de mamíferos en Colombia (**Alberico & Rojas-Díaz, 2000; Rodríguez-Mahecha, et al., 2006**), y una de las áreas con mayor diversidad de murciélagos a escala mundial (**Patterson, et al., 1996**), con nuevas especies recientemente descritas o reportadas para el país (**Tavares, et al., 2014; Morales-Martínez, et al., 2020b**).

Los departamentos de Guainía y Vaupés, y la región sur del departamento de Vichada, también tienen menos de 100 especies registradas, pero en ellos hay áreas con altas probabilidades de complementariedad y limitan con departamentos mejor muestreados como Amazonas, Caquetá, Guaviare y Meta, por lo que se espera que su diversidad sea mayor. Los departamentos que registran más de 100 especies de mamíferos tienen grandes áreas con altas probabilidades de complementariedad y, además, han sido solo parcialmente muestreados. Por ejemplo, el departamento del Meta presenta la mayoría de los registros en la Serranía de La Macarena en publicaciones dispersas (**Sánchez-Palomino, et al., 1993**), en tanto que Amazonas, Caquetá y Guaviare presentan los mayores registros en las cabeceras municipales (Leticia, Florencia y San José del Guaviare, respectivamente (**Figuras 2 y 3**), pero no se hay publicaciones sobre la diversidad de mamíferos en ellas, con excepción de San José del Guaviare (**Morales-Martínez, et al., 2020a; López-Arévalo, et al., en prensa**), donde, a pesar de llevarse a cabo un muestreo sistemático de cinco años, el inventario de pequeños mamíferos es aún parcial, especialmente de los no voladores (**López-Arévalo, et al., 2021**). Por último, aunque los modelos de predicción de áreas de complementariedad se construyeron con parámetros mínimos en los que se garantizó que hubiera más de diez localidades, el número mínimo de especies de mamíferos usado por localidad (25 especies), y de los órdenes Didelphimorphia (tres especies), Chiroptera (20 especies) o Rodentia (ocho especies), fue menor al de aquellos que coexisten en localidades amazónicas (93 a 139 mamíferos; 5 a 12 Didelphimorphia; 44 a 65 Chiroptera; 11 a 27 Rodentia) (**Voss & Emmons, 1996**). Esto quiere decir que ni a nivel de la Amazonía colombiana ni del país existen las suficientes localidades con datos representativos en la GBIF de la riqueza de mamíferos. Por lo tanto, es probable que un área con baja complementariedad presente una riqueza mayor a la mínima usada.

En el presente estudio se incluyeron artículos científicos y reportes de especímenes en museos disponibles en la GBIF. Sin embargo, hay información adicional contenida en tesis de grado, informes técnicos y de consultorías que puede ser de difícil acceso o de poca confiabilidad. Por ejemplo, la mayor parte de los registros de mamíferos contenidos en informes de consultoría de proyectos de hidrocarburos carecen de evidencia verificable que garantice su identificación y, por lo tanto, son poco confiables, lo que limita su uso en investigaciones biológicas (Gómez-Sandoval, *et al.*, 2017). Por otra parte, aunque los registros depositados en la base de datos de biodiversidad GBIF incluyen todos los datos del Sistema de Información de la Biodiversidad (SIB) de Colombia, no todas las colecciones colombianas tienen la totalidad de sus datos en línea disponibles para consulta, por lo que su incorporación deberá hacerse en un future estudio.

El escaso conocimiento de la diversidad de mamíferos en la Amazonía colombiana resalta incluso más ante las tendencias de transformación de los ecosistemas de la región debido a la deforestación (Hoffman, *et al.*, 2018) y los incendios (Armenteras, *et al.*, 2020). Actualmente no hay estimaciones de los efectos que dichas transformaciones puedan tener en la biodiversidad de la Amazonía colombiana; tampoco hay una cuantificación de la posible pérdida de especies ni se dispone de los datos necesarios para hacerla, por lo menos en una escala espacial detallada. Este problema es más complicado si se considera que Colombia tiene un gran número de especies no descritas (entre 200.000 y 900.000 especies, incluidos los mamíferos) (Arbeláez-Cortés, 2013), cuya vulnerabilidad frente a la extinción es mayor, pues no han sido contempladas en ninguna estrategia de conservación. Por lo tanto, es necesario incrementar los estudios que evalúen la respuesta de las comunidades y las poblaciones de fauna a las dinámicas de perturbación y transformación que enfrenta la Amazonía (Armenteras, *et al.*, 2020) para así predecir y mitigar los efectos de dichas transformaciones. Para ello el conocimiento de la riqueza de mamíferos en la región es esencial, puesto que es el parámetro más básico para describir las comunidades, vital en los análisis de distribución de la biodiversidad, la evaluación de los impactos ambientales y las decisiones de conservación (Voss & Emmons, 1996; Pineda-López, 2019).

Estrategias para reforzar el conocimiento de la diversidad de mamíferos en la Amazonía colombiana

La consolidación del conocimiento de la diversidad de mamíferos en la Amazonía colombiana exige inventarios robustos y sistemáticos, así como un trabajo arduo en las colecciones biológicas y la inclusión de técnicas moleculares que permitan cerrar la brecha entre lo que se conoce y lo que está por descubrirse. En cualquier tipo de ecosistema un inventario consolidado de mamíferos, con buena representatividad de la diversidad de especies, requiere de un equipo de trabajo compuesto por varias personas que empleen metodologías complementarias (Simmons & Voss, 1998; Voss, *et al.*, 2001). El muestreo de pequeños mamíferos no voladores debe incluir diferentes tipos de trampas: Sherman, Tomahawk, trampas de caída y trampas de dosel para abarcar la heterogeneidad de microhábitats que usan las diferentes especies (Voss, *et al.*, 2001). Para el muestreo de murciélagos es necesario complementar el tradicional uso de redes de niebla con la búsqueda de refugios y el monitoreo acústico, que, además, requieren de llamadas de referencia *a priori*, escasas en Colombia y la Amazonía colombiana, con el fin de registrar la diversidad insuficientemente muestreada por las redes (Simmons & Voss, 1998; Pech-Canche, *et al.*, 2001). Para los mamíferos grandes es común el uso de cámaras automáticas, el cual no debe limitarse a la superficie del suelo y en cambio complementarse con cámaras en dosel (Gregory, *et al.*, 2014), además de los tradicionales recorridos *ad libitum* para el registro de primates y otros mamíferos. Por último, es esencial el uso de escopetas para la recolección de especímenes de mamíferos que usualmente eluden las trampas (Simmons & Voss, 1998; Voss, *et al.*, 2001), incluidos murciélagos, pequeños mamíferos no voladores, y mamíferos medianos y grandes como marsupiales (*Philander*, *Marmosa*), puercoespines (*Coendou*), otros roedores grandes

(*Myoprocta*), primates (*Aotus*) y venados (*Mazama*) ya que tienen pocos registros en colecciones, por lo que el conocimiento de su taxonomía y su distribución es parcial y puede haber especies aún no descritas.

Como es evidente, las metodologías para el inventario de mamíferos en la Amazonía van más allá de muestreos de cámaras trampa, los cuales se han preferido, sin mayor sustento técnico, a otras metodologías. El uso de cámaras trampa presenta importantes limitaciones en los inventarios de mamíferos, ya que la identificación de especies por fotos puede ser sesgada en grupos como los armadillos, marsupiales o roedores de mediano y pequeño tamaño (*Ardillas*, *Myoprocta*, *Proechimys*) e, incluso, los venados, cuya taxonomía y distribución están aún en discusión (Montenegro, *et al.*, 2019). Por ejemplo, el género de roedores *Proechimys* es uno de los más complejos a la hora de identificar sus especies y exige la recolección y revisión de especímenes (Patton & Leite, 2015). Sin embargo, recientemente se ha publicado información errónea por el uso inadecuado de las fotografías empleadas en la identificación, como el caso del primer registro para el país de *Proechimys hoplomoides* a partir de registros de fototrampeo (Mantilla-Meluk, *et al.*, 2017) y una extensión de la distribución de *Proechimys oconnelli* (Trujillo, *et al.*, 2018) basada en una fotografía que correspondía a una especie del género *Dactylomys*. Por lo tanto, el uso de fotografías para reportar especies de pequeños mamíferos no voladores debe ser extremadamente cuidadoso y puede ser útil únicamente para especies con características morfológicas muy contrastantes, como en el caso de los recientes registros de *Toromys rhipidurus* (Lozano-Flórez & Cifuentes-Acevedo, 2020) y *Didelphis imperfecta* (González, *et al.*, 2020) en Colombia.

Además de un incremento de expediciones biológicas en la Amazonía, es necesario fortalecer el trabajo en las colecciones científicas en torno a todos los grupos de mamíferos, lo cual requiere invertir recursos económicos, capital humano, infraestructura y tiempo, así como potenciar el trabajo de investigadores jóvenes y el trabajo conjunto entre colecciones (Ramírez-Chaves, *et al.*, 2013; Rodríguez-Posada, *et al.*, 2020). Por último, es necesario incrementar el conocimiento de la diversidad genética de los mamíferos en Colombia para cerrar la brecha entre la diversidad conocida y la diversidad por descubrir. Para ello, el uso de herramientas como los códigos de barras de la biodiversidad (*barcode*) pueden constituir una herramienta eficiente en la identificación de especies en la Amazonía colombiana (Morales-Martínez, *et al.*, 2021). En Colombia el uso de esta herramienta aún tiene una cobertura geográfica y taxonómica limitada y no cuenta con una sólida base de datos de referencia. Además, requiere la inversión económica y, en muchos casos, el fortalecimiento de la capacidad de los laboratorios, la cual es limitada en algunas regiones del país.

Información suplementaria

Tabla 1S. Lista de mamíferos registrados y mamíferos probables en la Amazonía colombiana. Vea la tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1318/3030>

Anexo 1S. Referencias de la Lista de Mamíferos de la Amazonía Colombiana presentada en la tabla 1S. Vea la anexo 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1318/3024>

Anexo 2S. Comentarios a la lista de mamíferos registrados en la Amazonía colombiana. Vea la anexo 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1318/3029>

Agradecimientos

Al Grupo de Fauna del Instituto SINCHI, donde surgió la necesidad de llevar a cabo este tipo de trabajos. A Miguel E. Rodríguez-Posada y Héctor E. Ramírez-Chaves, por las discusiones sobre las dificultades, limitantes y percepciones erradas en la comunidad académica que obstaculizan el avance de la mastozoología en Colombia y la necesidad de incrementar el conocimiento de los mamíferos en el país. Al editor y tres revisores anónimos que con sus comentarios contribuyeron significativamente al mejoramiento sustancial del manuscrito.

Conflicto de intereses

Declaro no tener conflictos de intereses con respecto al estudio.

Referencias

- Alberico, M., Cadena, A., Hernández-Camacho, J., Muñoz-Saba, Y.** (2000). Mamíferos (Synapsida: Theria) de Colombia. *Biota Colombiana*. **1**: 43-75.
- Alberico, M. & Rojas-Díaz, V.** (2002). Mamíferos de Colombia. En G. Ceballos, J. Simonetti (eds.), *Diversidad y conservación de mamíferos neotropicales* (pp. 185-226). Ciudad de México, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Instituto de Ecología. Universidad Autónoma de México.
- Arbeláez-Cortés, E.** (2013). Describiendo especies: un panorama de la biodiversidad colombiana en el ámbito mundial. *Acta biol. Colomb.* **18** (1): 165-178. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/36832>
- Armenteras, D., González, T. M., Vargas-Ríos, O., Meza-Elizalde, M. C., Oliveras, I.** (2020). Incendios en ecosistemas del norte de Suramérica: avances en la ecología del fuego tropical en Colombia, Ecuador y Perú. *Caldasia*. **42** (1): 1-16. Doi: 10.15446/caldasia.v42n1.77353
- Boron V., Deere, N. J., Xofis, P., Link, A., Quiñones-Guerrero, A., Payan, E., Tzanopoulos, J.** (2019). Richness, diversity, and factors influencing occupancy of mammal communities across human-modified landscapes in Colombia. *Biological Conservation*. **232**: 108-116. Doi: 10.1016/j.biocon.2019.01.030
- Bonvicino, C. R. & Weksler, M.** (2012). Speciation in Amazonia. Patterns and predictions of a network of hypotheses. En B. D. Patterson, L. P. Costa (Eds.), *Bones, Clones and Biomes. The history and Geography of recent Neotropical mammals* (pp. 259-282). Chicago. The University of Chicago Press.
- Burgin, C. J., Colella, J. P., Kahn, P. L., Upham, N. S.** (2018). How many species of mammals are there? *J. Mammal.* **99** (1): 1-11. Doi: 10.1093/jmammal/gyx147
- Ceballos, G. & Ehrlich, P. R.** (2009). Discoveries of new mammal species and their implications for conservation and ecosystem services. *PNAS*. **106** (10): 3841-3846. Doi: 10.1073/pnas.0812419106
- Cuatrecasas, J.** (2017). Aspectos de la vegetación natural de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **10** (suplemento): 221-264. Doi.org/10.18257/raccefyn.570
- Dalapicolla, J. & Percequillo, A. R.** (2020). Species concepts and taxonomic practice in the integrative taxonomy era: an example using South American rodents. *Boletim da Sociedade Brasileira de Mastozoologia*. **88**: 36-54.
- de Abreu-Jr, E.F., Pavan, S.E., Tsuchiya, M.T.N., Wilson, D. E., Percequillo, A. R., Maldonado J. E.** (2020). Museomics of tree squirrels: a dense taxon sampling of mitogenomes reveals hidden diversity, phenotypic convergence, and the need of a taxonomic overhaul. *BMC Evol Biol* **20**. **77**: 1-25. Doi: 10.1186/s12862-020-01639-y
- Feijó, A. & Cordeiro-Estrela, P.** (2016). Taxonomic revision of the *Dasyopus kappleri* complex, with revalidations of *Dasyopus pastasae* (Thomas, 1901) and *Dasyopus beniensis* Lönnberg, 1942 (Cingulata, Dasypodidae). *Zootaxa*. **4170** (2): 271-297. Doi: 10.11646/zootaxa.4170.2.3
- Ferrer, A., Beltrán, M., Lasso, C. A.** (2009). Mamíferos de la Estrella Fluvial de Inírida: ríos Inírida, Guaviare, Atabapo y Orinoco (Colombia). *Biota Colombiana*. **10** (1 y 2): 209-218.
- Ferrier, S., Manion, G., Elith, J., Richardson, K.** (2007). Using generalized dissimilarity modelling to analyse and predict patterns of beta diversity in regional biodiversity assessment. *Divers. Distrib.* **13** (3): 252-264. Doi: 10.1111/j.1472-4642.2007.00341.x
- Gómez-Sandoval, P. A., Mojica-Corzo, J. I., Mejía-Egas, O.** (2017). Trazabilidad de los registros de mamíferos en el marco del otorgamiento de licencias ambientales para proyectos de hidrocarburos en Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **41** (158): 51-58. Doi: 10.18257/raccefyn.439
- González, T.M., Moreno-Niño, N., Molina, E., Armenteras, D.** (2020). First confirmed record of the Guianan White-eared Opossum, *Didelphis imperfecta* Mondolfi & Pérez-Hernández, 1984 (Didelphimorphia, Didelphidae), from Colombia. *Check List*. **16** (5): 1119-1123. Doi: 10.15560/16.5.1119
- Gregory, T., Carrasco-Rueda, F., Deichmann, J., Kolowski, J., Alonso, A.** (2014). Arboreal camera trapping: taking a proven method to new heights. *Methods in Ecology and Evolution*. **5**: 443-451. Doi: 10.1111/2041-210X.12177
- Hernández-Camacho, J. I., Guerra, A. H., Quijano, R. O., Walschburger, T.** (1992). Unidades biogeográficas de Colombia. En G. Halffter (ed.), *La diversidad biológica de Iberoamérica I*, pp. 105-151. Xalapa, México: Volumen Especial, Acta Zoologica Mexicana, nueva serie. Instituto de Ecología, A.C.

- Hoffmann, C., García, J. R., Márquez, Krueger, T.** (2018). A local perspective on drivers and measures to slow deforestation in the Andean-Amazonian foothills of Colombia. *Land Use Policy*. **77**: 379-391. Doi: 10.1016/j.landusepol.2018.04.043
- López-Arévalo, H.A., Morales-Martínez D. M., Mora-Beltrán, C., Calderón-Capote, M. C., Cárdenas-González, C., Atuesta-Dimian, N., Melo, M. J., Ramírez, W.** (En prensa). Mamíferos (Mammalia) de San José del Guaviare, Colombia. *Biota Colombiana*.
- Lozano-Flórez, J. & Cifuentes-Acevedo, S.** (2020). First records of Peruvian Toro, *Toromys rhipidurus* Thomas, 1928 (Rodentia, Echimyidae), in Colombia. *Check List*. **16** (5): 1337-1341. Doi: 10.15560/16.5.1337
- Mantilla-Meluk, H., Mosquera-Guerra, F., Trujillo, F., Pérez, N., Velásquez-Valencia A., Vargas A.** (2017). Mamíferos del sector norte del Parque Nacional Natural Serranía de Chiribiquete. *Colombia Amazónica*. **10**: 21-55.
- Marín-Vásquez, A. & Aguilar-González, A. V.** (2005). Murciélagos (Chiroptera) del departamento de Caquetá-Colombia. *Biota Colombiana*. **6**: 211-218.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).** (2012). Política nacional para la gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos (PNGIBSE). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá DC.
- Miranda, F. R., Casali, D. M., Perini, F. A., Machado, F. A., Santos, F. R.** (2017). Taxonomic review of the genus *Cyclopes* Gray, 1821 (Xenarthra: Pilosa), with the revalidation and description of new species. *Zool. J. Linn. Soc.* **183** (3): 687-721. Doi: 10.1093/zoolinnea/zlx079
- Montenegro, O. L. & Romero-Ruíz, M.** (1999). Murciélagos del sector sur de la Serranía de Chiribiquete, Caquetá, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **23**: 641-649.
- Montenegro, O. L.** (2007). Mamíferos terrestres del sur de la Amazonia colombiana. En S. L. Ruiz, E. Sánchez, E. Tabares, A. Prieto, J. C. Arias, R. Gómez, D. Castellanos, P. García, L. Rodríguez (Eds), *Diversidad biológica y cultural del sur de la Amazonia colombiana – Diagnóstico* (pp. 134-141). Bogotá D. C., Colombia: Corpoamazonia, Instituto Humboldt, Instituto Sinchi, UAESPNN.
- Montenegro, O. L., López-Arévalo, H. F., Mora-Beltrán, C., Lizcano, D. J., Serrano, H., Mesa, E., Bonilla-Sánchez, A.** (2019). Tropical Ungulates of Colombia. En Gallina-Tessaro S. (ed.) *Ecology and Conservation of Tropical Ungulates in Latin America* (pp. 157-195). Cham, Suiza: Springer. Doi: 10.1007/978-3-030-28868-6_9
- Morales-Martínez, D. M., López-Arévalo, H. F., Montenegro, O. L.** (2020a). Los ensamblajes de murciélagos (Mammalia: Chiroptera) de la Serranía de la Lindosa son diversos y heterogéneos. *Acta Biológica Colombiana*. **25** (3): 322-332. Doi: 10.15446/abc.v25n3.78886
- Morales-Martínez, D. M., Ramírez-Chaves, H. E., Colmenares-Pinzón, J. E., Gómez, L. G.** (2020b). The Koepcke's spear-nosed bat, *Gardnerycteris koepckeae* (Gardner and Patton, 1972) (Chiroptera: Phyllostomidae), is not endemic to Peru: First record from the Amazon foothills of Colombia. *Mammalia*, **84** (5): 439-447. Doi: 10.1515/mammalia-2019-0107
- Morales-Martínez, D. M., Rodríguez-Posada, M. E., Acosta-Morales, S. D., Saldarriaga-Gómez, A. M.** (2021). First confirmed record of the LaVal's disk-winged Bat *Thyroptera lavalii* Pine, 1993 (Chiroptera, Thyropteridae) from Colombia. *Checklist*. **17** (2): 471-478. Doi: 10.15560/17.2.471
- Murcia, U. G., Rodríguez, C. H., Castro, W.** (2006). Zonificación ambiental (ecológica y económica) en la Amazonía colombiana. *Colombia Amazónica*. **1**: 119-133.
- Oliveira, F. & Feijó, A.** (2017). Taxonomic revision of The Tigrina *Leopardus tigrinus* (Schreber, 1775) species group (Carnivora, Felidae). *Pap. Avulsos Zool.* **57** (19): 231-264.
- Pacheco, V., Cadenillas, R., Salas, E., Tello, C., Zeballos H.** (2009). Diversidad y endemismo de los mamíferos del Perú. *Rev. peru. biol.* **16** (1): 005- 032.
- Pardo-Martínez, A. & O. J. Rangel-Churio.** (2014). Mamíferos de la Orinoquía colombiana. En: O. J., Rangel-Churio (ed.), *Colombia Diversidad Biótica XIV: La región de la Orinoquia de Colombia* (pp. 747-784). Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Paglia, A. P., Fonseca, G. A. B. da, Rylands, A. B., Herrmann, G., Aguiar, L. M. S., Chiarello, A. G., Leite, Y. L. R., Costa, L. P., Siciliano, S., Kierulff, M. C. M., Mendes, S. L., Tavares, V. da C., Mittermeier, R. A. & Patton J. L.** (2012). Lista Anotada dos Mamíferos do Brasil. Arlington, Estados Unidos de América: Conservation International.
- Patterson, B. D.** (2000). Patterns and trends in the discovery of new neotropical mammals. *Divers. Distrib.* **6**: 145-151. Doi: 10.1046/j.1472-4642.2000.00080.x
- Patterson, B. D., Pacheco, V. Solari, S.** (1996). Distributions of bats along an elevational gradient in the Andes of southeastern Peru. *Journal of Zoology*. **240**: 237-658.

- Patton, J.L. & Leite, L.N.** (2015). Genus *Proechimys* J.A. Allen, 1899. En: J. L. Patton, U. F. J. Pardiñas, G. D'Elia (eds.). *Mammals of South America, Volume 2. Rodents* (pp. 950-989). Chicago, USA: The University of Chicago Press. Doi: 10.7208/chicago/9780226169606.001.0001
- Pech-Canche, J. M., Estrella, E., López-Castillo, D. L., Hernández-Betancourt, S.F., Moreno, C. E.** (2011). Complementarity and efficiency of bat capture methods in a lowland tropical dry forest of Yucatán, Mexico. *Rev. Mex. Biodivers.* **82**: 896-903. Doi: 10.22201/ib.20078706e.2011.3.683
- Pineda-López, R.** (2019). Estimadores de la riqueza de especies. En C.E. Moreno (ed.). *La biodiversidad en un mundo cambiante: fundamentos teóricos y metodológicos para su estudio*. pp. 159-174. Ciudad de México, México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Libermex.
- Polanco-Ochoa, R., Jaimes, V., Piragua, W.** (1999). Los mamíferos del Parque Nacional Natural La Paya, Amazonía colombiana. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **23**: 671-682.
- Ramírez-Chaves, H. E. & Pérez, W. A.** (2010). Mamíferos (Mammalia: Theria) del departamento del Cauca, Colombia. *Biota Colombiana.* **11** (1 y 2): 141-171.
- Ramírez-Chaves, H. E., Noguera-Urbano, E. A., Rodríguez-Posada, M. E.** (2013). Mamíferos (Mammalia) del departamento de Putumayo, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **37** (143): 263-286.
- Ramírez-Chaves H. E. & Suárez-Castro A. F.** (2014). Adiciones y cambios a la lista de mamíferos de Colombia: 500 especies registradas para el territorio nacional. *Mammalogy Notes.* **1** (2): 31-34.
- Ramírez-Chaves, H. E., Suárez-Castro, A. F., González-Maya, J.F.** (2016). Cambios recientes a la lista de los mamíferos de Colombia. *Mammalogy Notes.* **3** (1): 1-21.
- Rangel-Churio, J. O., Lowy-C, P., Aguilar-P, M.** (1997). *Diversidad Biótica II. Tipos de Vegetación en Colombia*. pp. 436. Bogotá, D.C., Colombia: Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales, Instituto de hidrología, Meteorología y estudios Ambientales (IDEAM)- Ministerio del Medio Ambiente, Comité de Investigaciones y Desarrollo Científico-CINDEC.U.N, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Reeder, D. M., Helgen, K. H., Wilson, D.E.** (2007). Global trends and biases in new mammal species discoveries. *Occas. Pap. Tex. Tech Univ. Mus.* **269**: 1-35. Doi: 10.5962/bhl.title.156951
- Rodríguez-Mahecha, J. V., Alberico, M., Trujillo, F., Jorgenson, J.** (2006). Libro Rojo de los Mamíferos de Colombia. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá D. C., Colombia: Conservación Internacional Colombia, Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Rodríguez-Posada, M. E., Zurc, D., Cárdenas-González, C.** (2020). Colecciones mastozoológicas en Colombia. *Mammalogy Notes.* **6** (1): 0105. Doi: 10.47603/manovol6n1.mn0105
- Sánchez-Palomino, P., Rivas-Pava, P. Cadena A.** (1993). Composición, abundancia y riqueza de especies de la comunidad de murciélagos en bosques de galería en la Serranía de la Macarena (Meta - Colombia). *Caldasia.* **17**: 301-312.
- Sociedad Colombiana de Mastozoología - SCMas.** (2017). Lista de referencia de especies de mamíferos de Colombia. Versión 1.2. Conjunto de datos/Lista de especies. Doi: 10.15472/kl1whs
- Simmons, N. B. & Voss, R.S.** (1998). The mammals of Paracou, French Guiana: A neotropical Lowland Rainforest Fauna. Part 1. Bats. *Bull. Am. Mus. Nat. Hist.* **237**: 1-219.
- Solari, S., Muñoz-Saba, Y., Rodríguez-Mahecha, J. V., Defler, T. R., Ramírez-Chaves, H. E., Trujillo, F.** (2013). Riqueza, endemismo y conservación de los mamíferos de Colombia. *Mastozool. neotrop.* **20** (2): 301-365. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=45729294008>
- Tavares, V. D. C., Gardner, A. L., Ramírez-Chaves, H. E., Velazco, P. M.** (2014). Systematics of *Vampyressa melissa* Thomas, 1926 (Chiroptera: Phyllostomidae), with descriptions of two new species of *Vampyressa*. *American Museum Novitates.* **1926**: 1-26.
- Trujillo, F., Mosquera-Guerra, F., Diaz-Pulido, A., Carvajal-Castro, J. D., Mantilla-Meluk, H.** (2018). Mamíferos del Escudo Guayanés de Colombia. En C. A. Lasso, J. C. Señaris (Eds.), Volumen VI. Fauna Silvestre del Escudo Guayanés (Colombia-Venezuela). Serie Editorial Fauna Silvestre Neotropical (pp. 345-380). Bogotá, D. C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Velásquez-Tibatá, J.** (2019). WhereNext: A recommending system for biological surveys. Version 1.0.0. <https://rpubs.com/jivelasquezt/516782>
- Voss, R. S. & Emmons, L.H.** (1996). Mammalian diversity in neotropical lowland rainforest: A preliminary assessment. *Bats. Bull. Am. Mus. Nat. Hist.* **230**: 1-115.
- Voss R. S., Lunde, D. P., Simmons, N. B.** (2001). The mammals of Paracou, French Guiana: A neotropical Lowland Rainforest Fauna. Part 2. Nonvolant species. *Bats. Bull. Am. Mus. Nat. Hist.* **237**: 1-219.

Artículo original

Dos nuevas especies de *Macropsychanthus* (Leguminosae, Papilionoideae) de Colombia

Two new species of *Macropsychanthus* (Leguminosae, Papilionoideae) from Colombia

Andrés Fonseca-Cortés

Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

Resumen

Se describen e ilustran *Macropsychanthus emberarum* y *Macropsychanthus obscurus*, dos nuevas especies para la flora de Colombia, y se discuten sus relaciones morfológicas con las especies afines. *Macropsychanthus emberarum* se caracteriza por sus folíolos membranáceos, oblongos, con 12–14 pares de nervios secundarios, flores de 2,0–2,3 cm de longitud, estandartes de 1,4–1,5 × 1,4–1,5 cm, alas de 1,9–2,2 × 1,0–1,2 cm y quillas de 1,7–1,9 × 0,8–1,0 cm. *Macropsychanthus obscurus* presenta folíolos con 13–15 pares de nervios secundarios, quillas de ápices bicuspidados y legumbres comprimidas lateralmente. *Macropsychanthus emberarum* es una especie endémica del Pacífico y *Macropsychanthus obscurus* de las cordilleras Central y Occidental de los Andes colombianos. Se presenta una clave para determinar los subgéneros de *Macropsychanthus* y una para las especies de *Macropsychanthus* presentes en Colombia.

Palabras clave: Diocleae; Flora de Colombia; Leguminosas trepadoras.

Abstract

Macropsychanthus emberarum and *Macropsychanthus obscurus*, two new species from the Colombian flora are described, illustrated and their morphological relationships with related species are discussed. *Macropsychanthus emberarum* is characterized by its membranous, oblong leaflets, with 12–14 pairs of secondary nerves, flowers 2.0–2.3 cm long, standards 1.4–1.5 × 1.4–1.5 cm, wings 1.9–2.2 × 1.0–1.2 cm, and keels 1.7–1.9 × 0.8–1.0 cm. *Macropsychanthus obscurus* is characterized by its leaflets with 13–15 pairs of secondary nerves, bicuspidate apex keels, and laterally compressed pods. *Macropsychanthus emberarum* is endemic to the Colombian Pacific region and *Macropsychanthus obscurus* to the Central and Western Andes Cordilleras. Keys for the subgenera of *Macropsychanthus* and for the species of *Macropsychanthus* from Colombia are presented.

Keywords: Climbing legumes; Colombian flora; Diocleae.

Introducción

El gran grupo de las leguminosas posee cerca 1.200 especies en Colombia (Ruiz *et al.*, 2016), agrupadas en cinco subfamilias: Caesalpinioideae, Cercidoideae, Detarioideae, Dialioidae y Papilionoideae (Legume Phylogeny Working Group - LPWG, 2017). En la subfamilia Papilionoideae se encuentra la tribu Diocleae, representada en el país por los géneros *Betencourtia* A. St.-Hil, *Canavalia* DC., *Cratylia* Mart. ex Benth., *Cymbosema* Benth., *Dioclea* Kunth, *Galactia* P. Browne y *Macropsychanthus* Harms ex K. Schum. & Lauterb. A pesar de que se han hecho varios avances en la taxonomía de este grupo, con la descripción de cuatro nuevas especies de *Dioclea* (Maxwell, 2011), una nueva especie de *Canavalia* (Snak *et al.*, 2018) y la reciente inclusión de 13 de las especies de *Dioclea* en el género *Macropsychanthus* (Queiroz & Snak, 2020), en Colombia no se cuenta con revisiones de ninguno de estos géneros y frecuentemente los ejemplares de herbario están mal determinados.

Citación: Fonseca-Cortés A. Dos nuevas especies de *Macropsychanthus* (Leguminosae, Papilionoideae) de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):489-499, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1351>

Editor: Carolina Romero Hernández

***Correspondencia:**

Andrés Fonseca-Cortés;
deafonseca@unal.edu.co

Recibido: 27 de noviembre de 2020

Aceptado: 15 de marzo de 2021

Publicado: 17 de junio de 2021



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

Macropsychanthus era un género con cuatro especies restringido al sudeste asiático, pero hoy comprende 46 especies de distribución pantropical en virtud de que **Queiroz & Snak** (2020) demostraron que *Dioclea* es un género no monofilético. Los resultados de este estudio evidenciaron que las especies de *Dioclea* pertenecientes a los subgéneros *Pachylobium* (Benth.) R.H. Maxwell y *Platylobium* (Benth.) R.H. Maxwell, y las especies de los géneros *Luzonia* Elmer y *Macropsychanthus* representan un grupo polifilético, por lo cual estos taxones fueron transferidos a *Macropsychanthus* (**Queiroz & Snak**, 2020). *Macropsychanthus* se caracteriza por presentar hábito lianescente, estípulas triangulares o lanceolado-falcadas, medifijas o basifijas, inflorescencias pseudoracemosas, erectas, compuestas por braquiblastos con más de cuatro flores, estandartes bicallosos, con dos aurículas basales, frutos túrgidos o comprimidos lateralmente con semillas de más de 2 cm de longitud (**Queiroz & Snak**, 2020). Este género se divide en dos subgéneros, *Macropsychanthus* y *Platylobium* (**Queiroz & Snak**, 2020), el primero caracterizado por presentar estípulas mayores o iguales a 5 mm de longitud, lanceolado-falcadas, medifijas y frutos túrgidos o comprimidos lateralmente, casi tan anchos como largos (**Queiroz & Snak**, 2020). Por otro lado, el subgénero *Platylobium* se caracteriza por presentar estípulas de menos de 4 mm de longitud, triangulares o lanceoladas, basifijas y frutos comprimidos lateralmente, siempre más largos que anchos (**Queiroz & Snak**, 2020).

En Colombia, *Macropsychanthus* está representado por 16 especies, 14 pertenecientes al subgénero *Macropsychanthus* y dos al subgénero *Platylobium*, presentes en bordes de quebradas, ríos, playas, afloramientos rocosos, bordes de caminos y en el dosel del bosque (**Fonseca-Cortés**, 2020). En el presente estudio se describen e ilustran dos nuevas especies de *Macropsychanthus* como parte de los resultados de la revisión de este género para la flora de Colombia realizada por **Fonseca-Cortés** (2020).

Materiales y métodos

Para confirmar la identidad genérica de las especies, se consultó la literatura pertinente sobre *Macropsychanthus* y sus géneros afines, se revisaron las colecciones de los herbarios COL, COAH, HUAZ y UDBC presencialmente y de los herbarios BM, EA, F, FMB, G, HUEFS, HUH, IAN, JBB, JEF, K, LLANOS, MA, MG, NL, NY, P, RB, S, TOLI, U, UNIP y WAG en línea. El concepto de especie empleado fue el morfológico (**Crisci**, 1994; **McDade**, 1995). La terminología usada en las descripciones se basó en **Beentje** (2010), para la elaboración de los mapas se empleó la plantilla disponible en **Shorthouse** (2010) y para determinar el estado de conservación de las especies según las categorías y criterios de la **International Union for Conservation of Nature - IUCN** (2019), se calculó la extensión de la presencia (EOO) y el área de ocupación (AOO) utilizando el paquete R red (**Cardoso**, 2017).

Resultados y discusión

Macropsychanthus emberarum Fonseca-Cortés, sp. nov. (Figuras 1, 2)

Macropsychanthus emberarum is morphologically similar to *Macropsychanthus malacocarpus* (Ducke) L.P. Queiroz & Snak and *Macropsychanthus pulchrus* (Moldenke) L.P. Queiroz & Snak, from which it differs by having oblong leaflets, 12–14 pairs of secondary nerves, apex mucronate; flowers 2.0–2.3 cm long, standard 1.4–1.5 × 1.4–1.5 cm, wings 1.9–2.2 × 1–1.2 cm, keels lobulated, 1.7–1.9 × 0.8–1.0 cm, fruits fulvous and seeds with the hilum covering 1/3 of the seeds.

Tipo: Colombia: **Valle del Cauca**, río Calima, entre Herradura de Ordóñez y Peña de Campotraste, 5–10 m, 3 mar 1944, *J. Cuatrecasas 16682* (holotipo: COL–77344; isotipos: COL–77345, P, US)

Lianas con exudado rojizo en los tallos maduros. Tallos teretes a angulosos, huecos, glabros a pubérulos, fulvo-canescientes, estriados y con lenticelas elípticas a redondeadas. Estípulas 0,7–0,8 × 0,2–0,3 cm, medifijas, lóbulo superior e inferior lanceolado-falcados, pilosas, fulvas. Hojas dísticas o polísticas; **folíolos** membranáceos, elípticos, bases

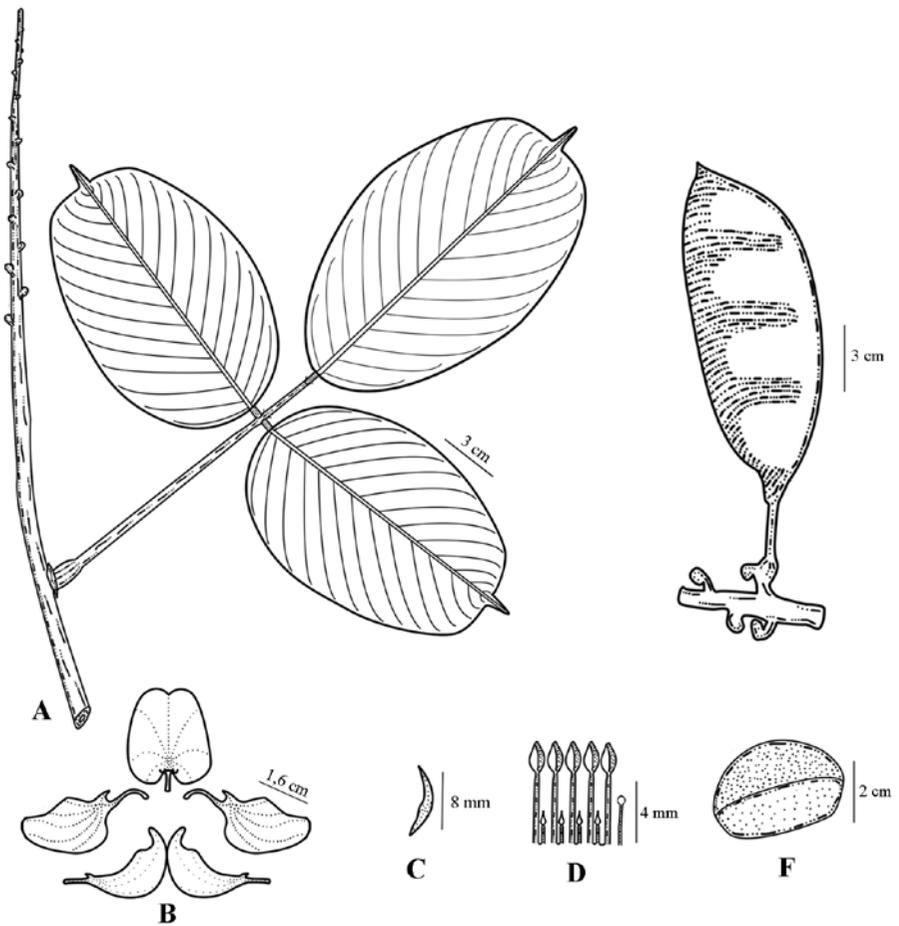


Figura 1. *Macropsychanthus emberarum* Fonseca-Cortés. **A:** Hábito. **B:** Pétalos. **C:** Estípula. **D:** Estambres (*J. Cuatrecasas 16682*, COL). **E:** Legumbre. **F:** Semilla (*J. Cuatrecasas 17649*, US). Ilustró Andrés Fonseca-Cortés.

redondo-truncadas, ápices 0,6–1,5 cm, mucronados, con 12–14 pares de nervios secundarios; haz glabra a pilosa en la lámina, sericea fulvosa en los nervios principales; envés sericeo fulvoso en los nervios principales; folíolo terminal 12,0–13,5 × 7,7–9,0 cm; folíolos laterales 11,0–12,5 × 6,5–7,7 cm; peciolo 9,0–13,7 cm long., aristado, base pulvinulada; raquis 2,4–3,5 cm long., aristado; estipelas 0,4–0,5 cm long., linear-triangules; peciólulo 0,7–0,8 cm long., cilíndrico. Inflorescencia 27–33 cm axilar o terminal, pseudoracemosa, recta, sericea, fulvosa; pedúnculo de la inflorescencia 5–16 cm; braquiblastos 0,4–0,5 cm, incurvados, subsésiles, separados entre sí por 0,2–1,4 cm; brácteas y bractéolas sericeas fulvas; bráctea 0,5–0,6 × 0,1–0,2 cm, linear-lanceolada; bractéola primaria 0,2–0,3 × 0,1–0,2 cm, ovada; bractéola secundaria 0,2–0,3 × 0,2–0,3 cm, ovada. **Flores** 2,0–2,3 cm long.; pedicelos de 0,5–0,8 cm; cáliz 1,1–1,3 × 0,5–0,6 cm, campanulado, sericeo, fulvoso en la cara exterior y velutino, fulvoso en el interior; sépalo dorsal 0,4–0,5 × 0,5–0,6 cm, redondeado; sépalos laterales 0,5–0,6 × 0,3–0,4 cm, lanceolados-falcados; sépalo inferior 0,7–0,8 × 0,3–0,4 cm, triangular-lanceolado; **pétalos** glabros, lila; estandarte 1,4–1,5 × 1,4–1,5 cm, ovado, bicaroso, con dos aurículas basales; conectivo de 0,4–0,5 cm; alas 1,9–2,2 × 1,0–1,2 cm, con un espolón en la base, lóbulo inferior redondeado y ápice levemente agudo redondeado; conectivo de 0,4–0,5 cm; quilla 1,7–1,9 × 0,8–1,0, semilunar, con un lóbulo distal uncinado; conectivo de 0,4–0,5 cm con un espolón en la base; estambres 1,8–2,1 cm long., diez, pseudomonadelfos, de los cuales cinco son estaminodios, ovario ovoide, con tres a cinco óvulos, cubierto con indumento velutino canescente, con un disco nectarífero rodeándolo;

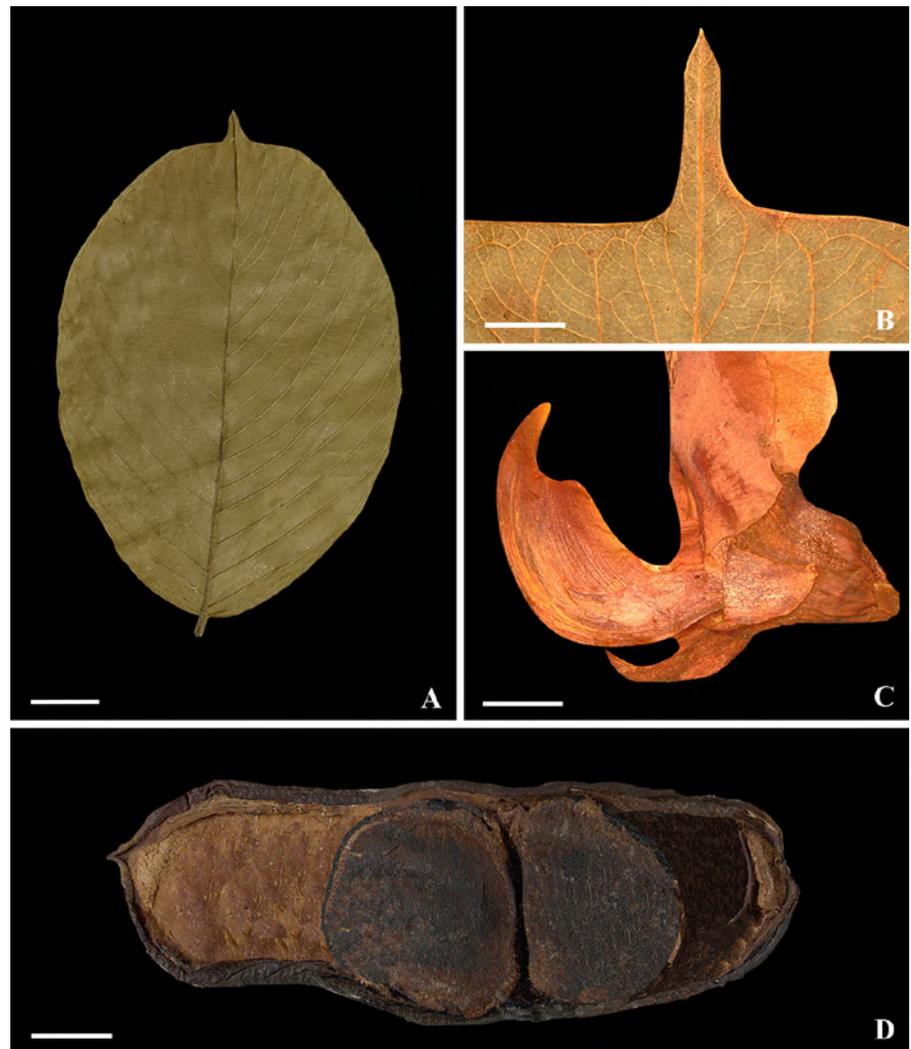


Figura 2. *Macropsyчанthus emberarum* Fonseca-Cortés. **A:** Foliolo terminal. **B:** Ápice del foliolo. **C:** Quilla. **D:** Fruto y semilla (A-E: *J. Cuatrecasas 16682*, COL., A-C: Fotografíó Andrés Fonseca-Cortés, D: Cortesía del Instituto Smithsonian. Escalas: A, D: 2 cm. B-C: 5 mm.

estilo 1,8–1,9 cm, linear, del cual los tres cuartos basales están cubiertos por indumento velutino canescente. **Legumbre** 9–14 × 4,0–5,5 × 3,0–3,4 cm, levemente comprimida, indumento fulvoso caduco, 3–4 seminada; **semillas** 3,5–4,0 × 3,5–4,5 × 1,7–1,8 cm, ovoides, marrón, hilo envolviendo 1/3 de la semilla.

Etimología. El epíteto específico de esta especie conmemora a la comunidad indígena Embera, la cual ha habitado desde tiempos inmemoriales la región donde crece esta especie.

Distribución y hábitat. *Macropsyчанthus emberarum* es una especie endémica del Pacífico colombiano, presente en los departamentos de Chocó y Valle del Cauca, al borde de bosques y de los ríos Andágueda, Atrato, Baudó, Cajambre, Neguá, San Juan, Tamaaná y Yuto, entre 0–100 m s.n.m.

Estado de conservación. El EOO obtuvo un área de 9.604 km² y el AOO de 36 km². *M. emberarum* cumple con los requisitos del criterio B2 para especies amenazadas (AOO <500 km²). Sin embargo, la mayoría de las recolecciones se hicieron en el siglo pasado y no se han hecho nuevos registros debido al conflicto armado en las zonas donde habita la especie. Por lo tanto, no se conoce el estado actual de las poblaciones y, en consecuencia, se le asigna la categoría de "Datos insuficientes" (DD).

Tabla 1. Diferencias entre *Macropsychanthus emberarum* Fonseca-Cortés *Macropsychanthus malacocarpus* (Ducke) L.P. Queiroz & Snak y *Macropsychanthus pulchrus* (Moldenke) L.P. Queiroz & Snak

Caracteres	<i>Macropsychanthus emberarum</i>	<i>Macropsychanthus malacocarpus</i>	<i>Macropsychanthus pulchrus</i>
Pares de nervios secundarios	12–14	11–12	11–12
Longitud de las flores (cm)	2,0–2,3	1,6–1,8	1,3–1,6
Longitud del estandarte (cm)	1,4–1,5	1,0–1,4	1,2–1,3
Ancho del estandarte (cm)	1,4–1,5	1,0–1,4	1,0–1,2
Longitud de las alas (cm)	1,9–2,2	1,4–1,8	1,3–1,6
Ancho de las alas (cm)	1,0–1,2	0,7–1,0	0,8–0,9
Longitud de la quilla (cm)	1,7–1,9	1,1–1,5	1,1–1,2
Ápice de la quilla	Lobulada	Lobulada	Bilobulada
Indumento del fruto	Fulvoso	Fusco	Fulvoso

Comentarios. En 1944, E.P. Killip asignó el nombre inédito de *Dioclea cuspidata* Killip al exsiccatum del tipo de *M. emberarum* aquí designado. Posteriormente, **Bursatin, et al.** (1983) publicaron este nombre en un inventario para las especies presentes en la reserva Yotoco, Buenaventura, Valle del Cauca, Colombia, sin agregar la diagnosis ni designar un tipo. Por lo tanto, este nombre representa un *nomen nudum*.

Macropsychanthus emberarum está relacionada con *M. malacocarpus* y *M. pulchrus* pero se diferencia de estas dos especies por los caracteres mencionados en la **tabla 1**.

Paratipos. Chocó: 50 kilometers south of Quibdó, at the junction of Rivers Atrato and Andágueda, 11–20 may 1931, *W.A. Archer 2043* (US); km 226 del camino de Quibdó a Munquirrí, al borde del bosque 80 m, 30 mar 1958, *J. Cuatrecasas, M. Llano 24041* (MA, US); río Neguá, tributary of río Atrato below Quibdó, 3 abr 1958, 3 abr 1958, *J. Cuatrecasas, M. Llano 24182* (US); Hoya del río San Juan, Alrededores de Palestina, 23 mar 1979, *E. Forero, et al.3850* (COL); Hoya del río San Juan, río Tamaná, afluente del San Juan entre Primavera y Santarosa, 10 abr 1979, *E. Forero 4900* (COL); a lo largo del río Baudó, 15 km desde Pizarro a la Porquera, al lado derecho, 800 m, 11 feb 1967, *H.P. Fuchs, et al. 21711* (COL, F, U, US); río Yuto, entre Lloró y La Vuelta 100 m, 18 ene 1979, *A. Gentry y E. Rentería 24350* (COL, MO); Valle del Cauca: costa del Pacífico, río Cajambre, Silva, 5–80 m, 5–15 may 1944, *J. Cuatrecasas 17649* (US); Buenaventura, Nuevo Pitalito, predios de la Comunidad de Wounaan, orillas del bajo río San Juan, 20 m, 19 sep 2017, *B. Morales 157* (TOLI).

***Macropsychanthus obscurus* Fonseca-Cortés, sp. nov. (Figuras 3, 4).**

Macropsychanthus obscurus is related to *Macropsychanthus mollicomus* (Ducke) L.P. Queiroz & Snak, from which it differs by its papyraceous leaflets, fulvous puberulous on lower surface, inflorescences fuscous, erect bracts 0,5–0,6 × 0,1–0,2 cm, primary bracteoles 0,1–0,2 × 0,1–0,2, secondary bracteoles 0,2–0,3 × 0,2–0,3 cm, flowers with orbicular standards, semilunar bicuspidated keels, fruits laterally compressed, smooth and pedicels joined in the middle.

Tipo: Colombia: **Risaralda**, Santa Rosa del Cabal, Hacienda La Gaviota, cordillera Central, vertiente occidental, 1980 m, 22 sep 1980, *J.M. Idrobo 9943* (holotipo: FAUC, isotipo: COL).

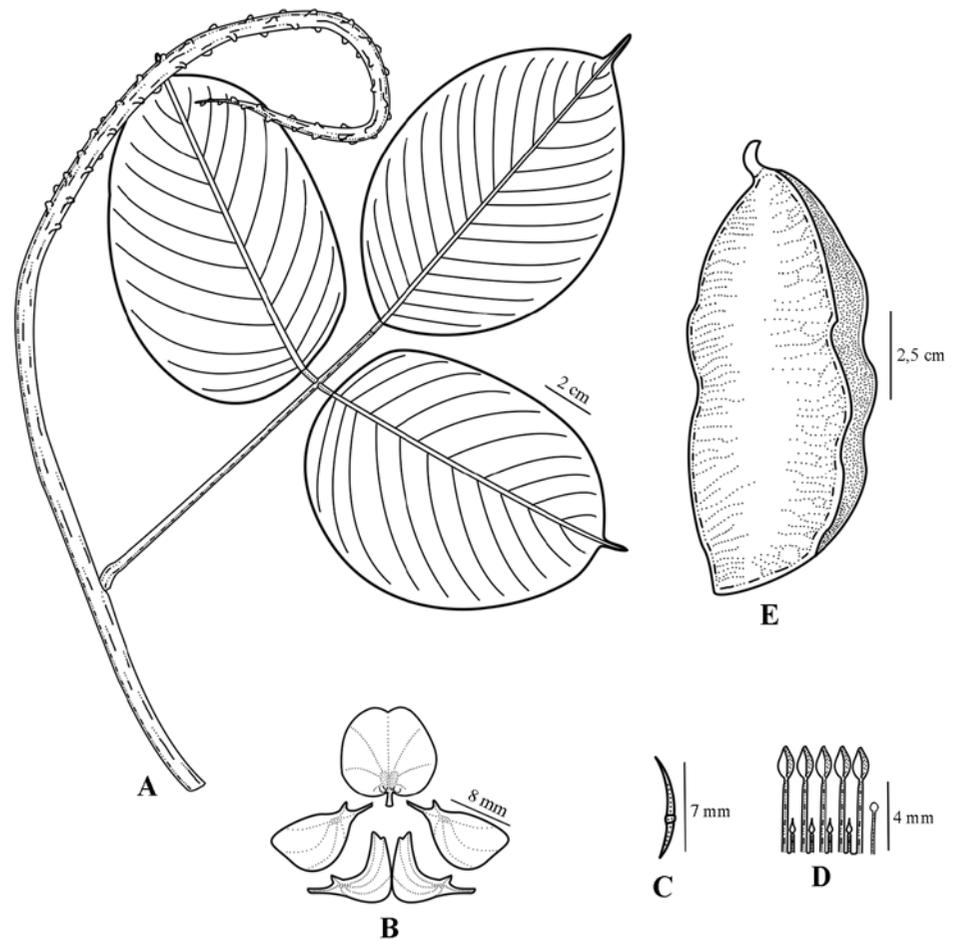


Figura 3. *Macropsychanthus obscurus* Fonseca-Cortés. **A:** Hábito. **B:** Pétalos. **C:** Estípula. **D:** Estambres (J.M. Idrobo 9943, COL). **E:** Fruto (Hno Daniel y Hno Tomás 2457, US). Ilustró Andrés Fonseca-Cortés.

Lianas de hasta 25 m con exudado rojizo. Tallos teretes a angulosos, huecos, glabros a pubérulos, fulvosos, estriados y con lenticelas elípticas a redondeadas. Estípulas 0,7–0,8 × 0,2–0,3 cm, medifijas, lóbulo superior e inferior falcado-lanceolados, pilosas, fulvasas. Hojas dísticas o polísticas; **folíolos** papiráceos a coriáceos, lisos, elípticos, bases redondeadas, ápices 0,6–1,2 cm, acuminados; con 13–15 pares de nervios secundarios; haz glabra en la lámina, seríceo fulvosa en los nervios principales; envés piloso fulvoso en la lámina, seríceo fulvoso en los nervios principales; folíolo terminal 12,0–13,5 × 9,0–9,5 cm; folíolos laterales 11–12 × 8,6–9,0 cm; peciolo, raquis y peciólulos pubérulos a pilosos-hirsutos, fulvosos; peciolo 9–10 cm long.; raquis 2,5–3,5 cm long.; estípelas 0,5–0,6 cm, lineares, seríceas, fulvasas; peciólulo 0,7–0,8 cm, pulvinulado; inflorescencia 23–35 cm, axilar o terminal, pseudoracemosa, recta, seríceo, fusca; pedúnculo de la inflorescencia 8–14 cm; braquiblastos 0,4–0,5 cm, incurvados, subsésiles, separados entre sí por 0,2–1,4 cm; brácteas y bractéolas, pubérulas a seríceas; bráctea 0,5–0,6 × 0,1–0,2 cm, linear-lanceolada; bractéola primaria 0,1–0,2 × 0,1–0,2 cm, ovada; bractéola secundaria 0,2–0,3 × 0,2–0,3 cm, ovada. Flores 1,4–1,6 cm long.; pedicelos de 0,5–0,6 cm, seríceos; cáliz 0,7–0,9 × 0,4–0,5 cm, campanulado, seríceo, fusco en la cara exterior y velutino, fusco-fulvoso en el interior; sépalo dorsal 0,3–0,5 × 0,4–0,6 cm, redondeado; sépalos laterales 0,3–0,5 × 0,3–0,5 cm, lanceolados-falcados; sépalo inferior 0,6–0,7 × 0,2–0,3 cm, triangular-lanceolado; pétalos glabros, morados; estandarte 1,2–1,3 × 1,1–

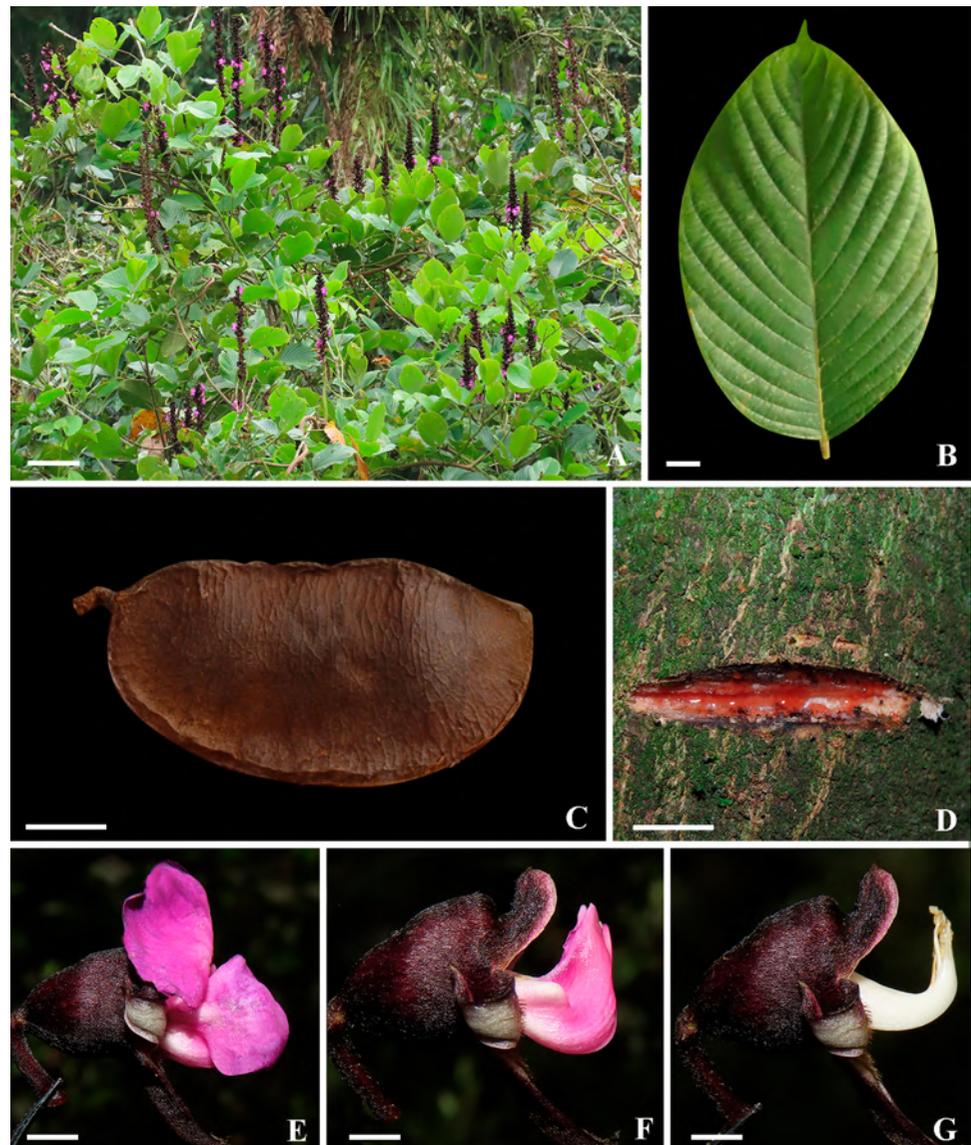


Figura 4. *Macropsychanthus obscurus* Fonseca-Cortés. **A:** Hábito. **B:** Foliolo terminal. **C:** Fruto. **D:** Exudado. **E:** flor en vista lateral. **F:** Quilla. **G:** Estambres. (A, B, D, E, F, G: cortesía de Dayro Rodríguez-Duque, *Dayro Rodríguez-Duque 722*, HUQ, FAUC y CUS-P. C: *C.A. Agudelo et al., 1058*, COL, fotografía Andrés Fonseca-Cortés). Escalas: A: 10 cm. B: 1 cm. C-D: 2 cm. E-G: 3 mm.

1,2 cm, redondeado, bicalloso, con dos aurículas basales, levemente emarginado en el ápice; conectivo de 0,2–0,3 cm; alas 1,3–1,5 × 0,6–0,8 cm, lóbulo inferior redondeado y ápice levemente agudo redondeado; conectivo de 0,4–0,5 cm, con un espolón en la base; **quilla** 0,7–0,9 × 0,8–0,9 cm, semilunar, ápice bicuspidado; conectivo de 0,3–0,5 cm, base del conectivo con un leve espolón acuminado; estambres 1,0–1,4 cm long., diez, pseudomonadelfos, de los cuales cinco son estaminodios; ovario ovoide, con tres a cinco óvulos, cubierto con indumento velutino canescente, con un disco nectarífero rodeándolo; estilo 1,4–1,5 cm, linear, del cual los tres cuartos basales están cubiertos por indumento velutino canescente. **Legumbre** 11–12 × 5,2–5,8 × 0,7–0,9 cm, comprimida lateralmente, pubérula fulvosa, 2–4 seminada; semillas desconocidas.

Etimología. El epíteto específico hace referencia al indumento fusco de las inflorescencias de esta especie.

Distribución y hábitat. *Macropsychanthus obscurus* es endémica de la cordillera Central y Occidental, está presente en los departamentos de Antioquia, Quindío y Risaralda, y crece entre los 1.600–2.000 m s.n.m., en los bordes de los caminos y las quebradas.

Paratipos. Antioquia: Jericó, 1970 m, dic 1940, *Hno Daniel y Hno Tomás 2457* (COL, US); Quindío: Circasia, vereda Barcelona Alta, Finca Buenos Aires, 1690 m, 23 mar 1991, *C.A. Agudelo, et al., 1058* (COL); Armenia, estación Águilas, 1600 m, 20 sep 1997, *W.G. Vargas 4051* (COL).

Comentarios. Esta especie se relaciona con *Macropsychanthus mollicomus* (Ducke) L.P. Queiroz & Snak, pero se diferencia de esta por los caracteres citados en la **tabla 2**.

Estado de conservación. *Macropsychanthus obscurus* es una liana de dosel raramente recolectada, por lo cual solo se conoce de cuatro localidades, tres en la cordillera Occidental y una en la cordillera Central. En este sentido, se le asigna la categoría de "Datos insuficientes" (DD) (IUCN, 2019).

Según la nueva circunscripción de *Macropsychanthus* (Queiroz & Snak, 2020), *M. obscurus* y *M. emberarum* pertenecen a este género y al subgénero *Macropsychanthus* por presentar hábito lianescente, estípulas falcadas, medifijas, folíolos con más de diez pares de nervios secundarios, ráquises mayores a 1 cm de longitud y flores de quillas de menor longitud que las alas.

Hasta la fecha, *M. obscurus* y *M. emberarum* se consideran endémicas de Colombia. *Macropsychanthus obscurus* se encuentra en las cordilleras Central y Occidental (**Figura 5**) en simpatria con *M. aureus* (R.H. Maxwell) L.P. Queiroz & Snak, la cual presenta folíolos coriáceos, rugosos, con 12–14 pares de nervios secundarios, inflorescencias fulvosas, quillas bilobuladas y legumbres túrgidas. *Macropsychanthus emberarum* está presente en el Pacífico colombiano y se encuentra en simpatria con *M. comosus* (G. Mey.) L.P. Queiroz & Snak y *M. wilsonii* (Standl.) L.P. Queiroz & Snak; ambas especies presentan amplia distribución en el trópico y presentan folíolos coriáceos, obovados con 7–8 pares de nervios secundarios (Fonseca-Cortés, 2020).

Tabla 2. Diferencias entre *Macropsychanthus obscurus* Fonseca-Cortés y *Macropsychanthus mollicomus* (Ducke) L.P. Queiroz & Snak

Caracteres	<i>Macropsychanthus obscurus</i>	<i>Macropsychanthus mollicomus</i>
Estípula	Lanceolado-falcada	Ampliamente lanceolado-falcada
Textura de los folíolos	Papirácea	Membranácea
Indumento en el envés de los folíolos	Pubérulo fulvoso	Seríceo fulvo-canesciente
Indumento de las inflorescencias	Fusco	Fulvoso
Longitud de la bráctea (cm)	0,5–0,6 × 0,1–0,2	0,9–1,0 × 0,3–0,4
Longitud de la bractéola primaria (cm)	0,1–0,2 × 0,1–0,2	0,3–0,4 × 0,1–0,2
Longitud de la bractéola secundaria (cm)	0,2–0,3 × 0,2–0,3	0,3–0,4 × 0,2–0,3
Ápice de la quilla	Uncinado y bicuspidado	Truncado prolongándose hacia la parte distal

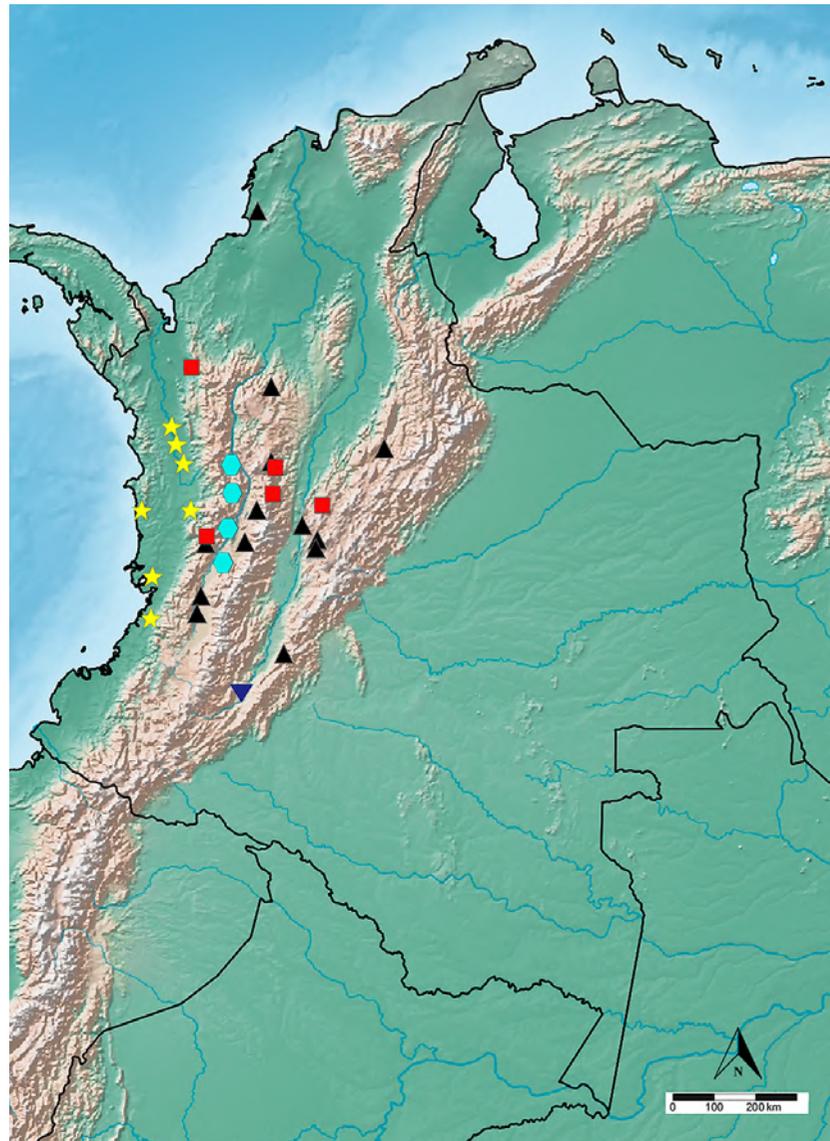


Figura 5. Distribución geográfica de *Macropsychanthus emberarum* Fonseca-Cortés, *Macropsychanthus obscurus* Fonseca-Cortés y sus especies afines. **Triángulos negros:** *M. aureus*. **Estrellas amarillas:** *M. emberarum*. **Triángulo azul invertido:** *M. mollicomus*. **Hexágonos cian:** *M. obscurus*. **Cuadros rojos:** *M. pulchrus*. Realizó Andrés Fonseca-Cortés.

Clave para los subgéneros de *Macropsychanthus*

- 1 Plantas con estípulas caducas o persistentes, basifijas, triangulares o lanceoladas, folíolos con menos de nueve pares de nervios secundarios..... subg. *Platylobium*
- 1' Plantas con estípulas persistentes, medifijas, triangular-falcadas, lanceolado-falcadas o peltadas, folíolos con más de nueve pares de nervios secundarios (excepto *M. comosus* y *M. wilsonii* con siete u ocho)..... subg. *Macropsychanthus*

Clave para las especies del subgénero *Macropsychanthus* presentes en Colombia

- 1. Folíolos con siete u ocho pares de nervios secundarios; legumbres comprimidas lateralmente..... 2
- 1'. Folíolos con más de ocho pares de nervios secundarios; legumbres túrgidas o comprimidas lateralmente..... 3

2. Estipelas de 0,9–1,5 cm; brácteas reflexas; frutos con pedicelos insertados en la parte media..... *M. comosus*
- 2'. Estipelas de 0,6–0,9 cm, brácteas erectas; frutos de pedicelos insertados en la sutura dorsal..... *M. wilsonii*
3. Folíolos membranáceos con 13–15 pares de nervios secundarios; envés seríceo, brácteas reflexas; bractéolas primarias y bractéolas secundarias mayores de 3 mm de longitud; legumbres comprimidas lateralmente, con dos semillas..... *M. mollicomus*
- 3'. Folíolos membranáceos, papiráceos o coriáceos, con 9–15 pares de nervios secundarios, envés pubérulo a seríceo, fulvoso, brácteas erectas, bractéolas primarias y secundarias menores a 3 mm de longitud; legumbres túrgidas o comprimidas lateralmente, con más de dos semillas..... 4
4. Plantas presentes en los Andes, los valles interandinos, el Pacífico o el Caribe..... 5
- 4'. Plantas presentes en el Piedemonte Llanero, la serranía de La Macarena, la Orinoquía o la Amazonia..... 9
5. Folíolos terminales obovados, los laterales con las bases cordadas, fuertemente asimétricas; con ocho a diez pares de nervios secundarios, legumbres con constricciones entre las semillas..... *M. violaceus*
- 5'. Folíolos terminales elípticos, los laterales de bases redondeadas o truncadas, levemente asimétricas, con más de diez pares de nervios secundarios, legumbres oblongas... 6
6. Folíolos membranáceos, oblongos; flores mayores a 1,9 cm de longitud
..... *M. emberarum*
- 6'. Folíolos papiráceos a coriáceos, elípticos; flores menores a 1,9 cm de longitud... 7
7. Folíolos con 13–15 pares de nervios secundarios, inflorescencias de indumento fusco, quillas bicuspidadas, legumbres comprimidas lateralmente..... *M. obscurus*
- 7'. Folíolos con 11–14 pares de nervios secundarios; inflorescencias de indumento fulvoso; quillas bilobuladas, legumbres túrgidas..... 8
8. Folíolos coriáceos, rugosos, con 12–14 pares de nervios secundarios..... *M. aureus*
- 8'. Folíolos papiráceos, lisos, con 11–12 pares de nervios secundarios..... *M. pulchrus*
9. Folíolos elípticos, ovado-lanceolados u obovados; ápice de la quilla bilobulado, acuminado o proyectándose hacia la parte distal (plantas presentes en la Amazonia)..... 10
- 9'. Folíolos elípticos u ovados; ápice de la quilla uncinado (plantas presentes en el piedemonte llanero, la Orinoquia o la Sierra de la Macarena)..... 12
10. Estípulas lanceoladas; hojas discoloras, haz marrón, envés nítido seríceo-argénteo o pubérulo canescente; legumbres comprimidas lateralmente; semillas comprimidas lateralmente, hilo envolviendo la ½ de la semilla..... *M. huberi*
- 10'. Estípulas falcadas; hojas concoloras, envés pubérulo fulvoso; legumbres túrgidas; semillas de hilo envolviendo 1/3 de la semilla..... 11
11. Folíolos de máximo 8,5 cm de ancho, rugosos en la haz, ápice de la quilla bilobulado..... *M. dictyoneurus*
- 11'. Folíolos mayores a 9 cm de ancho, lisos en la haz, ápice de la quilla uncinado o proyectándose hacia la parte distal..... 12
12. Flores lilas de 1,5–1,8 cm de longitud, ápice de la quilla fuertemente uncinado
..... *M. malacocarpus*
- 12'. Flores de estandarte lila o rosado y alas y quilla blancas de 1,8–2,3 cm de longitud, ápice de la quilla proyectándose hacia la parte distal..... *M. ucayalinus*
13. Plantas de inflorescencias retorcidas sobre su propio eje, flores mayores a 2 cm de longitud..... *M. circinatus*
- 13'. Plantas de inflorescencias rectas, flores menores a 1,5 cm de longitud
..... *M. haughtii*

Clave para las especies del subgénero *Platylobium* en Colombia

1. Folíolos con siete a nueve pares de nervios secundarios; inflorescencias axilares, pétalos pubérulos, cinco estambres fértiles y cinco estaminodios; legumbres obovadas
..... *M. hispidimarginatus*

1'. Folíolos con cinco o seis pares de nervios secundarios; inflorescencias caulifloras, pétalos glabros, todos los estambres fértiles; legumbres oblongas *M. macrocarpus*

Agradecimientos

El autor agradece a Diego Giraldo-Cañas (COL) y a Gerardo Aymard-Corredor (PORT) por las correcciones al manuscrito inicial; a los curadores de los herbarios COL, COAH, HUAZ y UDBC por permitir estudiar sus colecciones y a los curadores de los herbarios BM, COAH, EA, F, FAUC, FMB, G, HUAZ, HUEFS, HUH, IAN, JBB, JEF, K, LLANOS, MA, MG, NL, NY, P, RB, S, TOLI, U, UDBC, UNIP y WAG, por acceder a fotografiar y poner en línea sus colecciones. A Dayro Rodríguez-Duque y a Ingrid P. Lin del U.S. National Herbarium (US), Smithsonian Institution por permitirme usar sus fotografías.

Conflicto de intereses

El autor declara que no tiene conflicto de intereses.

Referencias

- Beentje, K.** (2010). The Kew Plant Glossary. Kew, Inglaterra: Royal Botanic Gardens. 200 p.
- Bursatin, P., Bayona, M.L., González, M.T., Tobón, F., Escobar E.** (1983). Estudio morfológico y estructural de 16 especies arbóreas líderes y algunas plantas trepadoras en la reserva forestal Yotoco-Valle. *Acta Agron.* **33**: 5-14.
- Cardoso, P.** (2017). Red an R Package to facilitate species Red List assessments according to the IUCN criteria. *Biodiversity Data Journal.* **5**: e20530. Doi: 10.3897/BDJ.5.e20530
- Crisci, J.** (1994). La especie: realidad y conceptos. En: J. Llorente J. Boisquets e I. Luna (Eds.), *Taxonomía biológica*. México D.F., México: Universidad Autónoma de México-Fondo de Cultura Económica. p. 21-32.
- Fonseca-Cortés, A.** (2020). Revisión del género *Dioclea* Kunth (Leguminosae: Papilionoideae: Diocleae) en Colombia (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. p. 7-30.
- International Union for Conservation of Nature - IUCN.** (2019). Guidelines for using the IUCN Red List Categories and Criteria. Version 14. Prepared by the Standards and Petitions Subcommittee. Fecha de consulta: 25 de octubre de 2020. Disponible en: <http://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>
- LPWG.** (2017). A new subfamily classification of the Leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny. *Taxon.* **66**: 44-77. Doi: 10.12705/661
- Maxwell, R.H.** (2011). New species and notes in the genus *Dioclea* s.l. (Fabaceae, subtribe Diocleinae). *Novon.* **21**: 226-243. Doi: 10.2307/23018473
- McDade, L.A.** (1995). Species concepts and problems in practice: insight from botanical monographs. *Syst. Bot.* **20**: 606-622.
- Queiroz, L.P. & Snak C.** (2020). Revisiting the taxonomy of *Dioclea* and related genera (Leguminosae, Papilionoideae), with new generic circumscriptions. *PhytoKeys.* **164**: 67-114. Doi: 10.3897/phytokeys.164.55441
- Ruiz, L.K., Gradstein, S.R., Bernal, R.** (2016). *Dioclea*. En: R. Bernal, S.R. Gradstein, M. Celis (Eds.), *Catálogo de plantas y líquenes de Colombia*. Colombia (pp. 1275-1276). Bogotá, Colombia: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Snak, C., Aymard G. A., Queiroz, L. P.** (2018). A new species of *Canavalia* (Leguminosae, Papilionoideae) subgenus *Wenderothia* from the Colombian and Venezuelan Llanos. *Brittonia.* **70** (2): 233-240. Doi:10.1007/s12228-017-9512-2
- Shorthouse, D.P.** (2010). SimpleMappr, an online tool to produce publication-quality point maps. 25 de octubre de 2020. Disponible en: <https://www.simplemappr.net>

Artículo original

Nuevos registros de Pucciniaceae (Pucciniales, Fungi) para Colombia

New Records of Pucciniaceae (Pucciniales, Fungi) for Colombia

✉ Carolina Zea-Fernández^{1,*}, ✉ María Camila Gutiérrez-Castaño¹,
✉ Mauricio Salazar-Yepes²

¹ Ingeniería Biológica, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Medellín, Colombia

² Núcleo El Volador, Museo Micológico-MMUNM, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

Resumen

El objetivo del estudio es presentar y confirmar nuevos registros de Pucciniaceae provenientes de diferentes regiones de Colombia en las familias botánicas Amaranthaceae, Asteraceae, Lamiaceae, Loranthaceae y Poaceae, depositadas en el Museo Micológico de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Se destacan seis nuevos registros: *Puccinia esclavensis* var. *esclavensis*, *Puccinia humahuacensis*, *Puccinia improcera*, *Puccinia porphyretica*, *Puccinia viatica* y *Uromyces socius* y tres nuevos géneros de hospedantes parasitados por royas en el país. Estos resultados permiten ampliar el conocimiento de la diversidad de royas en Colombia y obtener información de la distribución geográfica de las especies.

Palabras clave: Biota; Fitopatógenos; Puccinia; Uredinales; Uromyces.

Abstract

We present here new records and first confirmation of Pucciniaceae species from different regions of Colombia belonging to the botanical families Amaranthaceae, Asteraceae, Lamiaceae, Loranthaceae and Poaceae deposited in the *Museo Micológico* at *Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín* (MMUNM). Six new records for the Pucciniales biota are highlighted: *Puccinia esclavensis* var. *esclavensis*, *Puccinia humahuacensis*, *Puccinia improcera*, *Puccinia porphyretica*, *Puccinia viatica*, and *Uromyces socius*, as well as three new genera of hosts parasitized by the rust in the country. These results enable a better knowledge of rust fungi diversity in Colombia and offer information on the geographical distribution of the species.

Keywords: Biota; Phytopathogens; Puccinia; Uredinales; Uromyces.

Introducción

Colombia es el segundo país más biodiverso del mundo (Andrade, 2011). Atravesado por la cordillera de los Andes y por la llanura amazónica, hace parte de la zona intertropical, la cual se destaca por su diversidad ecológica en especies vegetales; además, su clima permite la adaptación de cultivos y plantas de importancia económica de otras zonas. Actualmente hay un registro de 30.033 especies de plantas (Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia- SiB, 2020). Esa gran diversidad viene acompañada, naturalmente, de la de aquellos patógenos que afectan estas plantas, entre los cuales se encuentran los Pucciniales (royas), un grupo monofilético de parásitos obligados altamente específicos que parasitan plantas vasculares como helechos, coníferas y angiospermas (Kolmer, et al., 2009). Las royas se han encontrado en todos los ambientes donde existen plantas susceptibles y constituyen uno de los órdenes de hongos fitoparásitos más

Citación: Zea-Fernández C, Gutiérrez-Castaño MC, Salazar-Yepes M. Nuevos registros de Pucciniaceae (Pucciniales, Fungi) para Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):500-507, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1348>

Editor: Jairo Castaño Zapata

***Correspondencia:**

Mauricio Salazar Yepes;
masalazay@unal.edu.co

Recibido: 17 de noviembre de 2020

Aceptado: 19 de marzo de 2021

Publicado: 17 de junio de 2021



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

numerosos (**Pardo-Cardona**, 2006), con cerca de 8.000 especies descritas (**McTaggart, et al.**, 2016). En Colombia se han reportado alrededor de 456 especies de royas, siendo la familia Pucciniaceae la de mayor número de especies registradas (**Buriticá, et al.**, 2014). El objetivo de este estudio es presentar los nuevos registros de royas pertenecientes a la familia Pucciniaceae encontradas parasitando individuos de las familias botánicas Amaranthaceae, Asteraceae, Lamiaceae, Loranthaceae y Poaceae en Colombia.

Materiales y métodos

Se estudiaron plantas parasitadas con royas provenientes de los departamentos de Antioquia, Boyacá, Cundinamarca, Meta y Norte de Santander, depositadas en el Museo Micológico de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (MMUNM). Las muestras botánicas se identificaron en el Jardín Botánico Joaquín Antonio Uribe de Medellín (JAUM) y los Pucciniales en el MMUNM. Se revisaron los estados esporicos presentes en las colecciones con la ayuda de un estereomicroscopio y se hicieron micropreparados en lactoglicerina mediante raspados y corte de los soros para la visualización en el microscopio óptico utilizado para medir los estados esporicos encontrados y tomar microfotografías. La consulta de la literatura especializada en Pucciniales y las claves taxonómicas permitieron la identificación de las royas en los diferentes hospedantes.

Resultados

En los materiales estudiados sobre las familias botánicas Amaranthaceae, Asteraceae, Lamiaceae, Loranthaceae y Poaceae se encontraron seis nuevos registros para la biota de Pucciniales de Colombia.

El listado de los nuevos registros se presenta en orden alfabético por especie del hongo, con sus respectivos sinónimos y basiónimos según el caso; se describen en detalle los estados esporicos hallados y, por último, se presenta el nombre científico del hospedante parasitado, el lugar de recolección, la distribución geográfica reportada del hongo y algunos comentarios adicionales.

1. *Puccinia arthuriana* H.S. Jackson, Botanical Gazette Crawfordville 65: 295. 1918.
=*Bullaria arthuriana* (H.S. Jackson) Arthur & Mains, North American Flora 7(7): 496. 1922. **Figura 1a-d**

Uredinio de tipo *Uredo*, soros anfigenos, predominantemente hipófilos, solitarios o agrupados, expuestos, pulverulentos, de color marrón-canela; uredosporas globosas, de 25-30 x 22-28 μm ; pared fuertemente equinulada, de 2,5-3 μm de grosor uniforme, de color amarillo pálida a amarilla; poros germinativos oscuros. Telio frecuentemente saliendo del uredinio, de color marrón; teliosporas de forma variable, de 57-73 x 17-23 μm , agudas en el ápice y redondeadas o atenuadas hacia la base; pared lisa, de menos de 2,5 μm de grosor uniforme, de color amarillo-dorada; poro germinativo en la célula distal apical y en la célula basal cerca al septo; pedicelo persistente, de hasta 75 μm de largo, de color hialino.

Ciclo de vida. Macrocíclico

Distribución geográfica. Reportada en Centroamérica desde México hasta Costa Rica, en las Islas del Caribe y en Suramérica (**Cummins**, 1978), y en Colombia.

Material estudiado. *Vernonia* sp. (ASTERACEAE): META, 1 milla desde San Luis de Cubarral, en la vía San Luis de Cubarral - Medellín del Ariari, a 884 m s.n.m., 8 de enero de 1976, Pablo Buriticá, Kent P. Dumont, James L. Luteyn, MMUNM-3396.

Comentarios. El espermogonio y el ecio no se encontraron en el material estudiado; según **Cummins** (1978), presenta espermogonio adaxial, agrupado, pocos grupos, de 0,5-1 mm de ancho, puntiforme, de color marrón-rojizo oscuro, globoso, de 80-115 μm de diámetro y filamentos ostiolares de 35 μm de largo. Ecio uredinoide en grupos pequeños en el envés; eciosporas en su mayoría globosas o ampliamente elipsoides, de 22-26 x 20-23 μm ; pared uniformemente equinulada, de 1,5-2 μm de grosor, color amarillo pálida; 5-6 poros dispersos dispuestos en zonas raramente ecuatoriales.

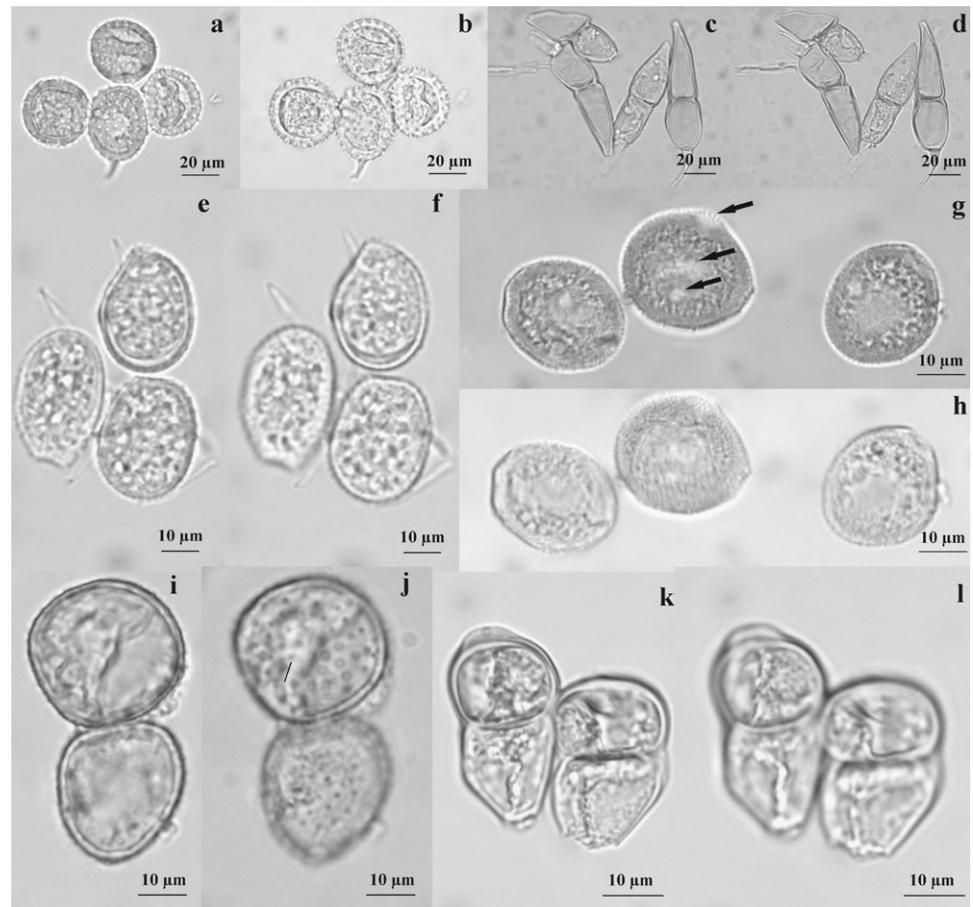


Figura 1. a-d. *Puccinia arthuriana*. a-b. Uredosporas. a. En vista mediana. b. En vista superficial. c-d. Teliosporas. c. En vista mediana. d. En vista superficial. e-f. *Puccinia esclavensis* var. *esclavensis*. e-f. Uredosporas. e. En vista mediana. f. En vista superficial. g-h. *Puccinia humahuacensis*. g-h. Uredosporas. g. En vista mediana con poros ecuatoriales (flecha). h. En vista superficial. i-l. *Puccinia improcera*. i-j. Uredosporas. i. En vista mediana. j. En vista superficial. k-l. Teliosporas. k. En vista mediana. l. En vista superficial.

Esta especie fue registrada por **Pardo-Cardona** (1998), sin embargo, la información no pudo ser corroborada debido a que no se encontró la colección ni registros digitales en el MMUNM. Esta nueva colección recolectada en el departamento del Meta confirma este registro para Colombia.

Actualmente se reportan en Colombia 4 especies de royas en el género *Vernonia*: *Puccinia arthuriana* H.S. Jackson, *Puccinia becki* Mayor, *Puccinia neorotundata* Cummins y *Puccinia vernoniae-mollis* Mayor.

2. *Puccinia esclavensis* var. *esclavensis* Dietel & Holway, in Holway, Bot. Gaz. 24(1): 29. 1897. **Figura 1e-f**

Uredinio de tipo *Uredo*, soros anfigenos, solitarios o agrupados, coalescentes, elipsoides a alargados, pequeños, sobre áreas necrosadas, de origen subepidermal, ruptura de la epidermis conspicua, pulverulentos, de color marrón-dorado; uredosporas oblongas, elipsoides, obovoides, de 20-30 x 17-20 µm; pared finamente equinulada, menor de 2,5 µm de grosor uniforme, de color amarillo pálido a amarillo-dorado; poros germinativos oscuros.

Ciclo de vida. Macrocíclico.

Distribución geográfica. Desde el suroeste de Estados Unidos hasta el sur de Honduras, Las Antillas, Ecuador, Argentina (**Cummins**, 1971) y Colombia.

Material estudiado. *Pennisetum bambusiforme* (E. Fourn.) Hemsl. ex B.D. Jacks. (POACEAE): CUNDINAMARCA, entre Tacisa y Ubate, a 2.900 m s.n.m., 28 de diciembre de 1998, Pablo Buriticá, S. Rodríguez, A. Buriticá, MMUNM-3295.

Comentarios. El espermogonio, el ecio y el telio no se encontraron en el material estudiado; según León-Gallegos & Cummins (1981), el ecio está presente en *Mirabilis*, eciosporas de 21-28 x 16-19 µm; pared verrugosa, de 1-1,5 µm de grosor, de color hialina. Telio anfígeno, prematuramente expuesto, pulvinado, de color marrón oscuro; teliosporas generalmente elipsoides, de 28-41 x 22-31 µm; pared lisa, de 2,5-3,5 µm de grosor lateral y de 4-8 µm de grosor apical, de color marrón-castaña; pedicelo de pared gruesa, de 80 µm de longitud, de color amarillo pálido. La roya *Puccinia esclavensis* var. *esclavensis* presenta uredosporas con ornamentación equinulada, lo que la diferencia de *Puccinia esclavensis*, cuyas uredosporas presentan ornamentación verrugosa (Holway, 1897).

Sobre el género *Pennisetum*, Buriticá, *et al.* (2014) reportan en el país 5 royas: *Phakopsora apoda* (Hariot & Patouillard) Mains, *Puccinia cenchri* Dietel & Holway, *Puccinia esclavensis* var. *esclavensis* Dietel & Holway, *Puccinia levis* var. *levis* (Saccardo & Bizzozero) y *Puccinia substriata* Ellis & Bartholomew, de las cuales solo *Puccinia cenchri* se encontraba reportada en *Pennisetum bambusiforme*. Esta roya es un nuevo registro para la familia *Poaceae* en Colombia.

3. *Puccinia humahuacensis* J.C. Lindquist, Rev. Fac. Agron. Eva Perón 29: 38. 1953.

Figura 1g-h

Uredinio de tipo *Uredo*, soros anfígenos, predominantemente hipófilos, dispersos, redondeados, de origen subepidermal, ruptura de la epidermis conspicua, pulverulentos, de color amarillo pálido; uredosporas elipsoidales, de 22-28 x 20-28 µm; pared verrugosa, menor a 2,5 µm de grosor uniforme, de color amarillo-dorado; poros germinativos de 3-4 ecuatoriales.

Ciclo de vida. Macrocíclica.

Distribución geográfica. Argentina (Laundon, 1965) y Colombia.

Material estudiado. *Gomphrena* cf. *serrata* L. (AMARANTHACEAE): NORTE DE SANTANDER, alrededor de las partidas a Bochalema, de la carretera Cúcuta-Pamplonita, 23 de septiembre de 2001, Pablo Buriticá, Mauricio Salazar Yepes, MMUNM-3362.

Comentarios. El espermogonio, el ecio y el telio no se encontraron en el material estudiado; según Lindquist (1982) presenta espermogonios de color miel, globosos con paráfisis salientes. Ecios anfígenos, agrupados, a veces ocupando toda la lámina foliar, cilíndricos, 1 mm de altura, 300-350 µm de diámetro, con peridio amarillo pálido, margen erosionado, células peridiales rectangulares vistas de perfil, membrana externa lisa, interna más gruesa y verrugosa-estriada; eciosporas elipsoidales, ovoides o por mutua presión, poligonales, de 18-24 x 14-20 µm; pared verrugosa, 1-1,5 µm de grosor, de color hialina. Telio semejante al uredinio, pero más oscuro, recubierto por la epidermis ampollada; teliosporas globosas, ampliamente elipsoides u obovoides, de 30-36 x 25-30 µm, redondeadas en el ápice, redondeadas o atenuadas hacia la base, no contraídas en el septo; pared lisa, de 3-3,5 µm de grosor lateral y de 4-5 µm grosor apical, poro germinativo en la célula distal apical y en la célula basal cerca al septo, de color marrón-castaño; mesosporas abundantes, globosas u obovoides, de 26-28 x 24-26 µm; pared gruesa; pedicelo de un largo igual al doble de la espóra, de color hialino.

En Colombia Buriticá, *et al.* (2014) reportan 6 royas en la familia botánica *Amaranthaceae* entre las cuales no se encontraba reportada ninguna para *Gomphrena*, constituyéndose en un nuevo registro para la familia.

4. *Puccinia improcera* H.S. Jackson & Holway, Mycologia 24(1): 145. 1932. **Figura 1i-l**

Uredinio de tipo *Uredo*, soros hipófilos, solitarios, expuestos, pulverulentos, de color marrón-canela pálido; uredosporas elipsoides, obovoides, de 20-25 x 17-20 µm; pared finamente equinulada menor a 2,5 µm de grosor uniforme, de color marrón-canela. Telio hipófilo, solitario, expuesto, pulverulento, de color marrón-canela oscuro; teliosporas

elipsoides, oblongo-clavadas, de 22-35 x 15-20 μm , usualmente contraídas en el septo; pared lisa de menos de 2,5 μm grosor, de color amarillo pálido a amarillo-dorado; poro germinativo, célula distal apical y célula basal cerca al septo; pedicelo deciduo, de color hialino.

Ciclo de vida. Macrocíclica.

Distribución geográfica. Brasil (Hennen, *et al.*, 2005) y Colombia.

Material estudiado. *Baccharis* sp. (ASTERACEAE): ANTIOQUIA, Jardín, vía a Andes, a la altura del resguardo indígena, 9 de junio de 2001, Pablo Buriticá, Mauricio Salazar Yepes, MMUNM-3394.

Comentarios. El espermogonio y el ecio no se encontraron en el material estudiado; según Hennen, *et al.* (2005) presenta espermogonios epífilos, de 95-110 μm de largo y de 90-100 μm de ancho, pocos, en manchas de color amarillo pálido a hialinas, de globosas a elipsoides, con un fascículo de paráfisis, de 30-45 μm de largo. Ecio de tipo *Caeoma*, soros hipófilos, de 0,5-0,8 mm de diámetro, solitarios o agrupados de 2 a 4, opuesto al espermogonio, inmerso, tardíamente errumpente y pulverulento, de color blanquecino; eciosporas elipsoides de 22-30 x 18-24 μm ; pared gruesa, moderadamente verrugosa.

En Colombia Buriticá, *et al.* (2014) reportan 16 royas sobre el género *Baccharis*, sin embargo, ninguna con las características morfológicas encontradas. La roya *Puccinia improcera* se constituye en un nuevo registro para el país.

5. *Puccinia porphyretica* H.S. Jackson & Holway, Mycologia 24(1): 76. 1932.

Figura 2a-b

Uredinio de tipo *Uredo*, soros hipófilos, solitarios o agrupados, redondeados, de origen subepidermal, ruptura de la epidermis conspicua, pulverulentos, de color amarillo-dorado a marrón pálido; uredosporas oblongas, elipsoides, de 27-35 x 25-30 μm ; pared equinulada de 2,5-5 μm de grosor uniforme, de color amarillo-dorado a marrón-canela; poros germinativos 2 ecuatoriales.

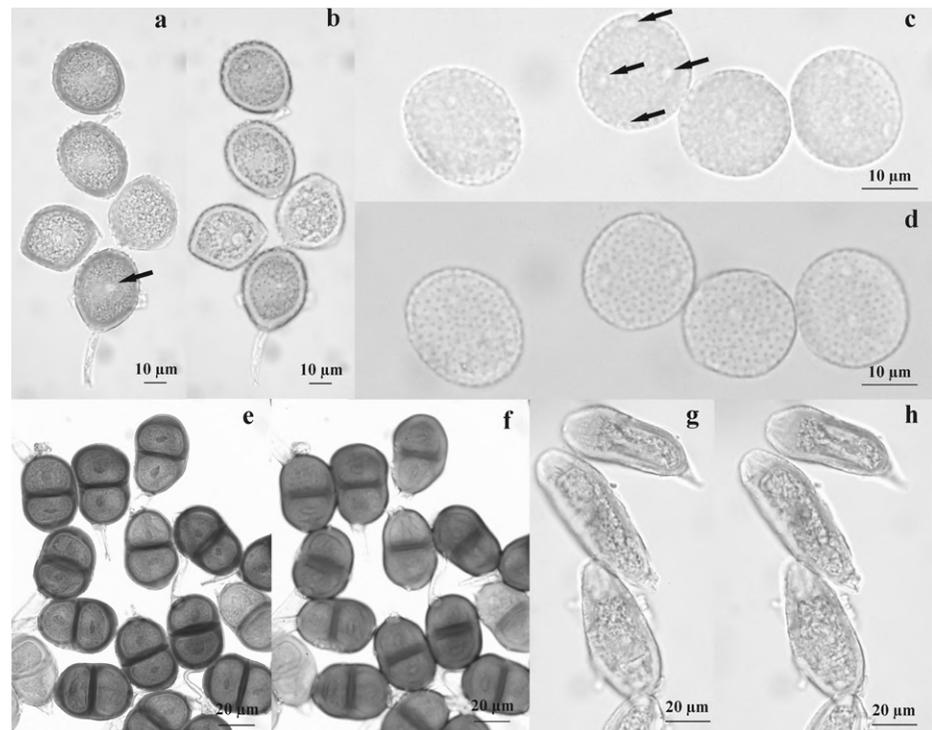


Figura 2. a-b. *Puccinia porphyretica*. a-b. Uredosporas. a. En vista mediana con poro ecuatorial (flecha). b. En vista superficial. c-f. *Puccinia viatica*. c-d. Uredosporas. c. En vista mediana con poros dispersos (flecha). d. En vista superficial. e-f. Teliosporas. e. En vista mediana. f. En vista superficial. g-h. *Uromyces socius*. g-h. Teliosporas. g. En vista mediana. h. En vista superficial

Ciclo de vida. Desconocido.

Distribución geográfica. Bolivia, Perú (**Jackson**, 1932) y Colombia.

Material estudiado. *Lepechinia* cf. *conferta* (Benth.) Epling. (LAMIACEAE): BOYACÁ, 9 km subiendo de Belén, vía Soatá, 1 de octubre de 2001, Pablo Buriticá, Mauricio Salazar Yepes, MMUNM-3401.

Comentarios. El espermogonio, el ecio y el telio no se encontraron en el material estudiado; según **Baxter** (1953), presenta espermogonio y ecio desconocidos. Telio anfígeno, disperso, redondeado, pulverulento, de color marrón-chocolate, de 0,3-5 mm de diámetro; teliosporas comúnmente elipsoides o globosas, de 30-46 x 26-38 μm , redondeadas en la base y no constrictas en el septo; pared distintivamente laminada, de color marrón-castaño pálido a marrón-canela, en ocasiones castaño-canela oscuro, más pálido en los poros, fuertemente verrugosa, de 5-8 μm de grosor, engrosada en el ápice de 9-14 μm ; poro germinativo apical y próximo al septo; pedicelo de hasta 130 μm de longitud, de color hialino.

En Colombia se reportan 12 royas sobre la familia botánica Lamiaceae (**Buriticá, et al.**, 2014), entre las cuales ninguna reportada sobre el género *Lepechinia*. La roya *Puccinia porphyretica* se constituye en un nuevo registro para el país.

6. *Puccinia viatica* J.F. Hennen & Cummins, Reports of the Tottori Mycological Institute 10: 177. 1973. **Figura 2c-f**

Uredinio de tipo *Uredo*, soros anfígenos, agrupados, redondeados, de origen subepidermal, ruptura de la epidermis conspicua, pulverulentos, de color amarillo pálido; uredosporas elipsoides, obovoides, globosas, de 22-25 x 17-20 μm ; pared densamente equinulada, menor a 2,5 μm de grosor uniforme, de color amarillo pálido; poros germinativos dispersos. Telio anfígeno, agrupado, redondeado, de origen subepidermal, ruptura de la epidermis conspicua, pulverulento, de color marrón-canela; teliosporas elipsoides, de 37-43 x 25-28 μm ; pared verrugosa, de 2,5-5 μm de grosor lateral y de 5-7,5 μm de grosor apical, de color marrón-canela; pedicelo de hasta 45 μm , de color hialino.

Ciclo de vida. Desconocido.

Distribución geográfica. México (**Cummins**, 1978) y Colombia.

Material estudiado. *Porophyllum ruderale* (Jacq.) Cass. (ASTERACEAE): ANTIOQUIA, Santa Fe de Antioquia, en la vía Santa Fe de Antioquia-Puente de Occidente, 600 m s.n.m., 3 de septiembre de 2010, Mauricio Salazar Yepes y estudiantes del curso hongos fitoparásitos, MMUNM-3490.

Comentarios. En Colombia no había registros de royas sobre el género *Porophyllum*, siendo la roya *Puccinia viatica* un nuevo registro para el país.

7. *Uromyces socius* Arthur & Holway, American Journal of Botany 5: 437. 1918.

= *Nigredo socia* (Arthur & Holway) Arthur, North American Flora 7(11): 756. 1926.

Figura 2g-h

Eciosoros anfígenos, agrupados, redondeados, cupulados, de color amarillo-dorado; eciosporas elipsoides a subglobosas, de 30-43 x 25-33 μm ; pared verrugosa, de 2,5-5(7,5) μm de grosor lateral y de 5-10(12,5) μm de grosor apical, de color hialina. Telio anfígeno, solitario, redondeado, de origen subepidermal, ruptura de la epidermis conspicua, pulverulento, de color marrón-canela oscuro; teliosporas ovaladas a elipsoides, de 37-50 x 17-25 μm ; pared con estrías longitudinales, de 2,5-5 μm de grosor lateral y de 5-12,5 μm de grosor apical, de color amarillo-dorado; poro germinativo apical, con umbo hialino; pedicelo deciduo.

Ciclo de vida. Macrocíclico.

Distribución geográfica. El Salvador (**Arthur**, 1918), Guatemala (**Carrion & Galvan**, 1987) México (**León-Gallegos & Cummins**, 1981) y Colombia.

Material estudiado. *Sruthanthus* sp. (LORANTHACEAE): CUNDINAMARCA, Bogotá, 28 millas desde Bogotá en la vía Bogotá-El Colegio, Salto del Tequendama, 1.830 m s.n.m., 13 de enero de 1976, Pablo Buriticá, Kent P. Dumont, James L. Luteyn, MMUNM-3511.

Comentarios. El espermogonio y el uredinio no se encontraron en el material estudiado; según **Perdomo-Sánchez & Piepenbring** (2014) no se encontró espermogonio. Uredinio anffígeno, subepidermal, agrupado en pequeñas manchas de color marrón-canela, de 1,5-2 mm de diámetro, pulverulento, ruptura de la epidermis conspicua; uredosporas elipsoides u obovoides, de (40)41-52(56) x (19)22-26(27) μm ; pared equinulada, de 1-2 μm de grosor, de color marrón-canela pálido; pedicelo persistente, cilíndrico, de 30-45 x 7-8 μm , de pared delgada, de color hialino.

En Colombia han sido reportadas 3 royas sobre la familia Loranthaceae (**Buriticá, et al.**, 2014; **Barrera-Enriquez & Salazar-Yepes**, 2019), sin embargo, ninguna corresponde morfológicamente con la recolectada en el departamento de Cundinamarca. La roya *Uromyces socius* constituye en un nuevo registro para el país.

Discusión

Se registran nuevas especies de royas (Pucciniales) en el país pertenecientes a la familia Pucciniaceae, de las cuales seis son del género *Puccinia* y una de *Uromyces*, confirmándose como la familia del orden Pucciniales con mayor número de registros en Colombia. Se reportan tres nuevos géneros de hospedantes para Colombia parasitados con royas: *Gomphrena* (Amaranthaceae), *Lepechinia* (Lamiaceae) y *Porophyllum* (Asteraceae), recolectadas en los departamentos de Norte de Santander, Boyacá y Antioquia, respectivamente.

Conclusiones

Los nuevos registros de especies y hospedantes han permitido ampliar el conocimiento de la distribución geográfica de las royas en el país, los estados esporicos presentes y los hospedantes parasitados, con lo que se amplía el conocimiento sobre la biota de Pucciniales de Colombia.

Agradecimientos

Al Museo Micológico de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, por facilitarnos el espacio, los materiales estudiados y los equipos necesarios para llevar a cabo este trabajo y al Jardín Botánico Joaquín Antonio Uribe de Medellín (JAUM) por la identificación del material vegetal.

Contribución de los autores

CZF, MCGC y MSY participaron en igual medida en la concepción, diseño, toma de datos, análisis y escritura del documento.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Referencias

- Arthur, J.C.** (1918). Uredinales of Guatemala based on collections of E.W.D. Holway, II. *American Journal of Botany*. **5**: 420-446.
- Barrera-Enriquez, V.P. & Salazar-Yepes, M.** (2019). Nuevos registros de Pucciniales de Colombia, incluyendo *Uredendo anthurii* sp. nov. y *Uromyces colombiana* sp. nov. *Bol. Cient. MusHist. Nat. U. de Caldas*. **23** (2): 95-105.
- Baxter, J.W.** (1953). South American species of *Puccinia* on *Salvia*. *Mycologia*. **45** (1): 115-135.
- Buriticá, P., Salazar-Yepes, M., Pardo-Cardona, V.M.** (2014). Pucciniales (Fungi), Royas de Colombia. *Rev. Fac. Nac. Agron.* **67** (1): 1-93.
- Carrion, G. & Galvan, M.** (1987). Plant pathogens fungi from the state of Veracruz, Uredinales V. *Revista Mex. Micol.* **3**: 149-159.
- Cummins, G.B.** (1971). *The rust fungi of cereals, grasses and bamboo's*. Springer Verlag, New York, USA. 570 p.
- Cummins, G.B.** (1978). *Rust fungi on legumes and composites in North America*. University of Arizona Press, Arizona, USA. 424 p.

- Hennen, J.F., Figueiredo, M.B., De Carvalho, A.A., Hennen, P.G.** (2005). Catalogue of the species of Plants rust fungi (Uredinales) of Brazil. Instituto de Pesquisas, Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 490 p.
- Holway, E.W.D.** (1897). Mexican Fungi. *Botanical Gazette Crawfordsville*. **24** (1): 23-38.
- Jackson, H.S.** (1932). The rusts of South America based on the Holway Collections - VI. *Mycologia*. **24** (1): 62-186.
- Kolmer, J.A., Ordoñez, M.E., Groth, J.V.** (2009). The rust fungi. *Encyclopedia of Life Sciences (ELS)*, 1-8.
- León-Gallegos, H.M. & Cummins, G.B.** (1981). Uredinales (Royas) de México. Culiacán, Sinaloa, México: Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) volumen 1. 440 p.
- Lindquist, C.** (1982). Royas de la República Argentina y zonas limítrofes. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Ed. Tipenc. S.R.L., Buenos Aires, Argentina. 574 p.
- Laundon, G.F.** (1965). Rust fungi III: on Alanginaceae, Amaranthaceae and Amaryllidaceae. *Mycological Papers*. **102**: 1-52.
- McTaggart, A.R., Shivas, R.G., van der Nest, M.A., Roux, J., Wingfield, B.D., Wingfield, M.J.** (2016). Host jumps shaped the diversity of extant rust fungi (Pucciniales). *New Phytologist*. **209** (3): 1149-1158.
- Pardo-Cardona, V.M.** (1998). Registros nuevos para la flora de Uredinales (Royas) de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **22** (84): 347-354.
- Pardo-Cardona, V.M.** (2006). Uredinales de plantas cultivadas de interés floral en Colombia. *Rev. Fac. Nac. Agron.* **59** (1): 3335-3353.
- Perdomo-Sánchez, O. & Piepenbring, M.** (2014). Species of Uromyces (Pucciniales, Basidiomycota) on Loranthaceae. *Tropical Plant Pathology*. **39** (2): 141-153.
- Andrade, M.G.** (2011). Estado del conocimiento de la biodiversidad en Colombia y sus amenazas. Consideraciones para fortalecer la interacción ciencia-política. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **35** (137): 491-508.
- SIB.** (2020). Biodiversidad en cifras. Fecha de consulta: 23 enero 2020. Disponible en: <https://cifras.biodiversidad.co/>

Artículo original

Presencia de la especie invasora *Zaprionus indianus* Gupta, 1970 (Diptera: Drosophilidae) en Medellín, Colombia

Presence of the invasive species *Zaprionus indianus* Gupta, 1970 (Diptera: Drosophilidae) in Medellín, Colombia

✉ Andrea Bustca

Centro de Ciencia Museo de Ciencias Naturales de La Salle, Institución Universitaria ITM, Medellín, Colombia.

Resumen

La especie *Zaprionus indianus* es originaria de África y se ha dispersado rápidamente alrededor del mundo, disparando las alarmas en cuanto a su impacto económico y medioambiental. En Colombia se ha registrado en algunas localidades de los departamentos de Caquetá, Cundinamarca, La Guajira, Huila, Magdalena, Norte de Santander, Santander, Risaralda y Tolima. Se reporta la presencia de la especie en el área urbana de Medellín, específicamente en la zona verde de la Institución Universitaria ITM – Sistema de Laboratorios Parque i, donde en el 2017 y el 2019 fueron capturados individuos adultos en una trampa Van Someren-Rydon cebada con material animal en descomposición. La especie se identificó con base en los caracteres morfológicos.

Palabras claves: Mosca africana del higo; Especie exótica; Invasión biológica; Insecto plaga; Peste de frutas.

Abstract

The species *Zaprionus indianus* is native to Africa and has spread rapidly around the world causing alarm in terms of its economic and environmental impact. In Colombia, it has been recorded in some localities in the departments of Caquetá, Cundinamarca, Guajira, Huila, Magdalena, Norte de Santander, Santander, Risaralda, and Tolima. The species has been reported in an urban area of the city of Medellín, specifically on the green area of the *Institución Universitaria ITM - Sistema de Laboratorios Parque i*, where adult individuals were captured with a Van Someren-Rydon trap baited with decomposing animal material in 2017 and 2019. The species identification was based on morphological characters.

Keywords: African fig fly; Alien species; Biological invasion; Insect plague; Fruit pest.

Introducción

Zaprionus indianus o “mosca africana del higo” es una especie originaria de los trópicos africanos, pero fue descrita a partir de ejemplares capturados en la India (Gupta, 1970). En África se la considera la especie de mayor diversidad ecológica dentro de la familia Drosophilidae, la cual utiliza una amplia variedad de frutas y flores de hasta 80 plantas diferentes como sitio de alimentación, apareamiento, oviposición y desarrollo (Commar, et al., 2012; Yassin & David, 2010; Markow & O’Grady, 2008; Setta & Carareto, 2005; Vilela, 1999).

Como otros miembros de esta familia, no son animales propiamente fitófagos, sino que se alimentan de microorganismos: bacterias, mohos y levaduras, presentes en los frutos más maduros, en descomposición o fermentación (Markow & O’Grady, 2008; Gomes, et al., 2003). El género *Zaprionus* está constituido por 58 especies válidas. El estatus taxonómico de la especie sufrió cambios en el siglo XX y fue sinonimizada con *Zaprionus inermis* Seguy, 1938, *Zaprionus paravittiger* Godbole & Vaidya, 1972 y *Zaprionus collarti* Tsacas, 1980 (Pape & Thompson, 2019) (Tabla 1).

Citación: Bustca A. Presencia de la especie invasora *Zaprionus indianus* Gupta, 1970 (Diptera: Drosophilidae) en Medellín, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):508-515, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1324>

Editor: Elizabeth Castañeda

Correspondencia:

Andrea Bustca;
andreamustamante@itm.edu.co

Recibido: 17 de octubre de 2020

Aceptado: 23 de marzo de 2021

Publicado: 17 de junio de 2021



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

Tabla 1. Características taxonómicas de la especie *Zaprionus indianus*

Categoría taxonómica		Características
Familia	Drosophilidae	Tres setas fronto-orbitales: una anterior proclinada, dos reclinadas, y una de ellas a menudo pequeña, algunas veces reducida o ausente
Género	<i>Zaprionus</i>	Bandas o líneas longitudinales de color blanco plata con márgenes negras a lo largo del tórax hasta el escutelo sin bordear su ápice
Subgénero	<i>zaprionus</i>	Número par de rayas en el tórax. El otro par de bandas se ubican a cada lado del tórax desde el pronoto hasta la base de las alas. Origen afrotropical
Grupo	<i>armatus</i>	Hilera de espinas largas en el fémur anterior
Subgrupo	<i>vittiger</i>	4-6 espinas compuestas (dos espinas originadas en el mismo punto) en la región ventral del fémur anterior
Epíteto específico	<i>indianus</i>	Especie descrita con ejemplares encontrados en India

La especie exhibe un comportamiento invasivo (Kemmer, *et al.*, 2017; Commar, *et al.*, 2012; Amoudi, *et al.*, 1991; Gupta, 1970) y su éxito colonizador aumenta con la posibilidad de alcanzar poblaciones numerosas en áreas urbanas; es de hábito generalista, tolera diferentes temperatura y es capaz de adaptarse a varios climas (Kemmer, *et al.*, 2017; Commar, *et al.*, 2012). Ribeiro, *et al.* (2012) mencionan su potencial sinantrópico y su comportamiento oportunista, pues se han capturado individuos en trampas cebadas con heces de perros.

Zaprionus indianus es la especie más común y más ampliamente distribuida de su género; actualmente se la considera semicosmopolita y está presente en varios países de Asia, África, Europa y América, así como en islas del Atlántico y el Índico (European and Mediterranean Plant Protection Organization - EPPO, 2020; Kremmer, *et al.*, 2017; Commar, *et al.*, 2012; Carles-Tolrá, 2009; Vilela, 1999).

La colonización del continente americano pudo haber ocurrido a través de la comercialización de frutos por vía aérea o marítima (Commar, *et al.*, 2012; Galego & Carareto, 2010; Setta & Carareto, 2005): en 1998 se registró por primera vez en Brasil (Vilela, 1999) y se dispersó rápidamente a todas sus regiones (Setta & Carareto, 2005; Tidon, *et al.*, 2003; Castro & Valente, 2001); posteriormente, fue reportada en Uruguay (Goñi & Martínez, 2002; Goñi, *et al.*, 2001), el norte de Argentina (Lavagnino, *et al.*, 2008; Soto, *et al.*, 2006), en Ecuador (Rafael, 2007), la Guyana Francesa, Perú (EPPO, 2019), Venezuela y las Islas Caimán (T'Oma, *et al.*, 2010), así como en Panamá, Estados Unidos (Van der Linde, *et al.*, 2006), México (Lasa & Tadeo, 2015; Markow, *et al.*, 2014; Castrezana, 2007) y el sureste de Canadá (Renkema, *et al.*, 2013).

En África no es vista como una plaga (Commar, *et al.*, 2012; Gomes, *et al.*, 2003), sin embargo, su presencia en otras partes del mundo se considera una amenaza económica debido a su polifagia y a los daños que puede ocasionar en numerosas frutas silvestres y comerciales, nativas e introducidas (Alawamleh, *et al.*, 2016; Biddinger, *et al.*, 2012; Castrezana, 2011; Lavagnino, *et al.*, 2008; Steck, 2005; De Toni, *et al.*, 2001; Goñi, *et al.*, 2001; Lachaise & Tsacas, 1983). En efecto, cuando se registró por primera vez en América representó más del 40 % de las plagas encontradas en una muestra de higos (*Ficus carica*) de una plantación en Sao Paulo, Brasil (Vilela, 1999), a lo que debe su nombre común, pero la magnitud de este evento fue única y ligada a la reciente introducción de la especie (Commar, *et al.*, 2012)

En Colombia se ha registrado desde el 2001, inicialmente en los departamentos de Huila (Desierto de La Tatacoa), Cundinamarca (La Vega), Norte de Santander (Cúcuta), Santander (Barbosa y Vélez), Magdalena (Santa Marta), Guajira (Riohacha) (Murillo,

2005), y luego en Caquetá (Montañitas, Paujil, Florencia, Morelia, Belén de los Andaquíes y San José del Fragua) (**Instituto Colombiano Agropecuario - ICA, 2011**), en Tolima (Coello) (**Monje & Guzmán, 2016**) y ahora se documenta en Antioquia (Medellín). Asimismo, en el marco del proyecto de ciencia ciudadana y red social “Naturalista”, se hallan registros fotográficos realizados por ciudadanos en el departamento de Risaralda (Guatica y Pereira) y en el barrio Diego Echavarría en Medellín (**Naturalista, 2019**) (**Figura 1**).

A raíz de esos hallazgos se han dado alertas en estas regiones colombianas. **Murillo (2005)** advirtió sobre las poblaciones registradas y analizó los aspectos propicios para su sobrevivencia bajo condiciones de laboratorio; por otro lado, en Caquetá los individuos

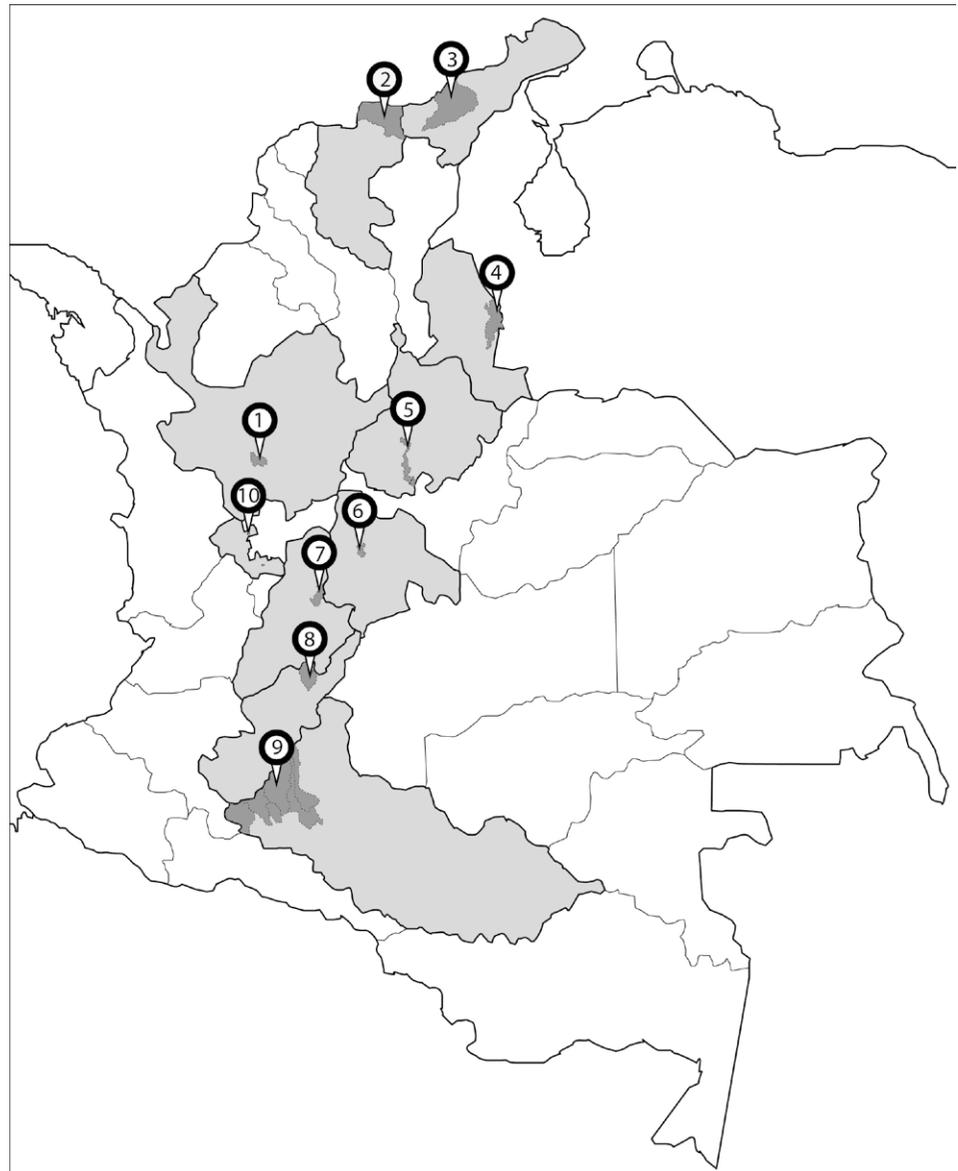


Figura 1. Distribución de la mosca *Zaprionus indianus* en Colombia. **1)** Medellín – Antioquia; **2)** Santa Marta – Magdalena; **3)** Riohacha – La Guajira; **4)** Cúcuta – Norte de Santander; **5)** Barbosa, Vélez – Santander; **6)** La Vega – Cundinamarca; **7)** Coello – Tolima; **8)** Desierto de la Tatacoa – Huila; **9)** Montañitas, Paujil, Florencia, Morelia, Belén de los Andaquíes, San José del Fragua – Caquetá; **10)** Guatica, Pereira – Risaralda

se capturaron con trampas para el control de moscas de la fruta ubicadas cerca de rutas comerciales de frutales (ICA, 2011); por último, en Tolima se registró atacando considerablemente a los frutos de una variedad de mango (Monje & Guzmán, 2016). En este trabajo se advierte sobre su presencia en la zona urbana de Medellín.

Materiales y métodos

Zona de muestreo

El Sistema de Laboratorios Parque i se encuentra ubicado en la sede Fraternidad de la Institución Universitaria ITM en Medellín, barrio Sucre, en las coordenadas 6.244301, -75.552166, a una altura de 1.555 m s.n.m. La temperatura de la zona oscila entre los 17,6 °C y los 27 °C, según datos obtenidos por el Observatorio Astronómico del ITM ubicado en la sede.

Metodología

Los individuos adultos se capturaron utilizando una trampa Van Someren-Rydon con material animal en descomposición como atrayente, de la siguiente forma: durante los días 1 y 2 de septiembre del 2017 se empleó la trampa cebada con pescado en descomposición desde las 9:00 horas del primer día hasta las 15:00 horas del segundo día; luego, el 27 y el 28 de junio de 2019 se utilizaron vísceras descompuestas en el mismo horario. En ambos casos la trampa se suspendió a la sombra del mismo árbol de *Ficus elástica*. Los ejemplares se recolectaron en viales que contenían alcohol al 70 %, los cuales fueron llevados al Laboratorio de Curaduría del Museo de Ciencias Naturales de La Salle. Para la identificación taxonómica se tuvieron en cuenta los rasgos morfológicos y la disección de la genitalia siguiendo a Yassin & David (2010) y Van der Linde (2010) (Figura 2).

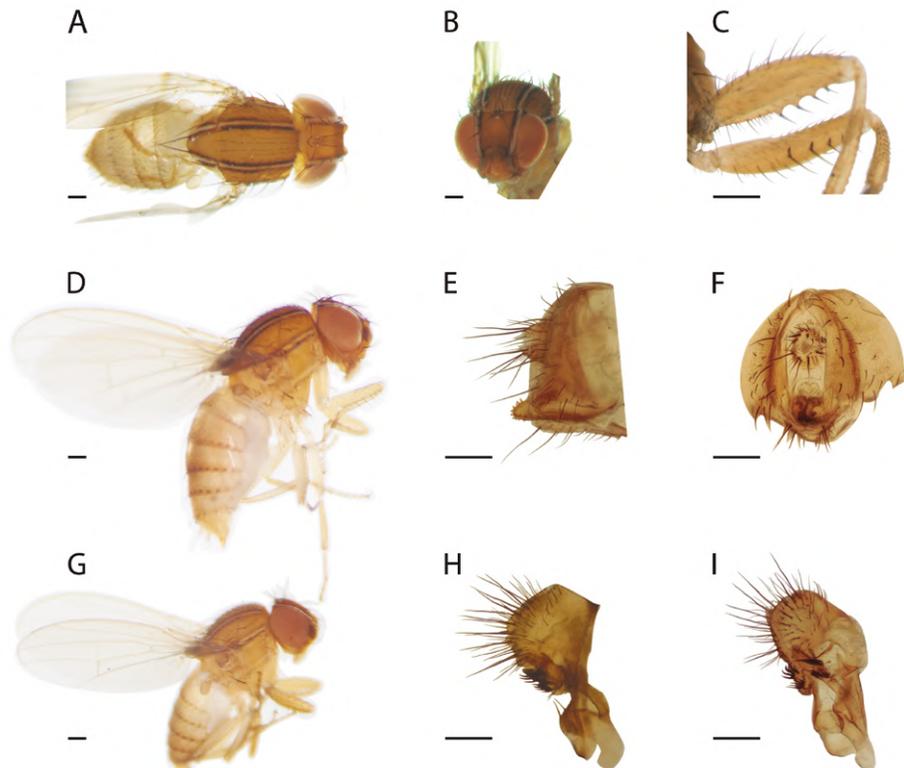


Figura 2. Morfología de la especie *Zaprionus indianus*. **A)** vista dorsal, hembra; **B)** cabeza, hembra; **C)** fémur anterior, hembra; **D)** vista lateral, hembra; **E)** vista lateral de la genitalia externa, hembra; **F)** vista frontal de la genitalia externa, hembra; **G)** vista lateral, macho; **H)** vista lateral de la genitalia externa, macho; **I)** vista frontal de la genitalia externa, macho. Barra de escala 0,2 mm

Resultados y discusión

Los ejemplares clasificados e identificados fueron depositados en la colección del Museo de Ciencias Naturales de La Salle (**Anexo 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1324/3020>). En el 2017 se capturaron ocho machos y cinco hembras de *Z. indianus* en la trampa cebada con pescado putrefacto activa durante 30 horas; luego, en el 2019 se registraron 22 machos y 25 hembras atraídos con vísceras en descomposición en igual intervalo de tiempo. Su presencia en la misma localidad con un intervalo de 21 meses entre los muestreos y usando el mismo protocolo de recolección puede ser indicio de que la población se encuentra establecida en la zona y está en aumento.

La mosca africana del higo presenta una alta tasa reproductiva, tolerancia a las fluctuaciones de temperatura y hábitos alimenticios generalistas y oportunistas (**Kemmer, et al., 2017; Commar, et al., 2012; Ribeiro, et al., 2012**), características que facilitan su dispersión y establecimiento en nuevas regiones y en una amplia variedad de frutas. El hallazgo de adultos de *Z. indianus* en el municipio de Medellín atraídos con material animal descompuesto evidencia su potencial invasor y sinantrópico, similar a lo observado en Brasil, donde se la encontró en heces de perro en un ambiente urbanizado (**Ribeiro, et al., 2012**).

Los riesgos que representa *Z. indianus* en términos ecológicos y económicos son desconocidos en Colombia, y son pocos los estudios publicados sobre su presencia en el país y limitados los datos georreferenciados como para estimar la distribución geográfica real y proyectada de esta especie. **Murillo (2005)** observó bajo condiciones de laboratorio que los diferentes estadios se desarrollan satisfactoriamente a una temperatura de 25 °C, sin embargo, se conoce que la especie puede desarrollarse entre los 14 °C y los 32 °C y adaptarse bien a las condiciones climáticas (**Kremmer, et al., 2017; Commar, et al., 2012; Murillo, 2005; Setta & Carareto, 2005**), por lo que es importante considerar su expansión y establecimiento en gran parte del territorio colombiano.

Medellín cuenta con una temperatura promedio de 21,5 °C que fluctúa entre los 17 y los 28 °C (**Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2014**), rango viable para el desarrollo de esta mosca. Su presencia es motivo de preocupación regional, ya que la zona del oriente antioqueño es considerada la despensa de productos agrícolas más importante del departamento; allí se producen diferentes tipos de frutas, algunas de ellas previstas para exportación (**Cámara de Comercio del Oriente Antioqueño, CCOA, 2018**) y, en efecto, la especie podría fácilmente dispersarse o estar presente en estas zonas productivas.

Es posible que la especie se encuentre en diferentes localidades de Medellín, dado su comportamiento y el registro fotográfico realizado por un ciudadano en el barrio Diego Echavarría de la ciudad (**Naturalista, 2019**). Así pues, esta mosca puede estar generando competencia con las especies locales, lo cual altera notablemente la biodiversidad (**Vilela, 1999**). Las especies invasoras son objeto de la prevención mundial, razón por la cual es muy importante incluir especies exóticas e invasoras en los estudios del ecosistema (**León & Vargas, 2009**); en Colombia deben desplegarse esfuerzos para conocer la fauna de insectos autóctona y foránea asociada con los ecosistemas y sus implicaciones; la presencia de *Z. indianus* debe activar las alertas tempranas para reconocer y analizar ecológicamente este invasor.

La especie se propone como un indicador de áreas alteradas debido a la variación de la abundancia de sus poblaciones en torno a diferentes ecosistemas, siendo mayores en las zonas urbanas (**Commar, et al., 2012**) y con tendencia a ser más reducidas en áreas cercanas al bosque tropical (**Tidon, et al., 2003**).

En este contexto, la especie se presenta como un excelente modelo para análisis ecológicos, evolutivos y biogeográficos aplicados a la invasión biológica (**Mata, et al., 2010**) y su presencia representa una gran oportunidad para evaluar los incrementos graduales de su abundancia a través del tiempo (**Goñi, et al., 2002**); por lo tanto, es necesario hacer análisis poblacionales para confirmar su establecimiento, ampliando el área de

muestreo en la ciudad y las zonas periféricas, con el fin de evaluar los potenciales riesgos y la magnitud de la invasión. Además, los estudios sistemáticos en otras localidades de Colombia ayudarán a visualizar el estado, los patrones de distribución y la dinámica de sus poblaciones.

Conclusiones

Esta mosca coloniza rápidamente los ecosistemas tropicales y es probable que su presencia en el país afecte la variedad de frutas silvestres, comerciales y exóticas que se cultivan.

No se ha propuesto una hipótesis sobre la llegada de esta mosca al territorio colombiano, y solo se ha aludido a su dispersión a partir de la comercialización de frutos en el continente.

Hay poca información sobre los hospederos y el estatus de peste de esta especie invasora, y tampoco hay información georreferenciada publicada para precisar aspectos de su posible distribución en el país.

Se requieren nuevos estudios orientados a determinar su estatus ecológico, evolutivo y biogeográfico, así como a analizar su potencial uso como bioindicador en los sistemas urbanos y naturales.

Información suplementaria

Anexo 1. Ejemplares de *Zaprionus indianus* depositados en la colección biológica del Museo de Ciencias Naturales de La Salle. Vea el anexo 1 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1324/3020>

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al Sistema Integrado de Laboratorios Parque i - Laboratorio de Curaduría, que pertenece a la Institución Universitaria ITM, y al artista-investigador Leonardo Arias, quien colaboró con la instalación de la trampa y la recolección de muestras.

Conflicto de intereses

Declaro que no tengo conflicto de intereses frente al contenido de este documento.

Referencias

- Alawamleh, A., katbeh-Bader, A., Hassan, N., Al-Jboory, I.** (2016). Distribution and Host Range of the African Fig Fly *Zaprionus indianus* (Diptera: Drosophilidae) in Jordan. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*. **12** (2): 555-564.
- Amoudi, M. A., Diab, F. M., Abou-Fannah, S. S. M.** (1991). *Zaprionus Indiana* (Diptera: Drosophilidae) in Saudi Arabia and the Effect of Temperature on the Life Cycle. *Journal of King Saud University*. **3** (2), 111-121.
- Biddinger, D., Joshi, N., Demchak, K.** (2012). African fig fly: Another invasive drosophilid fly discovered in PA. *Rutgers New Jersey Agricultural Experiment Station Plant & Pest Advisory*. **17** (19): 1-2.
- Cámara de Comercio del Oriente Antioqueño.** (2018). Concepto económico del oriente antioqueño 2018. Fecha de consulta: marzo 30 de 2021. Disponible en: <https://ccoa.org.co/wp-content/uploads/2021/01/Concepto-economico-2018.pdf>
- Carles-Tolrá, M.** (2009). *Zaprionus indianus* Gupta: género y especie nuevos para la Península Ibérica (Diptera: Drosophilidae). *Boletín Sociedad Entomológica Aragonesa*. **45**: 316. Disponible en: http://sea-entomologia.org/Publicaciones/PDF/BOLN45/316_BSEA45NBZapriusindianusDiptera.pdf
- Castrezana, S.** (2007). New records of *Zaprionus indianus* Gupta, 1970 (Diptera, Drosophilidae) in North America and a key to identify some *Zaprionus* species deposited in the Drosophila Tucson Stock Center. *Drosophila Information Service*. **90**: 34-36.
- Castrezana, S.** (2011). New record on novel hosts for the Drosophilid pest *Zaprionus indianus*. *Drosophila Information Service*. **94**: 1-2.
- Castro, F. L. & Valente, V. L. S.** (2001). *Zaprionus indianus* is invading Drosophilid communities in the southern Brazilian city of Porto Alegre. *Drosophila Information Service*. **84**: 15-17.

- Commar, L. S., Galego, L. G. da C., Ceron, C. R., Carareto, C. M. A.** (2012). Taxonomic and evolutionary analysis of *Zaprionus indianus* and its colonization of Palearctic and Neotropical regions. *Genetics and Molecular Biology*. **35** (2): 395-406. Doi: 10.1590/s1415-47572012000300003
- De Toni, D. C., Hofmann, P. R. P., Valente V. L. S.** (2001). First record of *Zaprionus indianus* in the State of Santa Catarina. *Biotemas*. **14** (1): 71-85.
- European and Mediterranean Plant Protection Organization.** (2020). EPPO Alert-List *Zaprionus indianus* (Diptera: Drosophilidae) African fig fly. Fecha de consulta: octubre de 2020. Disponible en: <https://gd.eppo.int/taxon/ZAPRIN/distribution>
- Galego, L. G. C. & Carareto, C. M. A.** (2010). Scenario of the spread of the invasive species *Zaprionus indianus* Gupta, 1970 (Diptera, Drosophilidae) in Brazil. *Genetics and Molecular Biology*. **33** (4): 767-773.
- Gomes, L. H., Echeverrigaray, S., Conti, J. H., Lourenço, M. V. M., Duarte, K. M. R.** (2003). Presence of the yeast *Candida tropicalis* in figs infected by the fruit fly *Zaprionus indianus* (Dip.: Drosophilidae). *Brazilian Journal of Microbiology*. **34**: 5-7.
- Goñi, B., Fresia, P., Calviño, M., Ferreira, M. J., Valente, V. L. S., Basso da Silva, L.** (2001). First record of *Zaprionus indianus* Gupta, 1970 (Diptera, Drosophilidae) in southern localities of Uruguay. *Drosophila Information Service*. **84**: 61-65.
- Goñi, B. & Martínez, M.** (2002). Increased frequencies *Zaprionus indianus* Gupta, 1970 (Diptera, Drosophilidae) in Uruguay. *Drosophila Information Service*. **85**: 75-80.
- Gupta, J. P.** (1970). Description of a new species of *Phorticella* and *Zaprionus* (Drosophilidae) from India. *Proceeding Indian National Science Academy*. **36**: 62-70.
- Naturalista.** (2019). Mosca del higo africana (*Zaprionus indianus*) (Lista de verificación de Colombia), CONABIO. Observación de Eli Rios, Colombia. Fecha de consulta: octubre de 2020. Disponible en: https://colombia.inaturalist.org/listed_taxa/48233172
- Instituto Colombiano Agropecuario.** (2011). Resultados de vigilancia sobre moscas de la fruta presentes en el Departamento del Caquetá. *Boletín Epidemiológico*. Fecha de consulta: mayo 2 de 2019. Disponible en: https://www.ica.gov.co/areas/agricola/servicios/epidemiologia-agricola/boletines/departamentales/2012/boletin_caqueta_2_2011.aspx
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.** (2014). Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. Fecha de consulta: mayo 2 de 2019. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>
- Kremmer, L., David, J., Borowiec, N., Thaon, M., Ris, N., Poirié, M., Gatt, J. L.** (2017). The African fig fly *Zaprionus indianus*: a new invasive pest in France? *Bulletin of Insectology*. **70** (1): 57-62.
- Lachaise, D. & Tsacas, L.** (1983). Breeding-Sites in Tropic African Drosophilids. En M. Ashburner, H. L. Carson y J. N. Thompson (Eds.). *The genetics and biology of Drosophila* (p. 221-331). London, United Kingdom: Academic Press.
- Lasa, R. & Tadeo, E.** (2015). Invasive drosophilid pests *Drosophila suzukii* and *Zaprionus indianus* (Diptera: Drosophilidae) in Veracruz, Mexico. *Florida Entomologist*. **98** (3): 987-988.
- Lavagnino, N. J., Carreira, V. P., Mensch, J., Hasson, E., Fanara, J. J.** (2008). Geographic distribution and hosts of *Zaprionus indianus* (Diptera: Drosophilidae) in North-Eastern Argentina. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*. **67** (1-2): 189-192.
- León, O. & Vargas, O.** (2009). Las especies invasoras: un reto para la restauración ecológica. En O. Vargas, O. León y A. Díaz. (Eds.), *Restauración Ecológica en zonas invadidas por retamo espinoso y plantaciones forestales de especies exóticas* (p. 19-38). Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Markow, T. A., Hanna, G., Riesgo-Escovar, J. R., Tellez-Garcia, A. A., Richmond, M. P., Nazario-Yepiz, N. O., Laclette, M. R. L., Carpinteyro-Ponce, J., Pfeiler, E.** (2014). Population genetics and recent colonization history of the invasive drosophilid *Zaprionus indianus* in Mexico and Central America. *Biological Invasions*. **16** (11): 2427-2434. Doi: 10.1007/s10530-014-0674-5
- Markow, T. A. & O'Grady, P.** (2008). Reproductive ecology of *Drosophila*. *Functional Ecology*. **22**: 747-759. Doi: 10.1111/j.1365-2435.2008.01457.x
- Mata, R. A., Tidon, R., Gomes, L., Marco, P., Diniz-Filho, J. A. F.** (2010). Invasive and flexible: Niche shift in the drosophilid *Zaprionus indianus* (Insecta, Diptera). *Biological Invasions*. **12** (5): 1231-1241. Doi: 10.1007/s10530-009-9542-0
- Monje, B. & Guzmán, L. E.** (2016). Reporte de *Zaprionus Indianus* (Diptera: Drosophilidae) causando daño en frutas de mango para el Tolima. En E. H. Becerra (Presidencia). *Sociedad Colombiana de Entomología*. Ponencia presentada en el 43° Congreso de la Sociedad Colombiana de Entomología, Manizales, Colombia.

- Murillo, M. P.** (2005). Efecto de la temperatura y la dieta alimentaria sobre la capacidad reproductiva de una población natural de *Zaprionus indianus* (Diptera: Drosophilidae) (tesis de pregrado). Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.
- Pape T. & Thompson F.C.** (eds). (2019). Systema Dipterorum (version 2.0, Jan 2011). En: Species 2000 & ITIS Catalogue of Life, 2019 Annual Checklist (Roskov Y., Ower G., Orrell T., Nicolson D., Bailly N., Kirk P.M., Bourgoin T., DeWalt R.E., Decock W., Nieukerken E. van, Zarucchi J., Penev L., eds.). Digital resource at www.catalogueoflife.org/annual-checklist/2019. Species 2000: Naturalis, Leiden, the Netherlands. ISSN 2405-884X.
- Rafael, V.** (2007). *Drosophila malerkotliana* y *Zaprionus indianus* (Diptera, Drosophilidae) invaden poblaciones ecuatorianas de *Drosophila*. Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas. **28** (1-2): 30-43.
- Renkema, J. M., Miller, M., Fraser, H., Légaré, J-PH., Hallett, R. H.** (2013). First records of *Zaprionus indianus* Gupta (Diptera: Drosophilidae) from commercial fruit fields in Ontario and Quebec, Canadá. Journal of the Entomological Society of Ontario. **144**: 125-130.
- Ribeiro, M. R., Gracioli, G., Paiva, F.** (2012). Diptera, Drosophilidae, *Zaprionus indianus* Gupta, 1970: distribution extension for the state of Mato Grosso do Sul, Brazil. Check List. **8** (1): 175-176.
- Setta, N. & Carareto, C. M. A.** (2005). Fitness components of a recently-established population of *Zaprionus indianus* (Diptera, Drosophilidae) in Brazil. Iheringia, Série Zoologia. **95** (1): 47-51.
- Soto, I., Corio, C., Fanara, J. J., Hasson, E.** (2006). First record of *Zaprionus indianus* Gupta, 1970 (Diptera, Drosophilidae) in Argentina. Drosophila Information Service. **89**: 13-14.
- Steck, G. J.** (2005). *Zaprionus indianus* Gupta (Diptera: Drosophilidae), A Genus and Species New to Florida and North America. Pest Alert, Florida Department of Agriculture and Consumer Services, Division of Plant Industry. DACS-P-01677. Fecha de consulta: junio 19 de 2019. Disponible en: https://www.freshfromflorida.com/content/download/66384/1600973/Pest_Alert_-_Zaprionus_indianus_Gupta.pdf
- Tidon, R., Ferreira, D., Ferreira, B.** (2003). Impact of the colonisation of *Zaprionus* (Diptera, Drosophilidae) in different ecosystems of the Neotropical Region: 2 years after the invasion. Biological Conservation. **112**: 299-305.
- T'Oma, A., Rahmman, A., Van der Linde, K.** (2010). First records of *Zaprionus indianus* (Diptera: Drosophilidae) from the Basra governorate in Iraq. Drosophila Information Service. **93**: 197-200.
- Van der Linde, K., Steck, G. J., Hibbard, K., Birdsley, J. S.** (2006). First records of *Zaprionus indianus* (Diptera: Drosophilidae), a pest species on commercial fruits from Panama and the United States of America. Florida Entomologist. **89** (3): 402-404.
- Van der Linde, K.** (2010). *Zaprionus indianus*: species identification and taxonomic position. Drosophila Information Service. **93**: 95-98.
- Vargas-Garzón, B. & Molina-Prieto, L. F.** (2010). Cinco árboles urbanos que causan daños severos en las ciudades. Revista Nodo. **5** (9): 115-126.
- Vilela, C. R.** (1999). Is *Zaprionus indianus* Gupta, 1970 (Diptera, Drosophilidae) currently colonizing the Neotropical región? Drosophila Information Service. **82**: 37-39.
- Yassin, A. & David J. R.** (2010) Revision of the Afrotropical species of *Zaprionus* (Diptera, Drosophilidae), with descriptions of two new species and notes on internal reproductive structures and immature stages. ZooKeys. **51**: 33-72. Doi: 10.3897/zookeys.51.380

Original article

Notes on the genus *Eufriesea* in Colombia: Description of the female of *Eufriesea dressleri* (Kimsey, 1977) and extension of the distribution range of four species of the genus

Notas sobre el género *Eufriesea* en Colombia: descripción de la hembra de *Eufriesea dressleri* (Kimsey, 1977) y extensión del rango de distribución de cuatro especies del género

✉ Carlos Andrés Londoño-Carvajal^{1,2,*}, ✉ Sandra Inés Uribe-Soto^{1,2,3},
✉ Allan Henry Smith-Pardo³

¹Grupo de Investigación en Sistemática Molecular, Universidad Nacional de Colombia, Medellín,

²Museo Entomológico Francisco Luis Gallego, Universidad Nacional de Colombia, Medellín

³Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

Abstract

In this paper, we present an update of the information concerning the genus *Eufriesea* for Colombia. We describe the female *Eufriesea dressleri* (Kimsey, 1977), the only female of the *elegans* group not yet described. A taxonomic key is proposed for its identification and the range of distribution of *Ef. dressleri*, *Eufriesea concava*, *Eufriesea magretti*, and *Eufriesea pulchra* is extended for Colombia including new altitudinal records.

Keywords: Orchid bees; *elegans* group; Euglossini; Taxonomic keys.

Resumen

En este documento presentamos una actualización de la información concerniente al género *Eufriesea* para Colombia. Se describe la hembra de *Eufriesea dressleri* (Kimsey, 1977), que era la única hembra del grupo *elegans* aún no descrita. Se propone una clave taxonómica para su identificación y se extiende el rango de distribución de *Eufriesea dressleri*, *Eufriesea concava*, *Eufriesea magretti* y *Eufriesea pulchra* para Colombia, incluidos nuevos registros altitudinales.

Palabras clave: Abejas de las orquídeas; Grupo *elegans*; Euglossini; Claves taxonómicas.

Introduction

Eufriesea Cockerell, 1908, is the second most diverse genus of the tribe Euglossini (Hymenoptera: Apidae: Apinae). The most recent list of species and synonyms of the genus was produced by Nemésio & Rasmussen (2011), who proposed a total of 66 valid names. After this work, Nemésio & Santos-Júnior (2013) described *Eufriesea zhangii* and González & Griswold (2017) described three new species more: *Eufriesea engeli*, *Eufriesea barthelli*, and *Eufriesea oliveri* (González, *et al.*, 2017) thus completing 70 species registered for the genus.

Despite being the second most diverse genus of the tribe Euglossini, the high seasonality of its species, the frequent emergence in the high rainy season, and its long periods of diapause (Kimsey, 1982) makes *Eufriesea* a genus with few representatives in entomological collections (Nemésio, 2011).

Citation: Londoño-Carvajal CA, Uribe-Soto SI, Smith-Pardo AH. Notes on the genus *Eufriesea* in Colombia: Description of the female of *Eufriesea dressleri* (Kimsey, 1977) and extension of the distribution range of four species of the genus. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):516-526, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1347>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Corresponding autor:**

Carlos Andrés Londoño-Carvajal;
calondonoc@unal.edu.co

Received: November 17, 2020

Accepted: April 6, 2021

Published: June 17, 2021



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

The species *Eufriesea dressleri* (Kimsey, 1977) was described only based on male specimens (holotype and seven paratypes data: Male, Piña area, Canal Zone, Panama, V-18-1968 (R.L. Dressler, UCD)) due to the lack of female specimens. The original description also provided the diagnosis of the species and compared it with *Eufriesea elegans* (Lepeletier, 1841) given its similarity in the coloration patterns of the metasomal segments.

Bonilla-Gómez & Nates-Parra (1992) extended the geographical distribution of the species and reported it for the first time in the Orinoco region of Colombia. Their report, however, didn't include any coordinates data, or the record of the number of specimens found, nor the collections where the specimen were stored. Furthermore, Ramírez, *et al.* (2002) reported the presence of this species in the Orinoco region of Colombia and hypothesized its possible distribution in the Pacific Region of the country. The same document also mentioned that both sexes of the species were known and they were present in two biological collections: the *Museu de Zoologia* at the *Universidade Federal do Paraná*, Curitiba, Brazil (DZUP), and the University of Florida, Herbarium U.S.A (FLAS) suggesting that identifications of female specimens of *Ef. dressleri* had probably resorted to the original male-based description since the species of the “*elegans* group” of *Eufriesea* do not show significant differences in the coloration patterns (other than the genitalia) between males and females of the same species.

It is also possible that *Ef. dressleri* females have been identified in other collections without an official description for the females of the species as happened with *Eufriesea nigrohirta* (Friese, 1899) (see Nemésio, 2005). However, the problem of the lack of a comprehensive description of the female persists, which may result in the misidentification of *Ef. dressleri* females or, conversely, that of females from similar species such as *Ef. elegans* misidentified as *Ef. dressleri*.

Methods

A total of 118 specimens of *Eufriesea* spp. from Colombian entomological collections were examined for this work: *Colección Entomológica de la Universidad de Antioquia* (CEUA) in Medellín (17), the *Museo Entomológico Francisco Luis Gallego* at *Universidad Nacional de Colombia* (MEFLG) in Medellín (97), and the *Museo Entomológico de Piedras Blancas* (MEPB) in Guarne (4).

As for the geographical data, the published information available to update the geographical distribution of species only provides the names of the departments or regions; therefore, to assign a location on the map, we selected the urban areas of these departments as reference points. For the material reviewed in the collections with no coordinates or height above sea level, we used digital elevation model (DEM) maps in the Qgis 3.10.4-A Coruña software to infer these data from the locality recorded on the labels. Inferred data appear in square brackets and the morphological terminology follows Kimsey (1982). We used a Leica EZ4 W stereomicroscope to describe the *Ef. dressleri* female.

Results

We found 11 species of *Eufriesea* out of the approximately 30 estimated for Colombia (Bonilla-Gómez & Nates-Parra, 1992; Ramírez, *et al.*, 2002). The four species presenting new distribution ranges for the country included *Ef. dressleri* with three specimens, two of them females, used to describe the species allotype.

A male *Ef. dressleri* was identified from the material at the *Museo Entomológico Francisco Luis Gallego* (Figures 1A-B) collected by Francisco L. Gallego in 1949, in addition to a female (Figures 1C-D) from the same collection, which resembled the male in its coloration pattern; this specimen was, however, identified as *Eufriesea* aff. *elegans* by A. H. Smith-Pardo and was collected by the same entomologist in 1997 in Porce, Antioquia, Colombia. We also found a female in the CEUA collection, which was erroneously identified as *Eufriesea pulchra* (F. Smith) by L. Elorza.

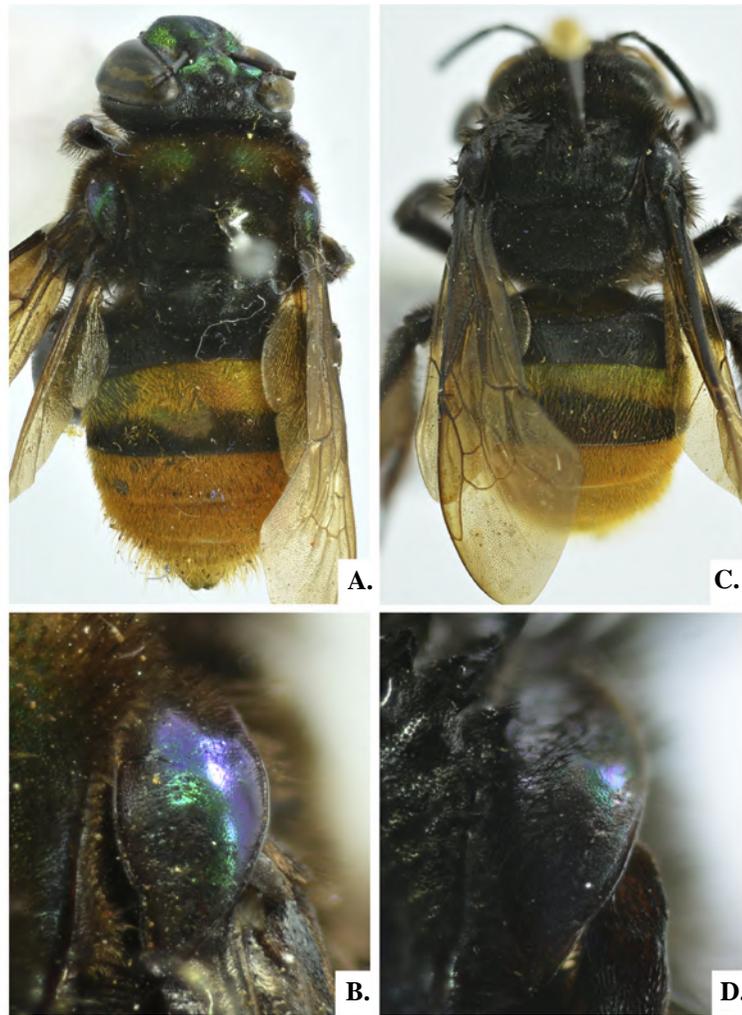


Figure 1. Dorsal habitus and tegulae of *Ef. dressleri*. **A, B.** Male. **C, D.** Female.

In terms of the differences between *Ef. dressleri* and *Ef. elegans*, the latter has a tongue that reaches the second sternite (S2); when we studied the specimen identified as *Eufriesea* aff. *elegans* we found that it did not match this description and that its tongue only reached the midcoxa. Besides, we also observed differences in the metasomal coloration patterns, the body length, the integument coloration, as well as a variation in sculpture and shape of clypeus that made the specimen closer to the description of the *Ef. dressleri* male than to that of the *Ef. elegans* female.

***Eufriesea dressleri* (Kimsey, 1977)**

Euplusia dressleri Kimsey, 1977: 12

Material examined. 1 Male; Colombia, Antioquia, Turbo; [8°5' N, 76°43' W]; [5 m a.s.l.]; ABR-1949; Francisco Luis Gallego, [leg]; *Euplusia* sp.; MEFLG NC 35923. 1 Female; Colombia, Antioquia, Porce, Santa Lucía P; [6°48' N, 75°08' S]; [860 m a.s.l.]; AGO-12-1997; Jama; Allan Smith-Pardo. [leg]; *Eufriesea* aff. *elegans*, Allan Smith-Pardo [Det]; 10-12 hrs; MEFLG NC 34856 • 1 Female; Colombia, Antioquia, Puerto Nare, Vda Caño Seco, Hda La Brasilia; [6°12' N, 74°37' W]; 380 m a.s.l.; OCT-09-2004; T. vannsommer; Castaño & Vélez [legs]; *Eufriesea pulchra*, Liliana Elorza [Det], SEP-30-2001; CEUA 16163.

Additionally, we reviewed photographs of the paratype of *Eufriesea dressleri* (**Figure 2**)

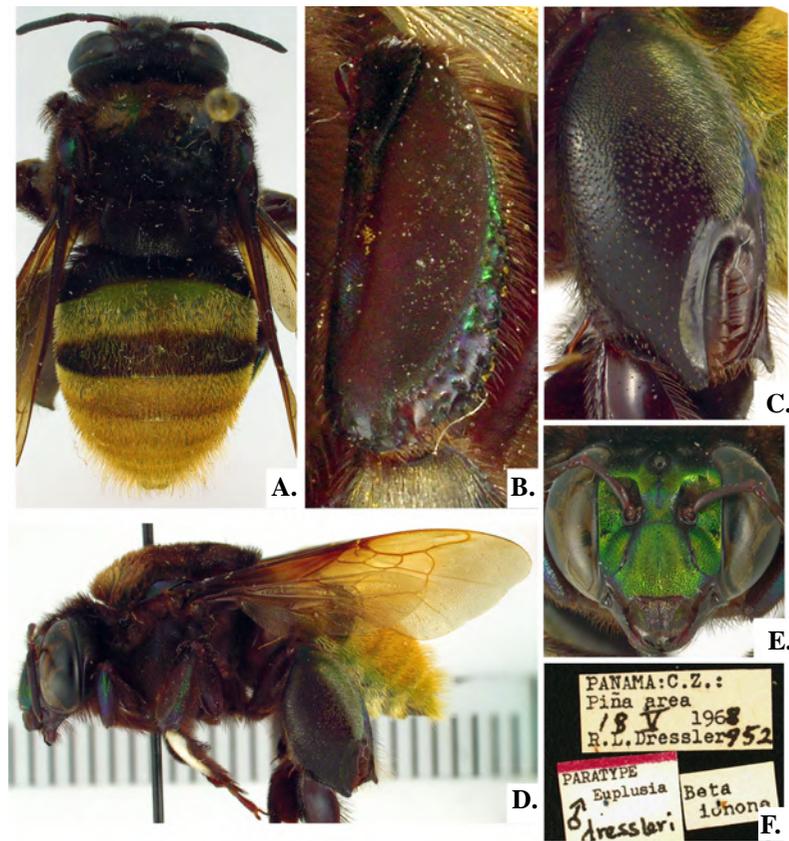


Figure 2. Paratype of *Ef. dressleri*. **A.** Dorsal habitus. **B.** Mid tibia. **C.** Hind tibia. **D.** Lateral habitus. **E.** Face. **F.** Labels.

Males:

Length = *approx.* 20 mm, maximum width of the mesosoma = 7.5 mm, length of the forewing = *approx.* 15 mm. Tegulae green (**Figure 1B**), face and clypeus green with slight coppery hues, covered with scattered brown setae, labrum black (**Figure 3A**) with green hues in lateral areas and brown setae scattered in the discal region and denser in the sides (**Figure 3B**), rest of the head black with black setae. Antennal depression with light yellow setae in the antenocular area. Mesoscutal patches green with light brown setae, rest of mesoscutum dark green to black covered with dark brown to black setae. Mesoscutellum black with green highlights and black short setae. Mesopleura entirely dark green with brown setae.

Description Female:

General color and vestiture. Clypeus dark green (**Figure 3C**), covered with scattered dark brown setae of different lengths (**Figure 3D**), some as long as the vertex setae. Labrum black with metallic highlights in the basal half and covered with dense dark brown setae of different lengths. The base of the mandibles black with light metallic highlights. Frons and vertex black with bronze hues, gena black with purple hues and dark brown setae, vertex with long black setae (2,5 ocellar diameter -OD-), frons, and vertex black with bronze hues and long black setae. Antennal depression with light brown setae on the antenocular area. Mesoscutum dark green, almost black, with dense black setae and bronze highlights. Mesoscutellum dark purple with bronze-green hues and black setae, setae longer in the distal half. Tegulae dark green with almost half black (**Figure 1D**). Mesopleura black with black setae. First tergite (T1) dark brown with black setae. T2 with the anterior half green with yellow hues covered with yellow setae and the posterior half copper with copper

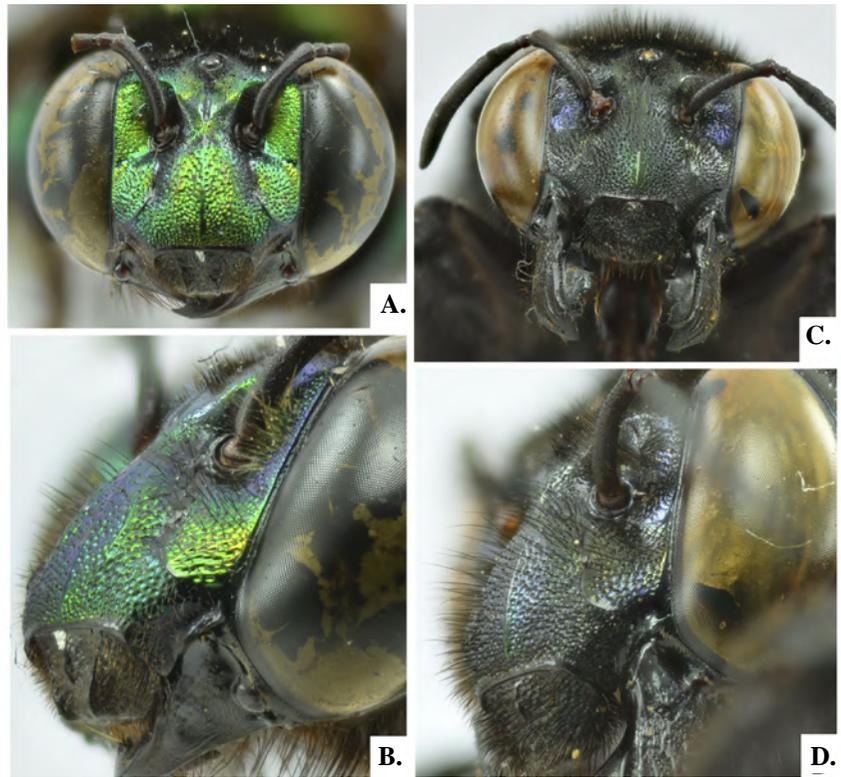


Figure 3. Face of *Ef. dressleri*. **A, B:** Male. **C, D:** Female

highlights covered with black setae. The first fourth of T3 red copper with yellow setae. Last three-fourths of T3 to T6 bronze with yellow setae; T5 and T6 setae twice as long as T3 setae. S2 with basal two-thirds dark brown and covered with scattered yellow setae interspersed with some brown setae. Last one-third of S2 and S3-S6 with yellow setae. Setae on the sides of S6 longer and more erect than its discal setae.

Head. Clypeus with a thin ridge without puncture and two barely visible welts. Labrum with a ridge in the first basal third; maximum head width 6.5 mm. Upper inter-orbital distance = 3.1 mm, eye length = 4.3 mm, scape length = 1.8 mm, tongue in repose = 6.8 mm and reaching the midcoxa. Mandibles with four teeth, basal tooth very small and about half as wide as the second one. Epistomal suture under the tentorial pits strongly projected and forming a ridge (**Figure 3D**).

Body. Total length *aprox.* = 18 mm, maximum width of the metasoma = 7.6 mm, mesoscutellum = 4.3 mm wide and 1.8 mm long, anterior wing *ca.* = 14.5 mm.

Punctuation. Vertex with large rounded punctures, about 7 to 10 times the size of the micropunctures located in the circum-ocellar region. Punctures in frons of two different sizes, the smaller ones minute in relation to the larger ones. Clypeus with rounded punctures, integument between the epistomal suture and subantennal suture striated. Mesoscutum with dense punctures, of two sizes, the larger ones almost twice the size of the smaller ones, but more broadly distributed. Mesoscutellum with punctures of two sizes, larger ones almost three times the size of the smaller ones, distributed in equal proportions.

Male legs. Hind tibia black with a green stripe on the posterior margin and with a group of yellow setae appressed on the posterior margin (**Figure 4A**). Fore tibia and mid tibia brown with anterior side with strong hues (**Figure 4B**).

Female legs. Hind tibia brown with minute yellow setae and metallic highlights in the basal area (**Figure 4C**). Maximum width of the hind tibia = 3.0 mm. Fore tibia and mid tibia brown with green and purple highlights on the outside (**Figure 4D**).

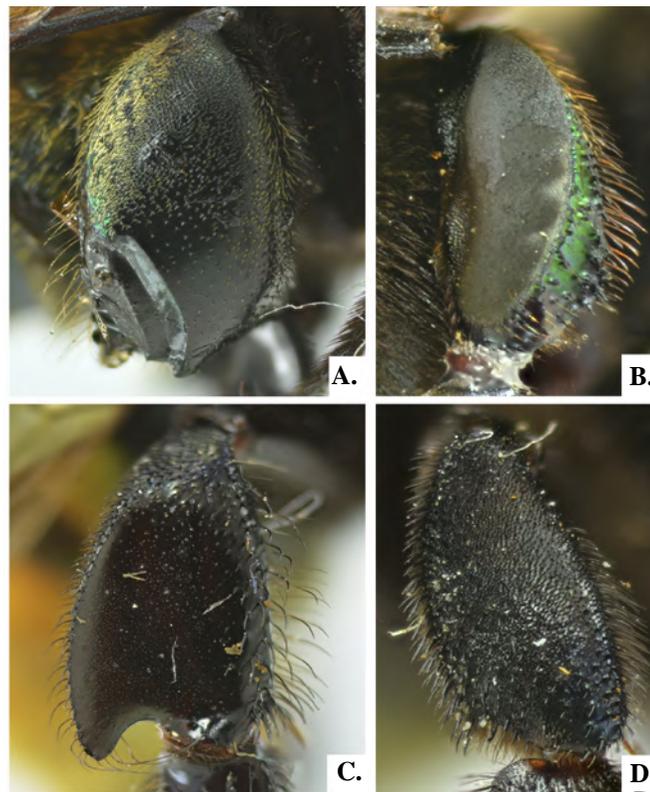


Figure 4. Legs of *Ef. dressleri*. **A-B:** Male legs: **A.** Hind tibia. **B.** Mid tibia. **C-D.** Female legs: **C.** Hindtibia. **D.** Midtibia.

Diagnosis. This species is similar to *Ef. elegans* but can be distinguished because the length of the tongue does not exceed the midcoxa (in *Ef. Elegans* it reaches S2). Additionally, the posterior band of T2 occupies no more than the last two-thirds of the tergite, whereas in *Ef. elegans* it occupies three-quarters.

This species is also similar to *Eufriesea eburneocincta* (Kimsey, 1977) but can be distinguished by the black setae of T1 (pale yellow in *eburneocincta*) and by the color patterns of the bands of T2, which in *Ef. dressleri* has an anterior band green with yellow setae, whereas in *Ef. eburneocincta* the anterior band is brown with black setae and the posterior band is copper with orange-yellow setae.

Conservation status. The Red Book of Colombian Invertebrates (Amat-García, et al., 2007) and Resolution 1912 of 2017 issued by the Colombian Ministry of the Environment place *Ef. dressleri* in the category of critically endangered (CR) species for Colombia.

Keys for *elegans* species group (females) adapted from Kimsey (1982)

- 1. Tongue in repose, reaching S2 or beyond..... 2
- Tongue in repose, not reaching S2..... 3
- 2. First 1/4 of T2 green with yellow setae, last 3/4 of T2 brown coppery to black with black setae..... *elegans* (Lepeletier)
- First 1/4 of both T2 and T3 blackish or dark greenish with black setae, last 3/4 of T2 yellowish green to brassy with yellow setae..... *duckei* (Friese)
- 3. T2 banded, anterior half blackish with black setae, posterior half coppery to brassy with yellowish setae..... *eburneocincta* (Kimsey)
- T2 banded, anterior half brassy with yellow setae, posterior half brown to copper with blackish setae and some copper hues..... *dressleri* (Kimsey)

Extension of the distribution range of some *Eufriesea* species in Colombia:***Eufriesea concava* (Friese, 1899)***Euglossa (Eulema) mexicana concava* Friese, 1899

Material examined. 1 Male; Colombia, Antioquia, Porce, San Ignacio; [6°48' N, 75°08' S]; [860 m a.s.l.]; AGO-29-1997; pescado; Allan Smith-Pardo, *leg*; *Eufriesea* aff. *concava*, Allan Smith-Pardo, Det; MEFLG NC 34835 • 5 Females; same data as for preceding, Picardía; OCT-01-1997; pescado; Allan Smith-Pardo, *leg*; rastrojo alto; *Eufriesea concava*, Allan Smith-Pardo, Det; MEFLG NC 34840, 34846, 34848, 34850, 34851 • 3 Females; same data as for preceding; OCT-09-1997; Jama; MEFLG NC 34844, 34855, 34863 • 1 Male; same data as for preceding; MEFLG NC 34857 • 1 Female; same data as for preceding; OCT-01-1997; MEFLG NC 34841 • 2 Females; same data as for preceding, Cancana; SEP-26-1997; MEFLG NC 34836, 34853 • 2 Females; same data as for preceding, San Ignacio; AGO-29-1997; Bosque; MEFLG NC 34838, 34847 • 2 Females; same data as for preceding, Tenche; OCT-03-1997; Jama; MEFLG NC 34839, 34849 • 1 Female; same data as for preceding; Escencia; OCT-10-1997; MEFLG NC 34845 • 1 Female; same data as for preceding; Normandía; Jama; OCT-30-1997; MEFLG NC 34837 • 1 Female; same data as for preceding; pescado; SEP-18-1997; MEFLG NC 34854 • 2 Females; same data as for preceding; Fosforito; SEP-24-1997; MEFLG NC 34842, 34843 • 1 Female; same data as for preceding; La Calandria; OCT-31-1997; MEFLG NC 34852 • 2 Males; Colombia, Antioquia, Ciudad Bolívar; 5°48'52" N, 76°1'38" W; 1474 m a.s.l.; SEP-26-2009; Eucalipto; R.I Vélez *leg*; 10:00-12:00 hrs; *Eulaema tropica*, Allan Smith-Pardo, OCT-06-2009; MEFLG NC 35891, 35892 • 1 Female; Colombia, Santander, Cimitarra, Vda Primavera, Km4, Hda el Bosque; [6°18' N, 73°57' W]; [150 m a.s.l.]; OCT-09-2001; VSR pescado; Castaño and Vélez [*leg*]; CEUA 18367 • 3 Females; Colombia, Risaralda, La Florida, Santuario de Flora y Fauna Otún Quimbaya; [4°44' N, 75°34' W]; [1900 m a.s.l.]; MAY- 05-2002; VSR Pescado; CO24; CEUA 116195-116197 • 1 Male; Colombia, Antioquia, Andes, Los Farallones; [5°39' N, 75°52' W]; 1800 m a.s.l.; OCT-18-2014; Jama; J. Castro, *leg*; MEFLG NC 34879.

Ramírez, et al. (2002) proposed a possible distribution of *Ef. concava* (**Figures 5A-B**) in the Colombian Pacific and Amazon regions at a maximum altitudinal distribution of 1100 m.a.s.l., whereas **Parra & Nates-Parra** (2012) proposed distribution of this species in the departments of Amazonas, Chocó, Nariño, and Putumayo. The only report of this species for the country is by **Smith-Pardo** (1999) in his Master's degree thesis, which was unknown to the previous authors. The report was for Yolombó, Antioquia, at the altitudinal range mentioned by **Ramírez, et al.** (2002).

Eufriesea dressleri* (Kimsey, 1977)Euplusia dressleri* Kimsey, 1977

Material examined. 1 Female; Colombia, Antioquia, Porce, Santa Lucía P; [6°48' N, 75°08' S]; [860 m a.s.l.]; AGO-12-1997; Jama; Allan Smith-Pardo. [*leg*]; *Eufriesea* aff. *elegans*, Allan Smith-Pardo [Det]; 10-12 hrs; MEFLG NC 34856 • 1 Female; Colombia, Antioquia, Puerto Nare, Vda Caño Seco, Hda La Brasilia; [6°12' N, 74°37' W]; 380 m a.s.l.; OCT-09-2004; T. van Sommer; Castaño & Vélez [*legs*]; *Eufriesea pulchra*, Liliana Elorza [Det], SEP-30-2001; CEUA 16163. 1 Male; Colombia, Antioquia, Turbo; [8°5' N, 76°43' W]; [5 m a.s.l.]; ABR-1949; Francisco Luis Gallego, [*leg*]; *Euplusia* sp.; MEFLG NC 35923.

This species was reported in Colombia for the Orinoquía region by **Ramírez, et al.** (2002); **Parra & Nates-Parra** (2012) reported it for the departments of Meta (Orinoquía region) and Valle del Cauca (Pacific region).

Eufriesea magretti* (Friese, 1899)Euglossa (Eumorpha) magretti* Friese, 1899*Euglossa (Eumorpha) andina* Friese, 1925 (Synonymy by Kimsey (1982))

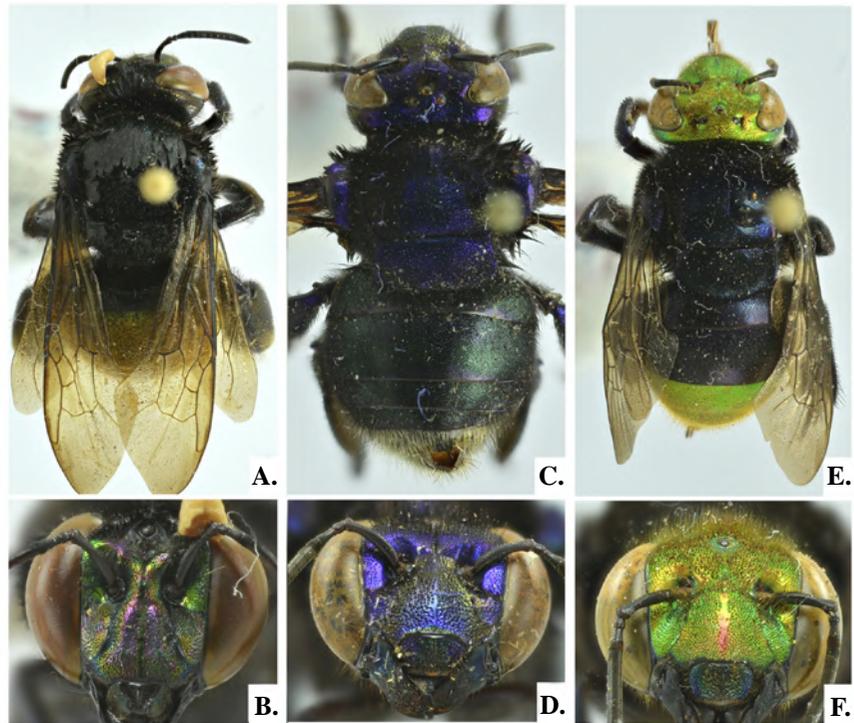


Figure 5. Dorsal and frontal habitus of *Eufriesea* spp. **A, B.** *Ef. concava* (male). **C, D.** *Ef. magretti* (female). **E, F.** *Ef. pulchra* (female)

Material Examined. 2 females; Colombia, Antioquia, Vereda el Carbono; 6°20' 38,8" N, 76°07' S; 1879 m a.s.l.; AGO-12-2007; Jama; A.L. Montoya G [leg]; CEUA 116199,116200. • 1 Female; Colombia, Santander, Carmen del Chucurí, Vereda Alto Cascajales; [6°41'53.84"N, 73°30'40.18" W]; 1200 m a.s.l.; OCT-19-2000; VSR, Pescado; Duque y A. Vélez [leg]; CEUA 45053.

This species (**Figure 5C-D**) was reported for Colombia by **Kimsey** (1982) in the department of Magdalena. **Ramírez, et al.** (2002) indicated the presence of this species in the Atlantic and Orinoco regions while **Parra & Nates-Parra** (2012) confirmed **Kimsey's** record (1982) for the department of Magdalena and recorded it for the first time for Norte de Santander.

***Eufriesea pulchra* (Smith, 1854)**

Euglossa pulchra Smith, 1854

Material examined. 1 Male; Colombia, Antioquia, San Luis; [6°02' N, 74°59' S]; [1080 m a.s.l.]; DIC-1982; Eugenol; A. Molina P. [leg]; *Eufriesea* sp.; MEFLG NC 34870 • 1 Male; Colombia, Antioquia, río Cocorná; AGO-1982; Salicilato de metilo; *Eufriesea pulchra*, A. Molina P. [Det]; MEFLG NC 34869 • 1 Female; same data as for preceding, Porce; [6°48' N, 75°08' S]; [860 m a.s.l.]; AGO-26-1997; pescado; Allan Smith-Pardo, leg; *Eufriesea purpurata*, Allan Smith-Pardo, Det; MEFLG NC 34866 • 1 Male; Colombia, Chocó, Nuquí, Finca Pjivá; [5°42' N, 77°16' S]; [0 m a.s.l.]; JUL-09-2005; Manual; P. Duque [leg]; *Eufriesea fasciata*, Smith and González, 2006, [Det]; MEPB 9279 • 2 Males; Colombia, Antioquia, Sonsón, R.N Cañon del Río Claro; 350 m a.s.l.; NOV-06-2007; Salicilato de metilo; A. Vélez [leg]; *Eufriesea sp.*, J. Jaramillo Silva [Det]; MEPB 11624 - 11625 • 1 Male; same data as for preceding; San Luis, Cañon del Río Claro; 5°53'6,87" N, 74°5'4,88" W; [890 m a.s.l.]; NOV-06-2007; Salicilato de metilo; A. Vélez, N. Uribe And A. Vahos [legs]; CEUA 109357 • 1 Male; same data as for preceding; Anorí, El Roble, El Arrierito Antioqueño; 1600-1700 m a.s.l.; 6°59'5,3" N, 75°6'42,0" W; MAY-25/27-2012; VSR pescado; En Bosque; CEUA

63731 • 1 Male; same data as for preceding; Jama; En Bosque; CEUA 63733 • 1 Female; Colombia, Antioquia, Puerto Nare, Vda La Mina; [6°12' N, 74°37' W]; 220 m a.s.l.; SEP-2001; VSR; Castaño And Vélez [*legs*]; CEUA 116193 • 1 Female; Colombia, Risaralda, La Florida, Santuario de Flora y Fauna Otún Quimbaya; [4°44' N, 75°34' W]; [1900 m a.s.l.]; MAY-07-2002; VSR Pescado; CO24 Cód; CEUA 116194.

Kimsey (1982), **Fernández** (1995), and **Ramírez, et al.** (2002) had pointed at the distribution of this species for the Amazon region, the latter adding the Orinoco region. **Parra & Nates-Parra** (2012) reported this species (**Figure 5E-F**) in the departments of Amazonas, Boyacá, Chocó, Guainía, Meta, Nariño, Valle del Cauca, and Vaupés.

Most of the records of *Ef. pulchra* are below 1000 m.a.s.l., only one specimen deposited in the Snow Entomological Collection from Tarata, Bolivia, collected in 1900, has a label with an altitude near 2800 m.a.s.l (**Bentley, A. & Thomas, J., 2021**). The location registered here for the facilities of the Otún Quimbaya Flora and Fauna Sanctuary has an altitude of 1900 m.a.s.l. However, it should be noted that the label did not have coordinates, so the height inferred for this place corresponds to the Sanctuary's hotel facilities, but within a 5 km radius from them, there are altitudes over 3100 m.a.s.l. Considering that species of this genus can travel up to 25 km in search of food and provisions for the nest (**Janzen, 1971**), this could be the greatest altitudinal record known for this species. For the time being, it is the highest altitude record of this species in Colombia.

In the present study, we report *Ef. concava* for the first time for the departments of Santander and Risaralda (**Figure 6A**) extending its distribution 230 km to the south and nearly 100 km to the east of the country. It also extends its altitudinal distribution to 1900

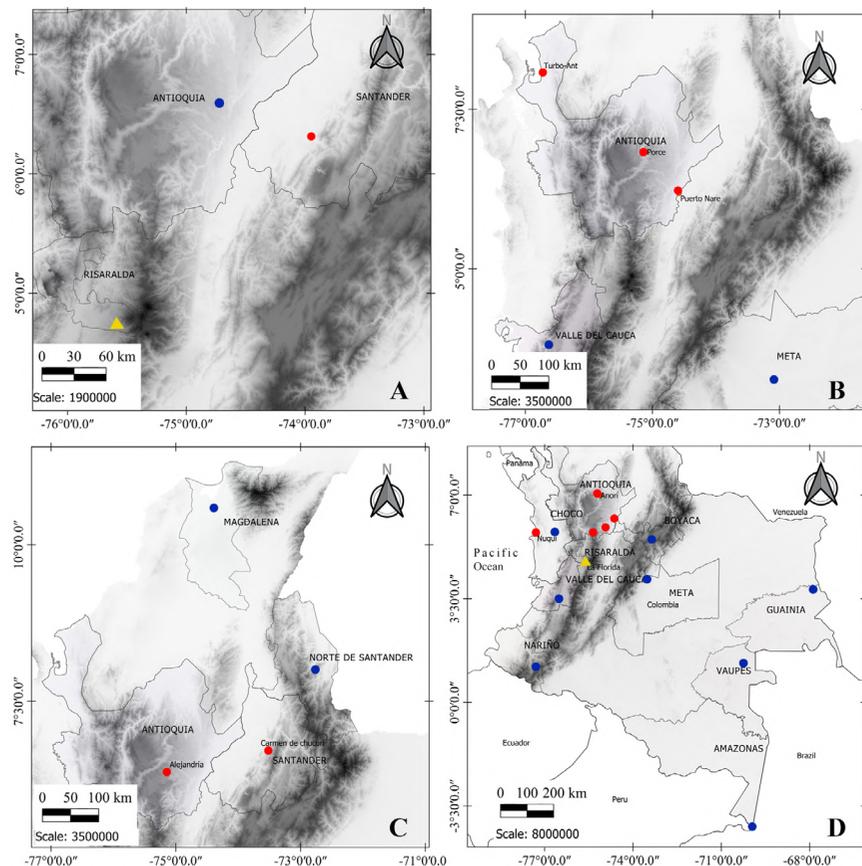


Figure 6. Distribution of species of *Eufriesea* in Colombia. Blue dots indicate literature reports, red dots are new records, yellow triangles represent new altitudinal distribution for the country. **A.** *Ef. concava*. **B.** *Ef. dressleri*. **C.** *Ef. magretti*. **D.** *Ef. pulchra*

m a.s.l. Also, the three new records of *Ef. dressleri* herein correspond to the department of Antioquia (**Figure 6B**). These records extend *Ef. dressleri* range of distribution 525 km north of Colombia and constitute the first ones for the Andean region.

Here we report *Ef. magretti* for the first time for the departments of Santander and Antioquia extending its range of distribution 320 km southwest of Colombia (**Figure 6C**). Besides, these new records increase its altitudinal distribution to 1879 m.a.s.l. Previously, **Ramírez, et al.** (2002) had registered an altitudinal distribution for the species of 110-1600 m.a.s.l. As well as we report *Ef. pulchra* for the first time for the departments of Risaralda and Antioquia (**Figure 6D**) and extend its distribution 70 km west to the Pacific coast and 140 Km to the north of the country.

Discussion

Nearly 50% of the holotypes of *Eufriesea* are females. For 90% of these species, the association and description of males has been possible (**Nemésio, 2005; Nemésio, 2011; Le Goff, 2012**) thanks to the use of chemical compounds as attractants. On the other hand, only 65% of the species with a male as holotype has a description of females, which makes it difficult to identify *Eufriesea* spp. females overall and explains why many female specimens of this genus deposited in collections have no identification at species level.

Furthermore, the high seasonality of the species in this genus, as well as their sensitivity to changes in their ecosystem (**Kimsey, 1982**) and their scarce representation in collections (**Nemésio, 2011**) make it really difficult to be certain of accurate distribution ranges allowing for their exact location in the Neotropics.

We believe that more rigorous studies and revisions of the specimens deposited in collections worldwide, as well as further descriptions of undescribed females to allow successful associations between males and females of the same species are a fundamental tool to increase the knowledge of the diversity of this genus and that of the country's fauna by means of the construction of accurate distribution maps of the different species by using males and/or females for their plotting.

Author contributions

CALC examined and identified the material and provided the photographs. AHSP assisted in the identification and taxonomic confirmation of specimens. SIUS helped to interpret results, reviewed, and corrected the document. All authors contributed to the writing of the manuscript.

Conflicts of interests

None of the authors have any conflicts of interests to disclose.

References

- Amat-García, G., Amat-García, E., Andrade-C, M. G., Rodríguez-Mahecha, J. V.** (2007). Libro rojo de los invertebrados terrestres de Colombia. Bogotá, Colombia: Instituto de Ciencias Naturales- Universidad Nacional de Colombia, Conservación Internacional Colombia Instituto Alexander von Humboldt, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Crédito Territorial. 204 p.
- Bentley, A. & Thomas, J.** (2021). Snow Entomological Museum Collection. Version 26.48. University of Kansas Biodiversity Institute. Occurrence dataset. Doi: 10.15468/fhntpy accessed via GBIF.org on 2021-03-15. <https://www.gbif.org/occurrence/785024564>
- Bonilla-Gómez, M. A. & Nates-Parra, G.** (1992). Abejas euglosinas de Colombia (Hymenoptera: Apidae) I. Claves ilustradas. *Caldasia*. **17** (1): 149-172.
- Cockerell, T. D. A.** (1908). Notes on The Bee-Genus *Exaerete*. *Psyche*. **15**: 41-42.
- Dodson, C. H., Dressler, R. L., Hills, H. G., Adams, R. M., Williams, N. H.** (1969). Biologically Active Compounds in Orchid Fragrances. *Science*. **164**: 1243-1249.
- Fernández, F.** (1995). La diversidad de los Hymenoptera en Colombia. In O. Rangel (Ed.), *Colombia diversidad biótica I. Clima. Centros de concentración de especies. Fauna reptiles, arácnidos, himenópteros* (pp. 373-442). Bogotá: Editorial Guadalupe LTDA.

- Friese, H.** (1899). Monographie der Bienengattung *Euglossa* Latreille. Természetrájsi Füzetek. **22**: 117-172.
- González, V. H., Griswold, T., Simões, M.** (2017). On the identity of the adventive species of *Eufriesea* Cockerell in the USA: Systematics and potential distribution of the *coerulescens* species group (Hymenoptera, Apidae). Journal of Hymenoptera Research. **55**: 55-101. Doi: 10.3897/jhr.55.12209
- Janzen, D. H.** (1971). Euglossine Bees Long-Distance Pollinators of Tropical Plants. Science. **171**: 203-205.
- Kimsey, L. S.** (1977). New Species of Bees in the Genus *Euplusia* and *Eufriesea*. The Pan-Pacific Entomologist. **53** (January): 8-18.
- Kimsey, L. S.** (1982). Systematics of Bees of the Genus *Eufriesea* (Hymenoptera, Apidae) California. USA: University of California press. 137 p.
- Kimsey, L. S. & Dressler, R. L.** (1986). Synonymic species list of Euglossini. Pan Pacific Entomologist. **62** (3): 229-236.
- Le Goff, G.** (2012). Une nouvelle espèce rare d'Euglossini pour la Guyane Française: *Eufriesea formosa* MOCSARY, 1908. Description de l'allotype mâle (Hymenoptera, Apidae). Osmia. **5**: 1-2. Doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.125084
- Lepeletier, de S. F.** (1841). Histoire naturelle des insectes. Hyménotères. In Librairie encyclopédique de Roret (Vol. 2). Doi: 10.1017/CBO9781107415324.004
- Nemésio, A.** (2005). Description of the male *Eufriesea nigrohirta* (Friese, 1899) (Hymenoptera: Apidae) with comments on the holotype, species biology and distribution. Lundiana. **6** (1): 41-45.
- Nemésio, A.** (2011). Description of the male *Eufriesea theresiae* (Mocsáry, 1908) (Hymenoptera: Apidae: Euglossina), with illustration of the holotype and comments on its geographic distribution, including a new record for the state of Pará, northern Brazil. Zootaxa. **2762**: 63-68.
- Nemésio, A., Júnior, J. E. S., Santos, F. R.** (2013). *Eufriesea zhangii* sp. n. (Hymenoptera: Apidae: Euglossina), a new orchid bee from Brazil revealed by molecular and morphological characters. Zootaxa. **3609** (6): 568-582.
- Nemésio, A. & Rasmussen, C.** (2011). Nomenclatural issues in the orchid bees (Hymenoptera: Apidae: Euglossina) and an updated catalogue. Zootaxa. **3006**: 1-42. Doi: 10.11646/zootaxa.3006.1.1
- Parra-H, A. & Nates-Parra, G.** (2012). The Ecological Basis for Biogeographic Classification: An Example in Orchid Bees (Apidae: Euglossini). Neotropical Entomology. **41**: 442-449. Doi: 10.1007/s13744-012-0069-1
- Ramírez, S., Dressler, R. L., Ospina, M.** (2002). Abejas euglosinas (Hymenoptera: Apidae) de la Región Neotropical: listado de especies con notas sobre su biología. Biota Colombiana. **3** (1): 10-192.
- Smith-Pardo, A.** (1999). Abejas (Hymenoptera: Apoidea) de la zona de influencia del Embalse Porce II (Antioquia, Colombia). Master thesis, Medellín, Antioquia.

Artículo original

Tipos de leguminosas colombianas I. (Leguminosae: subfamilia Cercidoideae), con notas sobre el género *Schnella* en Colombia

Types of Colombian legumes I. (Leguminosae: Subfamily Cercidoideae) with notes on the genus *Schnella* in Colombia

✉ Cesar Castellanos^{1,*}, ✉ Frank Vargas¹, Enrique Forero², ✉ William Guerrero-Salazar¹

¹Fundación Universitaria de San Gil – UNISANGIL, San Gil, Colombia

²Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Bogotá, Colombia

Resumen

Los ejemplares tipo son especímenes de herbario que se usan para hacer la descripción de una nueva especie de planta válidamente publicada. En este estudio se revisaron las colecciones de especies tipo de Leguminosae, subfamilia Cercidoideae procedentes de Colombia depositadas en herbarios colombianos y de otros países. La subfamilia Cercidoideae está compuesta por 14 géneros, de los cuales dos se encuentran en Colombia (*Bauhinia* y *Schnella*). Doce especies y dos variedades de estos géneros se han descrito usando colecciones originarias de Colombia. Los especímenes que las conforman se han distribuido en 19 herbarios a nivel mundial, en tanto que en herbarios de Colombia solamente existen un holotipo y un isotipo. Se presentan datos adicionales sobre las especies analizadas en cuanto a endemismos, hábito, distribución geográfica y estado de conservación. Se incluye información complementaria sobre el estado actual del conocimiento de los dos géneros de la subfamilia en el país.

Palabras clave: Colombia; Ejemplares tipo; Flora; Leguminosae.

Abstract

Type specimens are herbarium specimens on which a validly published description of a new plant species is made. We made a survey of the type specimens of the Leguminosae, subfamily Cercidoideae species collected in Colombia and deposited in Colombian and foreign herbaria. Cercidoideae subfamily is made up of 14 genera of which two are represented in Colombia (*Bauhinia* and *Schnella*). Twelve species and two varieties of these genera have been described using collections from Colombia. The specimens in these collections have been distributed in 19 herbaria worldwide while in Colombian herbaria there is only one holotype and one isotype. We present additional data on the species analyzed including their endemism, habits, geographic distribution, and conservation status and we provide information on the current state of knowledge on the two genera of the subfamily present in the country.

Keywords: Colombia; Type specimens; Flora; Leguminosae.

Introducción

Los herbarios son lugares generalmente adscritos a universidades o instituciones de investigación donde se depositan muestras botánicas que han sido correctamente identificadas (Forero, 1975). Una parte muy importante de las colecciones de herbarios son los ejemplares tipo (holotipos, lectotipos, isotipos, etc.). Un tipo representa la referencia básica y permanente asociada a los nombres científicos de las plantas; estos ejemplares son una fuente de información fundamental para los estudios taxonómicos, florísticos, etc. (Arreguín, *et al.*, 1996).

Citación: Castellanos C, Vargas F, Forero E, Guerrero W. Tipos de leguminosas colombianas I. (Leguminosae: subfamilia Cercidoideae), con notas sobre el género *Schnella* en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):527-540, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1243>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Cesar Castellanos;
cesarcas1a@gmail.com

Recibido: 21 de junio de 2020

Aceptado: 6 de abril de 2021

Publicado: 17 de junio de 2021



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

La importancia del registro de los tipos depositados en los herbarios de diferentes países fue originalmente propuesta por el naturalista colombiano Enrique Pérez Arbeláez durante una sesión plenaria de la Primera Reunión Suramericana de Botánica de Rio de Janeiro en 1938 (1938:92); en el texto de una resolución que fue aprobada por el congreso en pleno, se amplió el concepto y se incluyó el objetivo de “llevar a cabo el inventario de especies sudamericanas cuyos ejemplares se hallen en los herbarios de todo el mundo” (1938:190). La sugerencia de Pérez Arbeláez fue retomada por varios botánicos vinculados al Herbario Nacional Colombiano para diversos grupos taxonómicos (Pinto, 1960, 1976; Uribe-Urbe, 1976; Forero, *et al.*, 1977).

A partir de ese impulso inicial, el grupo de estudios sobre la familia Leguminosae, que estaba en formación en el Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, adelantó un proyecto en el mismo sentido con el resultado de la publicación de tres documentos sobre tipos de esta familia depositados en el Herbario Nacional Colombiano (Forero, *et al.*, 1983 a, b, c). Además de estos artículos, se han publicado en años recientes varios libros especializados como parte de la serie “Estudios en leguminosas colombianas” (Forero & Romero, eds., 2005; Forero, 2009; Forero & Castellanos, 2019), que incluyen tratamientos taxonómicos en los que también se registra información sobre los ejemplares tipo.

Es bien sabido que una de las familias botánicas más interesantes es la de las leguminosas, que conforman uno de los grupos de plantas con flores más extenso a nivel global, y cuyas especies se consideran de importancia ecológica y económica (Lewis, *et al.*, 2005; Legume Phylogeny Working Group - LPWG, 2017). Esta familia, que tradicionalmente se subdividía en tres familias, Mimosaceae, Caesalpiniaceae y Fabaceae o Papilionaceae (García-Barriga & Forero, 1968; Cronquist, 1968, 1981; Takhtajan, 1969), o subfamilias, Mimosoideae, Caesalpinioideae y Faboideae o Papilionoideae (Forero, *et al.*, 1983 a,b,c; Heywood, 1993; Judd, *et al.*, 1999), fue reorganizada en seis subfamilias por el LPWG (2017): Cercidoideae, Detarioideae, Dialioideae, Duparquetioideae, Caesalpinioideae (incluido el clado Mimosoide) y Papilionoideae. Todas las subfamilias tienen representantes en Colombia, con excepción de la subfamilia monoespecífica Duparquetioideae, la cual está restringida a la región de África occidental (Lewis & Castellanos, 2019).

La subfamilia Cercidoideae probablemente representa la primera ramificación dentro del linaje de las leguminosas (Bruneau, *et al.*, 2001; Herendeen, *et al.*, 2003). Recientemente, Sinou, *et al.* (2020) realizaron una reconstrucción filogenética de la subfamilia basada en datos moleculares y reconocieron 14 géneros: *Adenolobus*, *Barklya*, *Bauhinia*, *Brenierea*, *Cercis*, *Cheniella*, *Gigasiphon*, *Griffonia*, *Lysiphyllum*, *Phanera*, *Piliostigma*, *Schnella*, *Tournaya* y *Tylosema*, de los cuales solamente dos se encuentran en Colombia: *Bauhinia* y *Schnella*.

El propósito del presente trabajo fue contribuir a la iniciativa propuesta por Pérez-Arbeláez (1938), pero ampliando su cobertura con el fin de incluir tipos de leguminosas recolectados en territorio colombiano y depositados no solo en el país, sino también en diversos herbarios del mundo, así como proveer información adicional sobre cada una de las especies cuyos tipos encajan en esta categoría y sobre el estado actual del conocimiento de los géneros presentes en el país.

Se presenta aquí la primera entrega de lo que se ha programado como una serie de contribuciones que compilen la información disponible sobre la ubicación y el número de registros de colecciones tipo de especies nativas de Colombia de la familia Leguminosae, enriqueciendo el texto con datos adicionales sobre las especies analizadas, tales como endemismos, hábito, distribución geográfica y estado de conservación. Se provee, además, información complementaria sobre el estado actual del conocimiento de los dos géneros de la subfamilia presentes en el país.

Materiales y métodos

Se evaluó la información bibliográfica disponible sobre ejemplares tipo de taxones de la subfamilia Cercidoideae recolectados en Colombia. La información bibliográfica

se validó mediante consulta virtual de los herbarios BM, F, K, MA, NY, P, US y W (acrónimos según Thiers, s.f., continuamente actualizado) y se complementó con otras fuentes de información en línea como Global Plants, IPNI, Plants of the World Online y Tropicos, lo que permitió ampliar la lista de herbarios que contienen holotipos o isotipos de varios de los taxones citados. Dentro de la subfamilia se organizaron alfabéticamente los géneros y las especies. Aquí se reportan solo aquellos taxones que actualmente se consideran válidos para la subfamilia Cercidoideae y a cada uno se le adicionaron únicamente los sinónimos cuyos tipos proceden de Colombia. Otros datos incorporados son: localidad del tipo, herbarios donde reposan los tipos, hábito, distribución y estado de conservación.

Resultados

Leguminosae, subfamilia Cercidoideae

La subfamilia Cercidoideae está representada en Colombia por los géneros *Bauhinia* y *Schnella*; de estos géneros se encontraron 64 registros de ejemplares tipo, entre holotipos e isotipos, recolectados en diferentes localidades de Colombia. Estos ejemplares están distribuidos en nueve herbarios americanos y diez europeos. En Colombia solo existen dos registros de ejemplares tipo en herbarios, un holotipo y un isotipo, ambos de especies del género *Bauhinia*.

En lo que concierne a los géneros presentes en Colombia, la colección más numerosa de tipos de Cercidoideae se encuentra en Europa, donde se localizaron 35 registros, en tanto que en herbarios americanos existen 29 registros.

Género Bauhinia L.

Sobre el género *Bauhinia sensu stricto* en Colombia, se tiene información actualizada gracias a un estudio reciente publicado por **Castellanos & Forero** (2019). Estos autores registraron un total de 16 especies nativas, de las cuales tres son endémicas del territorio nacional. De las 16 especies conocidas en Colombia, cinco especies (*B. aculeata*, *B. conceptionis*, *B. geniculata*, *B. gorgonae* y *B. picta*) y una variedad (*B. petiolata* var. *petiolata*) fueron descritas utilizando especímenes recolectados en el país. *Bauhinia picta* y *B. aculeata* son especies ampliamente distribuida en Colombia, en tanto que *B. geniculata* se conoce de los departamentos de Risaralda y Valle del Cauca y *B. conceptionis* y *B. gorgonae* son especies endémicas en los departamentos de Chocó y Cauca, respectivamente.

Colecciones históricas. El ejemplar tipo más antiguo corresponde a *B. aculeata*, cuya información publicada por Linneo y data de 1753. Se trata de una colección de origen incierto, citada como de “Colombia o Venezuela” y que hace parte del herbario Clifford con el número 156 (**Castellanos & Forero**, 2019). El tipo de la especie *B. petiolata* fue recolectado por Sinforoso Mutis, pero con fecha desconocida, pues hizo parte del trabajo de campo de la Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada que se desarrolló entre 1783 y 1816. Las fechas que aparecen en el prólogo, “1760–1808”, cubren el periodo desde la llegada de José Celestino Mutis a la Nueva Granada en 1760 hasta su muerte en 1808. De igual antigüedad es el tipo de *B. picta* recolectado en el departamento de Santander por Humboldt & Bonpland en 1801, poco después de su arribo a la Nueva Granada (mayo de 1801). Por otra parte, la colección tipo más reciente es la de *B. geniculata*, obtenida en el departamento de Risaralda por P. Silvestone–Sopkin, J. Giraldo y M. Cabrera en 1989.

Colecciones en herbarios. Los 29 registros de ejemplares tipo encontrados están distribuidos en siete herbarios europeos y seis herbarios en las Américas (**Tabla 1**) y de ellos, solo dos, el holotipo de *B. geniculata* y un isotipo de *B. gorgonae*, están depositados en herbarios colombianos, el primero en el de la Universidad del Valle (CUVC) y el segundo en el Herbario Nacional Colombiano (COL).

En cuanto al porcentaje de registros de colecciones tipo en herbarios, se encontró que el 20,7 % de los tipos está depositado en el Herbario Nacional de los Estados Unidos – *Smithsonian Institution* (US) (seis tipos), seguido por los herbarios europeos BM, MA y P, cada uno con el 13,8 % del total (cuatro tipos cada uno), en tanto que los demás herbarios cuentan con uno o dos ejemplares tipo (**Figura 1**). En herbarios europeos se han encontrado 17 ejemplares tipo de especies colombianas de *Bauhinia*, y en herbarios americanos existen 12. En relación con las especies, los tipos de *B. gorgonae* están distribuidos en cinco herbarios, seguidos por los tipos de *B. picta* y *B. kalbreyeri* (sinónimo de *B. picta*) cada una distribuida en tres herbarios; los tipos de las demás especies están depositados en uno o dos herbarios (**Tabla 1**).

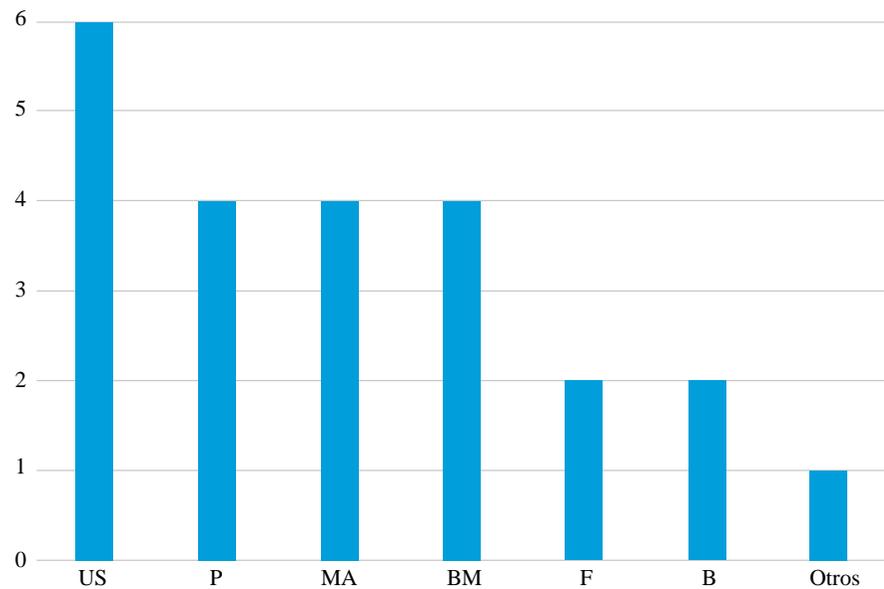


Figura 1. Distribución por herbarios de ejemplares tipo de *Bauhinia* recolectados en Colombia

Tabla 1. Herbarios que poseen colecciones tipo procedentes de Colombia (Leguminosae: Cercidoideae: *Bauhinia*)

Taxon	Colombia		Estados Unidos						Europa					
	COL	CUVC	F	NY	US	USF	B	BC	BM	K	MA	P	W	
	Iso	Hol	Hol	Hol	Hol	Iso	Iso	Iso	Iso	Hol	Iso	Hol	Iso	Iso
<i>Bauhinia aculeata</i>									1					
<i>B. conceptionis</i>				1	1									
<i>B. emarginata*</i>								1						
<i>B. geniculata</i>		1				1								
<i>B. gorgonae</i>	1				1	1	1	1	1					
<i>B. kalbreyeri*</i>			1		1					1		1		
<i>B. petiolata var. petiolata</i>					1						1	2		
<i>B. picta</i>							1					1	2	1
<i>B. rotundata*</i>									1					
<i>B. schultzei*</i>			1											
<i>Amaria sessilifolia*</i>						1					1			

Especies actualmente válidas en negrita y letra cursiva, los sinónimos en letra cursiva y un asterisco; Hol: holotipo; Iso: isotipo

Especies de *Bauhinia* con ejemplares tipo provenientes de localidades colombianas (Figura 2)

1. *Bauhinia aculeata* L., Sp. Pl. 1: 374. 1753. (Figura 3A)

Localidad del tipo: COLOMBIA o VENEZUELA. **Tipo.** Holotipo: BM. **Hábito:** Árboles, arbustos espinosos. **Distribución.** 0 a 1700 m. Atlántico, Bolívar, La Guajira, Magdalena, Norte de Santander, Santander y Sucre. **Otros países:** El Salvador, Panamá, Barbados, Granada, Venezuela, Bolivia, Ecuador, Brasil y Perú.

Bauhinia emarginata Mill., Gard. Dict. ed. 8 no. 5. 1768. Tipo: Colombia. Bolívar: Cartagena, *Houstoun s.n.* (Holotipo BM).

Bauhinia rotundata Mill., Gard. Dict. ed. 8. no. 7. 1768. Tipo: Colombia. Bolívar: Cartagena, *Houstoun s.n.* (Holotipo BM).

Bauhinia schultzei Harms, Repert. Spec. Nov. Regni Veg. 24: 210. 1928. Tipo: Colombia. Magdalena: Sierra Nevada de Santa Marta, upper Río Frío, Schultze 428 (Holotipo F - fragmento).

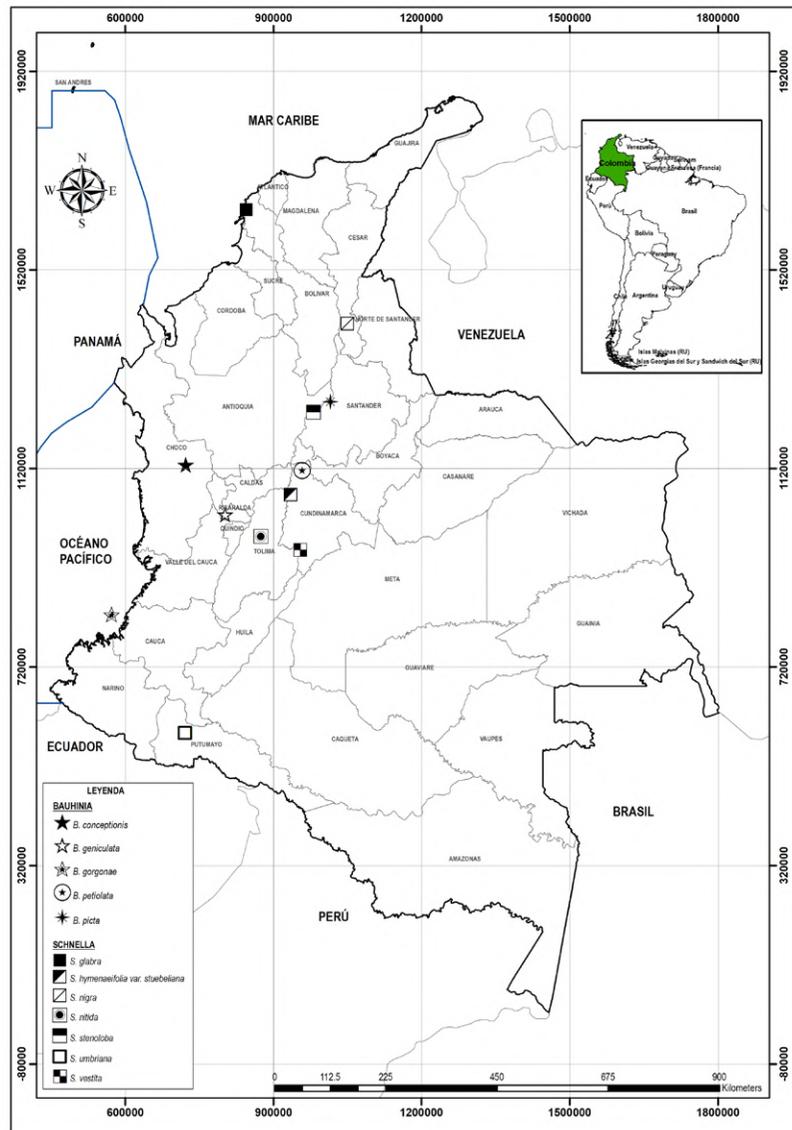


Figura 2. Localidades de origen de los tipos de especies de *Bauhinia* y *Schnellia* en Colombia



Figura 3. A. Tipo de *Bauhinia aculeata* L., Tomado de: <https://doi.org/10.5519/0022031>. **B.** Isotipo de *Bauhinia conceptionis* Britton & Killip; Fotografía cortesía de: United States National Herbarium, Smithsonian Institution

2. *Bauhinia conceptionis* Britton & Killip, Ann. New York Acad. Sci. 35:160. 1936. (Figura 3B)

Localidad del tipo. COLOMBIA. Chocó: La Concepción, 15 km E of Quibdó, ca. 75 m, Apr 20 - May 23, 1931, Archer, W.A. 2086. **Tipo.** Holotipo: NY; Isotipo: US. **Hábito:** Árboles y arbustos espinosos. **Distribución.** Endémica. 0 a 100 m. Chocó. **Estatus de conservación.** En peligro EN (Castellanos & Forero, 2019).

3. *Bauhinia geniculata* Wunderlin, Sida 22(1):111. 2006 (Figura 4A)

Localidad del tipo. COLOMBIA. Risaralda, municipio de Pereira, hacienda Alejandría, km 7 carretera La Virginia – Cerrito, 27 may 1989, Silvestone–Sopkin, P.A., Giraldo, J. & Cabrera, M, 5270 fl. **Tipos.** Holotipo: CUVC; Isotipo: USF. **Hábito:** Arbustos. **Distribución.** 900 a 1200 m. Risaralda y Valle del Cauca

4. *Bauhinia gorgonae* Killip ex R.S. Cowan, Bol. Soc. Venez. Ci. Nat. 22: 281. 1961 (Figura 4B)

Localidad del tipo. COLOMBIA. Cauca, municipio de Guapi: “East side of Gorgona Island; alt. 50-100 meters, dense forest along stream”, 11 feb 1939, Killip, E.P. & García–Barriga, H. 33170. **Tipos.** Holotipo: US; Isotipos: B, BC, BM, COL, US. **Hábito:** Árboles y arbustos. **Distribución.** Endémica. 0 a 100 m. Cauca. **Estatus de conservación.** En peligro (EN) [B2ab (ii, iv)] (Juárez, *et al.*, 2018).

5. *Bauhinia petiolata* (S. Mutis ex DC.) Triana ex Hook. f., Bot. Mag. 103: pl. 6277. 1877. **Basónimo: *Amaria petiolata* S. Mutis ex DC., Prodr. 2: 519. 1825.**

5a. *Bauhinia petiolata* (S. Mutis ex DC.) Triana ex Hook. f. var. *petiolata*.

Localidad del tipo. COLOMBIA. “In temperatis Regni Novo–granatensis”, 1760–1808, Mutis, S. 2398. **Tipos.** Holotipo: MA; Isotipos: MA, US. **Hábito:** Árboles y arbustos. **Distribución.** 300 a 1000 m. La variedad típica es un taxón endémico de Colombia, Antioquia, Cundinamarca, Santander y Tolima.



Figura 4. A. Holotipo de *Bauhinia geniculata* Wunderlin. Fotografía cortesía de: Philip Silverstone-Sopkin. **B.** Isotipo de *Bauhinia gorgonae*, Killip & García-Barriga. Cortesía de: Instituto de Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia

Amaria sessilifolia S. Mutis ex DC., Prodr. 2: 519. 1825. Tipo. Colombia: 1760-1808, Mutis 2724 (holotipo: MA; isotipo: US-fragmento).

Bauhinia sessilifolia (S. Mutis ex DC.) Quiñones, Annals of the Missouri Botanical Garden 75(3): 1156. 1988.

6. *Bauhinia picta* (Kunth) DC., Prodr. 2: 515. 1825.

Basónimo: *Pauletia picta* Kunth, in Humboldt, Bonpland & Kunt, Nov. Gen. Sp. 6: 316. 1824.

Localidad del tipo. COLOMBIA. Santander, “along the Río Magdalena, near the confluence with Río Opón, between Bojorque and isla de Bruja, may 1801”, Humboldt & Bonpland 1604 fl. **Tipos.** Holotipo: P; Isotipos: B, P, W. **Hábito:** Árboles. **Distribución.** 250 a 1100 m. Antioquia, Boyacá, Caldas, Casanare, Cesar, Cundinamarca, Chocó, Norte de Santander, Meta, Quindío, Santander y Vaupés. **Otros países:** Panamá. **Estatus de conservación.** Preocupación menor (LC) (Castellanos & Forero, 2019).

Bauhinia kalbreyeri Harms, Repert. Spec. Nov. Regni Veg. 19: 65. 1923. Tipo. Colombia. Antioquia: Murri, 19 jul 1880, Kalbreyer 1802 (holotipo: B+; isotipos: F, K, P, US)

Género *Schnella* Raddi

El género *Schnella* no cuenta con estudios completos que permitan conocer con precisión su estado actual en Colombia, aunque varios autores como **García-Barriga & Forero** (1968), **Bernal, et al.** (2016), y **Castellanos & Lewis** (2012) han aportado información relevante sobre este grupo. Con los datos disponibles, **Lewis & Castellanos** (2019) actualizaron el número de especies colombianas de *Schnella*, señalando que en el país crecen al menos 12 especies nativas (tres de ellas endémicas). Sin embargo, teniendo en cuenta conceptos sobre posibles sinonimias emitidos por **Wunderlin** (1979) y **Trethowan, et al.** (2015), **Lewis & Castellanos (l.c.)** no consideraron tres especies válida y efectivamente

publicadas, *Schnella mutisii* Britton & Killip, *S. nigra* Britton & Killip y *S. nitida* Britton & Killip. Dado que es un problema taxonómico aún no resuelto, estas tres especies se incluyen en nuestro trabajo, lo que arroja un total de 15 especies registradas en el país: *Schnella glabra* (Jacquin) Dugand, *S. guianensis* (Aublet) Wunderlin, *S. herrerae* Britton & Rose, *S. hymenaeifolia* (Triana ex Hemsley) Britton & Rose, *S. kunthiana* (Vogel) Wunderlin, *S. microstachya* Raddi, *S. mutisii* Britton & Killip, *S. nigra* Britton & Killip, *S. nitida* Britton & Killip, *S. outimouta* (Aublet) Wunderlin, *S. reflexa* (Schery) Wunderlin, *S. rutilans* (Spruce ex Benth) Pittier, *S. stenoloba* Britton & Killip, *S. umbriana* Britton & Killip y *S. vestita* Benth.

El género *Schnella* tiene un total de ocho ejemplares tipo que fueron recolectados en diferentes localidades de Colombia, de los cuales siete sirvieron de base para la descripción de nuevas especies (*Schnella glabra*, *S. mutisii*, *S. nigra*, *S. nitida*, *S. stenoloba*, *S. umbriana*, *S. vestita*) y uno para describir una nueva variedad (*S. hymenaeifolia* var. *stuebeliana*). La especie con mayor área de distribución en Colombia es *Schnella glabra*; *S. stenoloba* y *S. umbriana* también tienen áreas de distribución relativamente amplias, en tanto que *S. vestita* y *S. hymenaeifolia* var. *stuebeliana* están restringidas a uno o dos departamentos del país.

Colecciones históricas. Probablemente, el ejemplar tipo más antiguo corresponda a *S. glabra*, recolectado por Jacquin entre 1755 y 1788 (ver **D’Arcy**, 1970); los tipos de *S. mutisii* y *S. nigra* fueron recolectados durante la Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada (véase nota bajo *Bauhinia*); *Schnella vestita* se basó en una colección de Carl Theodor Hartweg, posiblemente del periodo entre 1836 y 1843, mientras trabajaba como recolector botánico para la Horticultural Society de Londres en Norte, Centro y Sur América (Stafleu & Cowan, 1979:70); el tipo de *S. hymenaeifolia* var. *stuebeliana* fue recolectado por Stuebel en 1868. La colección más reciente, de Klug en 1930, corresponde al tipo de *S. umbriana*.

Colecciones en herbarios. Se encontraron 35 registros de tipos (11 holotipos y 24 isotipos) distribuidos en ocho herbarios europeos y seis herbarios de los Estados Unidos (**Tabla 2**). En herbarios de Colombia no se registraron ejemplares tipo de especies de *Schnella* procedentes de localidades situadas en el territorio nacional.

Con respecto al porcentaje de registros de colecciones tipo en herbarios, se encontró que el 17,2 % está depositado en el herbario del Real Jardín Botánico de Kew (K) del

Tabla 2. Herbarios que poseen colecciones tipo procedentes de Colombia (Leguminosae: Cercidoideae: *Schnella*)

Taxon	América								Europa								
	F	GH	MICH	MO	NY	US	BM	K	LD	LE	MA	P	S	W			
	Iso	Iso	Iso	Hol	Hol	Iso	Hol	Iso	Hol	Iso	Iso	Iso	Iso	Hol	Iso		
<i>Schnella glabra</i>								?								?	
<i>S. hymenaeifolia</i> var. <i>stuebeliana</i>	1			1													
<i>S. mutisii</i>						1 F	1								2		
<i>S. nigra</i>							1								1		
<i>S. nitida</i>	1				1			1							2		
<i>S. stenoloba</i>						1 F	1				1						
<i>S. umbriana</i>	1	1	1		1			1	1	1						1	
<i>S. vestita</i>	1						1			1	1	1	1		1		2

?: ubicación por confirmar; F: fragmento de tipo

Hol: holotipo; Iso: isotipo

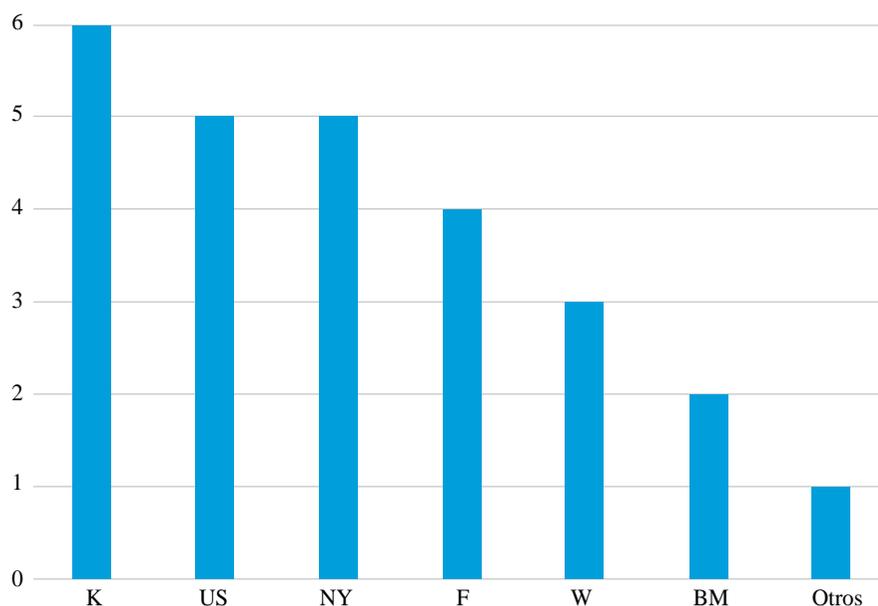


Figura 5. Distribución por herbarios de ejemplares tipo de *Schnella* recolectados en Colombia

Reino Unido (seis tipos), el 14,3 % está almacenado en los herbarios del Jardín Botánico de Nueva York (NY) y el Smithsonian (US) de Estados Unidos (cinco tipos cada uno), el 11,4 % se encuentran en el herbario del Field Museum de Chicago (F) (cuatro tipos) y el 8,6 % en los herbarios de Madrid (MA) y Viena (W) (tres tipos cada uno); el resto de herbarios cuenta con uno o dos ejemplares tipo cada uno (**Figura 5**).

En herbarios europeos están depositadas 18 colecciones tipo de especies colombianas de *Schnella* y en herbarios americanos existen 17 colecciones de tipos (**Tabla 2**). En cuanto a las especies, los tipos de *S. umbriana* están distribuidos en ocho herbarios, los de *S. vestita* en siete herbarios, los de *S. nitida* están depositados en cuatro y los de *S. stenoloba* y *S. mutisii* en tres herbarios; los tipos de las demás especies y de *S. hymenaeifolia* var. *stuebeliana* se encuentran en uno o dos herbarios.

Especies de *Schnella* con ejemplares tipo provenientes de localidades colombianas (Figura 2)

1. *Schnella glabra* (Jacq.) Dugand, Rev. Acad. Colomb. Ci. Exact. 4:137. 1941.

Basónimo: *Bauhinia glabra* Jacq., Enum. Syst. Pl. 20.1760; Select. Stirp. Amer. Hist. 119. 1763.

Localidad del tipo: COLOMBIA. Bolívar, Cartagena, “in sylvis & fruticis”, Jacquin.

Tipo: Holotipo posiblemente BM o W, [D’Arcy, 1970]. **Hábito:** Lianas y bejucos.

Distribución. 0 a 1200 m. Atlántico, Caquetá, La Guajira, Magdalena y Norte de Santander. **Otros países:** México, Cuba, Trinidad, norte de Suramérica y Brasil.

2. *Schnella hymenaeifolia* (Triana ex Hemsley) Britton & Rose, N. Amer. Fl. 23(4): 208. 1930.

2a. *Schnella hymenaeifolia* (Triana ex Hemsl.) Britton & Rose var. **stuebeliana** (Harms) R. Bernal & Celis. Phytoneuron 22: 3. 2015.

Basónimo: *Bauhinia stuebeliana* Harms, Repert. Spec. Nov. Regni Veg. 19(4-7): 65. 1923.

Localidad del tipo. COLOMBIA. “Between Honda and Bogotá”, 1868, Stuebel 87a. **Tipo:** Holotipo: MO; Isotipo: F. **Hábito:** Lianas y bejucos. **Distribución.** 100 a 840 m. La variedad *stuebeliana* es un taxón endémico de Colombia, que crece en los departamentos de Cundinamarca y Tolima.

3. *Schnella mutisii* Britton & Killip, Ann. New York Acad. Sci. 35: 162. 1936.
Localidad del tipo. COLOMBIA. 1760-1808, Mutis 2375. **Tipo.** Holotipo: US; Isotipo: MA, NY (fragmento). **Hábito:** Lianas y bejucos. **Distribución.** Región andina.
4. *Schnella nigra* Britton & Killip, Ann. New York Acad. Sci. 35: 162. 1936.
Localidad del tipo. COLOMBIA. 1760-1808, Mutis 4218. **Tipo.** Holotipo: US; Isotipo: MA. **Hábito:** Lianas y bejucos. **Distribución.** Cesar (Aguachica, cf. Britton & Killip, 1936: 162).
5. *Schnella nitida* Britton & Killip, Ann. New York Acad. Sci. 35: 164. 1936.
Localidad del tipo. COLOMBIA. Tolima, Piedras, “at base of Mt. Tolima”, 1 Mar 1876, André 1938. **Tipo.** Holotipo: NY; Isotipos: F, K, US. **Hábito:** Lianas y bejucos. **Distribución.** Tolima.
6. *Schnella stenoloba* Britton & Killip, Ann. New York Acad. Sci. 35(3): 163. 1936 (Figura 6A)
Localidad del tipo: Colombia, “Magdalena River”, Sep 1916, Dawe 442. **Tipo.** Holotipo: US; Isotipos: NY (fragmento), K. **Hábito:** Lianas y bejucos. **Distribución.** Antioquia, Cesar, Magdalena y Santander.
7. *Schnella umbriana* Britton & Killip, Ann. New York Acad. Sci. 35(3): 162. 1936.
Localidad del tipo: Colombia, Putumayo, Umbría, Oct – Nov 1930, Klug 1733. **Tipo.** Holotipo: NY; Isotipos: BM, F, GH, K, MICH, S, US. **Hábito:** Lianas y bejucos. **Distribución.** Región Amazónica y la Orinoquia de Colombia.
8. *Schnella vestita* Benth., Pl. Hartw. 171. 1845. (Figura 6B).
Localidad del tipo: Colombia, Cundinamarca, “Prope pagum Pandi, Prov. de Bogotá”, s.f., Hartweg 962, **Tipo.** Holotipo: K; Isotipos: F, K, NY, LD, LE, P. **Hábito:** Lianas y bejucos. **Distribución.** 400 a 1250 m. Cundinamarca, Tolima.



Figura 6. A. Holotipo de *Schnella stenoloba* Britton & Killip, Fotografía cortesía de: United States National Herbarium, Smithsonian Institution. **B.** Isotipo *Schnella vestita* Benth. Tomado de: <http://apps.kew.org/herbcat/getImage.do?imageBarcode=K000264828>

Discusión

La taxonomía de las especies colombianas de *Bauhinia* está básicamente definida. En efecto, según la información disponible, en el país se conocen hasta el momento 16 especies nativas de este género, aunque es posible que en los próximos años se describan taxones nuevos como parecen demostrarlo colecciones recientes de Castellanos, *et al.* (artículo en preparación); se continuará enriqueciendo así la información que está siendo recopilada en el marco del proyecto de “Estudios en leguminosas colombianas”.

En contraste, aún falta un estudio detallado de las especies de *Schnella* que crecen en el país. Esta situación se refleja, entre otras cosas, en la existencia de algunas especies válida y efectivamente publicadas pero que han sido ignoradas por algunos autores o puestas en sinonimias. Es el caso de tres especies descritas por **Britton & Killip** en 1936: *Schnella mutisii*, *S. nigra* y *S. nitida*. Así, por ejemplo, el portal Plants of the World considera a *Schnella nigra* como un sinónimo de *S. reflexa*; no obstante, en *S. reflexa* el cáliz presenta lóbulos reflexos en tanto que en *S. nigra* los lóbulos son filiformes; además, *S. reflexa* se distribuye en Panamá y la región del Pacífico de Colombia, en tanto que *S. nigra* ha sido registrada para la región andina. Esta situación requiere de un estudio detallado, quizá utilizando métodos de la sistemática molecular.

Además, la tipificación de la especie *S. glabra* (Jacq.) Dugand, la de más amplia distribución en el país, aún está en duda en cuanto al lugar de depósito del ejemplar tipo de su basónimo, *B. glabra* Jacq. **D’Arcy** (1970) sugirió al British Museum (BM) y al Museo de Viena (W) como dos posibilidades. Aunque es necesario consultar esas colecciones para tomar una decisión final, no hay que olvidar que Jacquin trabajó en Viena, donde fue director de los jardines botánicos de la Universidad. Según **Stafleu & Cowan** (1979:407), sin embargo, su colección fue adquirida por Sir Joseph Banks y depositada en el British Museum (BM). Estos autores consideran que los ejemplares depositados en W son principalmente de Austria y de plantas de jardín.

Conclusiones

La familia de las leguminosas está bien representada en Colombia, con 1.123 especies distribuidas en 165 géneros (**Bernal, et al., 2016**). Los dos géneros aquí tratados constituyen un pequeño porcentaje del total pero, gracias a este ejercicio, se abren interesantes oportunidades para futuros estudios. *Schnella* y *Bauhinia* revisten especial interés, pues han estado sujetos a diferentes interpretaciones taxonómicas en la literatura, habiendo sido considerados por algunos autores como pertenecientes a una sola entidad, el género *Bauhinia*. Ya **Britton & Rose** (1930) y **Britton & Killip** (1936) los habían reconocido como grupos separados, pero posteriores estudios (**Quiñones, 2005**) retomaron el criterio de un único género. Estas diferencias de opinión han sido zanjadas gracias a estudios recientes con técnicas moleculares, y es por eso que en la actualidad se aceptan como dos géneros independientes (**Sinou, et al., 2020**).

Es interesante anotar que, dentro de los dos géneros colombianos de la subfamilia Cercidoideae de las leguminosas, la mayor parte de los taxones descritos con base en especímenes recolectados en Colombia lo han sido a partir de colecciones antiguas, principalmente de los siglos XVIII y XIX. Se destacan como colecciones relativamente recientes (siglo XX) solamente los tipos de *S. umbriana* (Klug 1733, de 1930) y *B. geniculata*, (P. Silvestone–Sopkin, J. Giraldo y M. Cabrera 5270, en 1989). Esta circunstancia no puede interpretarse como el resultado de un conocimiento completo de la biota de Colombia. El país está catalogado como uno de los más biodiversos del mundo, y permanentemente se están encontrando nuevos registros o se están describiendo nuevos taxones en el país, proceso que ciertamente no se detendrá por mucho tiempo. Es más apropiado recordar que muchas regiones están aún sin estudiar, y que los herbarios tienen grandes cantidades de ejemplares a la espera de ser catalogados, incluidos en las colecciones y estudiados.

Estas consideraciones llaman a la reflexión sobre la necesidad de tener una comunidad científica cuyos intereses vuelvan a volcarse al estudio, descripción y visualización de esas riquezas escondidas en muchas regiones naturales en diversos ambientes del territorio nacional y en los herbarios del país y del exterior. El análisis realizado permitió evidenciar que los tipos de las especies descritas a partir de material procedente de localidades colombianas están pobremente representados en los herbarios del país. En efecto, solamente existe un holotipo en el herbario CUVC y un isotipo en el Herbario Nacional Colombiano (COL), ambos de taxones pertenecientes al género *Bauhinia*. Ante este panorama, es necesario redoblar esfuerzos para implementar las propuestas de Pérez Arbeláez y enriquecer así el conocimiento de nuestra diversidad vegetal. Puesto que las visitas a herbarios extranjeros por parte de botánicos colombianos son difíciles, no solo por la situación actual de salubridad sino por la deficiente financiación para los estudios de ciencias básicas por parte de los entes gubernamentales que tienen esa función, será necesario acudir a las bases de datos digitales internacionales y, en casos especiales, regresar a la solicitud de préstamos de material como se ha hecho tradicionalmente.

Con los aportes de este estudio, se ha actualizado la información sobre la cantidad y distribución en los herbarios del mundo de los tipos de las especies de los géneros *Bauhinia* y *Schnella* recolectados en Colombia. La consulta de varias bases de datos internacionales hizo posible complementar las citaciones de herbarios en los cuales están depositadas las colecciones motivo de estudio, lo que permitió evidenciar que en muchas publicaciones previas estos datos estaban incompletos.

Agradecimientos

Este trabajo hace parte de los proyectos “Géneros de Leguminosas de Santander”, código FCNI 2019-103, de la Fundación Universitaria de San Gil, UNISANGIL, y “Estudios en leguminosas colombianas”. Nuestro especial agradecimiento a Oscar Javier Leal Guerrero por su valiosa colaboración en la elaboración cartográfica.

Contribución de los autores

CC, FV y WGS consultaron y verificaron la información bibliográfica, los herbarios y páginas web especializadas. CC y EF elaboraron el manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Arreguin, M.I., Fernández, R., Rodríguez, J. (1996). Catálogo de los ejemplares tipo de plantas vasculares del Herbario de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas (ENCB), del Instituto Politécnico Nacional. México. Polibotánica. **3**: 18-81.
- Bernal, R., Gradstein, S.R., Celis, M. (eds.). (2016). Catálogo de plantas y líquenes de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Fecha de consulta: entre enero y junio de 2020. Disponible en: <http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co>
- Britton, N.L., Killip, E.P. (1936). Mimosaceae and Caesalpiniaceae of Colombia. Ann. N. Y. Acad. Sci. **35**: 101-208.
- Britton, N.L. & Rose, N. (1930). Caesalpiniaceae. North American Flora. **23** (4): 203-217.
- Bruneau, A., Forest, F., Herendeen, P.S., Klitgaard, B.B., Lewis, G.P. (2001). Phylogenetic relationships in the Caesalpinioideae (Leguminosae) as inferred from chloroplast *trnL* intron sequences. Syst. Bot. **26**: 487-514.
- Castellanos, C. & Forero, E. (2019). El género *Bauhinia* L. *sensu stricto* (Leguminosae: Cercidoideae: Cercideae) en Colombia. (pp. 22-73). En: Forero, E. & C. Castellanos (eds.), Estudios en Leguminosas Colombianas III. Biblioteca Jorge Álvarez Lleras N° 37. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

- Castellanos, C. & Lewis, G.P.** (2012). Leguminosas colombianas de la subfamilia Caesalpinioideae presentes en el herbario del Real Jardín Botánico de Kew, Reino Unido. *Rev. Acad. Colomb. Ci. Ex. Fís. Nat.* **36** (139): 149-200.
- Cronquist, A.** (1968). *The Evolution and Classification of Flowering Plants*. Houghton Mifflin Company, Boston, 396 pp.
- Cronquist, A.** (1981). *An Integrated System of Classification of Flowering Plants*. Columbia University Press, 1262 pp.
- D'arcy, W.D.** (1970). Jacquin Names, Some Notes on Their Typification. *Taxon*. **19** (4): 554-560
- Forero, E.** (1975). La importancia de los herbarios nacionales de América latina para las investigaciones botánicas modernas. *Taxon*. **24** (1): 133-138.
- Forero, E., Piñeros, Z., Barbosa, C.** (1977). Tipos de Brunelliaceae, Cunoniaceae y Rosaceae en el Herbario Nacional Colombiano. *Mutisia*. **44**: 1-8.
- Forero, E., Ruiz, R.** (1983a). Tipos de Leguminosae – Mimosoideae en el Herbario Nacional Colombiano. *Mutisia*. **57**: 1-6.
- Forero, E., Benavides, O.S., Ortega, E.** (1983b). Tipos de Leguminosae – Faboideae en el Herbario Nacional Colombiano. *Mutisia*. **58**: 1-4.
- Forero, E., Bernal, H.Y., Quiñones, L.M.** (1983c). Tipos de Leguminosae – Caesalpinioideae en el Herbario Nacional Colombiano. *Mutisia*. **59**: 1-4.
- Forero, E. & Romero, C.** (eds.). (2005). *Estudios en Leguminosas Colombianas*. Publ. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Inst. Humboldt, Inst. de Ciencias Naturales, RLB. 412 páginas.
- Forero, E.** (ed.). (2009). *Estudios en Leguminosas colombianas II*. Biblioteca José Jerónimo Triana. **21**: 1-424. Publ. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C.
- Forero, E. & Castellanos, C.** (eds.). (2019). *Estudios en Leguminosas colombianas III*. Col. Jorge Álvarez Lleras **37**: 1-398. Publ. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Bogotá.
- García-Barriga, H. & Forero-González, E.** (1968). Las Leguminosas: Mimosaceae, Caesalpinaceae, Papilionaceae. Catálogo ilustrado de las plantas de Cundinamarca. **3**: 1-136. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Global Plants.** (2020). Fecha de consulta: entre enero y junio de 2020. Disponible en: <https://plants.jstor.org/>
- Herendeen, P., Bruneau, A., Lewis, G.P.** (2003). Phylogenetic relationships in caesalpinoid legumes: a preliminary analysis based on morphological and molecular data. (pp. 37-62). En: Klitgaard, B.B. & A. Bruneau (eds.) *Advances in Legume Systematics, part 10, Higher Level Systematics*. Richmond: Royal Botanic Gardens, Kew.
- Heywood, V.H.** (1993). *Flowering Plants of the World*. Oxford University Press, New York, 336 pp.
- IPNI.** (2020). International Plant Names Index. Fecha de consulta: entre enero y junio de 2020. Disponible en: <http://www.ipni.org>. The Royal Botanic Gardens, Kew, Harvard University Herbaria & Libraries and Australian national Botanic Gardens
- Juárez, P., Flores, R., Blanco, M.A.** (2018). *Bauhinia proboscidea* (Fabaceae: Cercidoideae), a new species from Costa Rica and Panama, with notes on *B. beguinotii*, *B. gorgonae* and *B. pansamalana*. *Phytotaxa*. **361** (1): 25-40.
- Judd, W.S., Campbell, C.S., Kellogg, E.A., Stevens, P.F.** (1999). *Plant Systematics. A Phylogenetic Approach*. Sinauer Associates, Inc., Sunderland, 464 pp.
- Lewis, G.P., Schrire, B., Mackinder, B., Lock, M.** (2005). *Legumes of the world*. Royal Botanic Gardens, Kew. 577 pp.
- Lewis, G.P. & Castellanos, C.** (2019). Colombian Legume Genera and their Placement in the New Six Subfamily Classification of Leguminosae. (pp. 11-19). En: Forero, E. & C. Castellanos (eds.), *Estudios en Leguminosas Colombianas III*. Biblioteca Jorge Álvarez Lleras N° 37: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 398 p.
- Legume Phylogeny Working Group - LPWG.** (2017). New subfamily classification of the Leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny. *Taxon*. **66** (1): 44-77.
- Ministerio Da Agricultura.** Instituto de Biología Vegetal. (1938). *Anais da Primeira Reunião Sul-Americana de Botânica*. 1º Volume. Rio de Janeiro, Brasil, 290 pp.
- Pinto, E.P.** (1960). Tipos de la colección Triana en el Herbario Nacional Colombiano. *Bol. Soc. Argentina Bot.* **8** (2): 90-111.
- Pinto, E.P.** (1976). Tipos de Gramineae en el Herbario Nacional Colombiano (COL). *Mutisia*. **40**: 5-8.

- POWO.** (2019). Plants of the World Online. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew. Fecha de consulta: entre enero y junio de 2020. Disponible en: <http://www.plantsoftheworldonline.org/>
- Sinou, C., Cardinal-McTeague, W., Bruneau, A.** (2020). Testing generic limits in Cercidoideae (Leguminosae): Insights from plastid and duplicated nuclear gene sequences. *Taxon*. **69** (1): 67-86.
- Stafleu, F.A. & Cowan, R.S.** (1979). *Taxonomic Literature Vol. 2: H-Le. Regnum Vegetabile* 98: 70, 407. International Association for Plant Taxonomy, Utrecht.
- Takhtajan, A.** (1969). *Flowering Plants. Origin and Dispersal*. Oliver & Boyd, Edinburgh, 310 pp.
- Thiers, B.** s.f. (continuamente actualizada). *Index Herbariorum: A global directory of public herbaria and associated staff*. New York Botanical Garden's Virtual Herbarium. Fecha de consulta: entre enero y junio de 2020. Disponible en: <http://sweetgum.nybg.org/ih/>
- Trethowan, L., Clark, R., Mackinder, B.** (2015). A synopsis of the Neotropical genus *Schnella* (Cercideae: Caesalpinioideae: Leguminosae) including 12 new combinations. *Phytotaxa*. **204** (4): 237-252.
- Tropicos.org.** (2021). Missouri Botanical Garden. Fecha de consulta: entre enero y junio de 2020. Disponible en <http://www.tropicos.org>
- Uribe-Uribe, L.** (1976). Tipos de Melastomatáceas de Triana en el Herbario Nacional Colombiano. *Mutisia*. **39**: 1-9.
- Wunderlin, R.P.** (1979). The Panamanian Species of *Bauhinia* (Leguminosae). *Ann. Missouri Bot. Gard.* **63** (2): 346-354.

Artículo original

Primer registro de *Campylocia araca* Gonçalves & Salles (Ephemeroptera: Euthyplociidae) en Colombia

First record of *Campylocia araca* Gonçalves & Salles (Ephemeroptera: Euthyplociidae) for Colombia

✉ Laura Jimena Marín-Eslava¹, ✉ María del Carmen Zúñiga², ✉ Lucimar Gomes-Dias^{3,*}

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

² Departamento de Biología, Grupo de Investigaciones Entomológicas, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia

³ Departamento de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Grupo de Investigación BIONAT, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

Resumen

En este trabajo se reporta el primer registro para Colombia de la especie *Campylocia araca* Gonçalves & Salles, con lo cual se amplía su distribución geográfica. La especie se determinó con base en dos imagos machos y una hembra procedentes del departamento del Meta. En la descripción original la especie solo había sido documentada en la Amazonía brasilera y este nuevo registro permite extender su distribución a la cuenca del río Orinoco, además de confirmar la atípica morfología de los genitales masculinos.

Palabras clave: Efímera; Nuevo reporte; Meta; Suramérica.

Abstract

We report the first record of *Campylocia araca* Gonçalves & Salles in Colombia thus extending its geographical distribution. The species was determined based on two male mayflies and one female from the department of Meta. In the original description, this species had been registered only for the Brazilian Amazon and this new record broadens the species distribution range to the Orinoco river basin and casts light on male genitalia morphology.

Keywords: Mayfly; New report; Meta; South America.

Introducción

El género *Campylocia* (Euthyplociidae) fue descrito originalmente por **Needham & Murphy** en 1924. Su historia taxonómica es compleja, con varias especies sinonimizadas (**Gonçalves, et al.**, 2017). El género es de distribución neotropical y actualmente incluye seis especies válidas, la mayoría de ellas registradas en la región amazónica brasilera: *C. anceps* (**Eaton**, 1883), con la más amplia distribución entre las especies conocidas (Brasil, Colombia, Ecuador, Guayana Francesa, Guyana, Perú, Surinam, Venezuela y Centro América) (**Domínguez, et al.**, 2020); *C. araca* Gonçalves & Salles, 2017, recientemente descrita para la Amazonía brasilera con base en un solo espécimen macho sometido a análisis moleculares para confirmar que correspondía a un linaje diferente (**Gonçalves, et al.**, 2017); *C. burmeisteri* (**Hagen**, 1888), reportada en Argentina y Brasil; *C. demoulini* Gonçalves & Salles, 2017, registrada en Ecuador, Surinam y Brasil (**Gonçalves, et al.**, 2017); *C. orosi* Gonçalves & Peters, 2017, en **Gonçalves, et al.** (2017), reportada en Costa Rica y Panamá y *C. roraimense* **Gama-Neto & Araujo-Bastos**, 2017, en Brasil-Amazonas. La información sobre la biología de los imagos y ninfas de las especies registradas es

Citación: Marín-Eslava LJ, Zúñiga M del C, Gomes-Dias L. Primer registro de *Campylocia araca* Gonçalves & Salles (Ephemeroptera: Euthyplociidae) en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):541-545, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1381>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Lucimar Gomes Dias;
lucimar.dias@ucaldas.edu.co

Recibido: 23 de enero de 2021

Aceptado: 19 de abril de 2021

Publicado: 17 de junio de 2021



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

escasa; se ha documentado la presencia de ninfas de *C. burmeisteri* parcialmente enterradas en sustratos de tipo arcilloso y en cuerpos de agua de corriente moderada a fuerte y cerca de un metro de profundidad media (Pereira & Da-Silva, 1990).

En Colombia el género está presente en varias localidades y regiones naturales (Zúñiga, *et al.*, 2004; Dias, *et al.*, 2009; Gutiérrez & Reinoso-Florez, 2010; Granados-Martínez, *et al.*, 2018; Chaux-Rojas, *et al.*, 2020, entre otros autores), pero a nivel específico solo está documentada *C. anceps*, que es la especie tipo y corresponde a uno de los registros más antiguos la familia Euthyplociidae (Domínguez, *et al.*, 2006, 2020; Dias, *et al.*, 2009).

Campylocia araca fue descrita por Gonçalves, *et al.* (2017) a partir de imagos (macho y hembra), pero las ninfas se desconocen. Los caracteres taxonómicos que distinguen la especie son los siguientes: en el macho, 1) alas anteriores generalmente con una vena ICu; 2) patrón de color abdominal con dos pares de manchas en forma de gota, una en la región media-apical de la terga I-IX y otra en la región medial de la terga II-IX; 3) placa estilígera semirredonda y 4) penes angostos, con el mismo ancho desde la base hasta las proyecciones laterales, fuertemente curvados hacia afuera y proyecciones laterales con la línea media esclerotizada (Gonçalves, *et al.*, 2017).

Con el fin de ampliar el conocimiento de *Campylocia* en Colombia, en este trabajo se registra por primera vez en el país la especie *C. araca*, la cual se determinó a partir de imagos machos y hembras recolectados en el departamento del Meta.

Materiales y métodos

Se determinaron especímenes de *Campylocia* depositados en la Colección Entomológica del Programa de Biología de la Universidad de Caldas – CEBUC (RNC: 188), los cuales fueron recolectados en el municipio de San Juan de Arama (Meta, Colombia) (Figura 1) con una trampa de luz blanca colocada en la zona de ribera de una corriente hídrica de bajo orden, entre las 18:00 y las 21:00 horas.

La determinación de los especímenes se hizo con un estereoscopio binocular marca Leica MC205, empleando las claves taxonómicas y las descripciones originales de Domínguez, *et al.* (2006), Gonçalves, *et al.* (2017), y Salles, *et al.* (2018), así como disecciones y montajes de estructuras taxonómicas de interés.

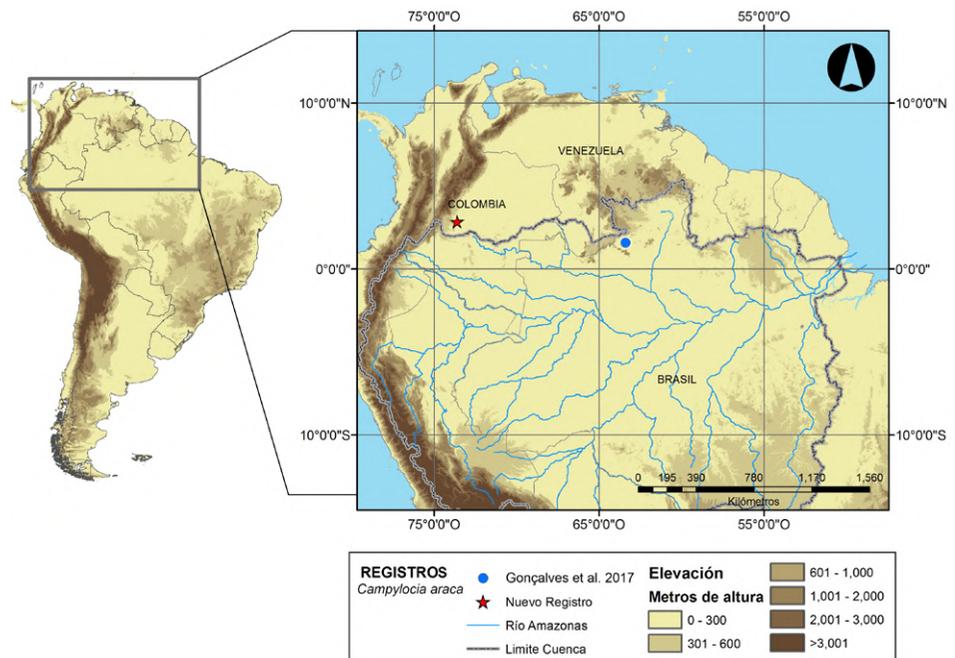


Figura 1. Mapa de sitios de presencia de *Campylocia araca*



Figura 2. Imago macho de la especie *Campylocia araca*. **A)** Hábito lateral. **B)** Genitalia en vista ventral

Las fotografías fueron tomadas con una cámara MC-170HD de marca Leica acoplada al estereoscopio. El mapa de distribución se levantó con el programa ESRI® ArcMap 10.0.

Resultados

Se revisaron un total de tres imagos del género *Campylocia* (**Figura 2A**), dos machos y una hembra. Con base en la peculiar genitalia (**Figura 2B**) y el patrón de coloración abdominal fue posible determinar la especie *C. araca* Gonçalves & Salles. Este es el primer registro de la especie en Colombia, con lo que se amplía el rango de distribución al norte de Suramérica (**Figura 1**).

El cuerpo de agua donde se capturaron los imagos es una corriente de bajo orden que en la región se denomina como caño Bijagual. El ancho osciló aproximadamente entre 5 y 8 metros, con profundidades medias menores a un metro. Presenta en general un buen estado de conservación y está protegido en su corredor de ribera con vegetación secundaria. Sus aguas son frías, claras, con predominio de zonas de remanso y pocos rápidos, lecho de tipo limoso con algunas rocas y presencia de paquetes de hojarasca, troncos sumergidos y detritus de origen vegetal.

Material examinado

Dos imagos machos y un imago hembra, Colombia, Meta, San Juan de Arama, Finca La Esmeralda, Caño Bijagual, 03°18'19.50"N, 73°51'14.20"W, 394 m s.n.m., 16-17/V/2015, L.G. Dias y Curso de Entomología-2015, Universidad de Caldas cols, (CEBUC).

Discusión

La especie *C. araca* fue descrita por **Gonçalves & Salles** (2017) a partir de un solo imago macho cuyas estructuras genitales tenían una morfología atípica: penes angostos fuertemente curvados hacia afuera (**Gonçalves, et al., 2017**). Además, en la descripción original los autores también tuvieron en cuenta herramientas moleculares para confirmar la nueva especie. El hallazgo documentado en este trabajo corresponde a una segunda recolección de especímenes de *C. araca* y permite confirmar que las estructuras genitales del imago son realmente peculiares dentro del género *Campylocia*, lo que no obedece a una deformación por deshidratación del espécimen como se sugiere en la descripción original (**Gonçalves, et al., 2017**).

Campylocia araca solo se conocía en la localidad tipo ubicada en un igarapé de la Serra do Aracá en el estado de Amazonas-Brazil (**Gonçalves, et al., 2017**). El registro de la especie en la Orinoquía colombiana podría explicarse porque los ecosistemas acuáticos de esta región tienen continuidad hacia la Amazonía mediante la unión de la cuenca del río Orinoco con el Casiquiare, y este último, a su vez, se conecta con el río Amazonas y actúa como un corredor biogeográfico entre dichas regiones (**Willis, et al., 2010**).

La localidad en donde se encontró la especie en Colombia corresponde a una zona con gran influencia de la serranía de La Macarena, caracterizada por su gran riqueza hídrica e importancia biogeográfica. En esta serranía confluyen diferentes regiones naturales como la andina, la orinoquense y la amazónica, dando origen a una variedad de climas determinados por los gradientes altitudinales y latitudinales, condición que favorece la biodiversidad (Gaston, 2000; Vilorio, 2009; Moreno, *et al.*, 2017). La región de San Juan de Arama es considerada la puerta de entrada a la serranía, la más occidental de los tepuyes del sistema montañoso perteneciente al Escudo Guayanés que se extiende a Venezuela, Guyana, Surinam y Brasil, al este de la cordillera de los Andes, y cuya formación geológica es la más antigua del planeta (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, 1999). El afluente en donde los especímenes de *C. araca* fueron capturados corresponde a la cuenca del río Güejar, el cual drena a través del río Guayabero en la macrocuenca del río Orinoco después de atravesar la extensa sabana de los Llanos Orientales que comparten Colombia y Venezuela.

Este nuevo registro permite ampliar el conocimiento sobre el orden Ephemeroptera tanto en Colombia como en el Neotrópico, y aporta información relevante para futuras investigaciones relacionadas con la biogeografía de la región, de tanta importancia para los estudios de macroinvertebrados acuáticos en regiones poco muestreadas del país. En este contexto se destaca que la Orinoquía es una de las regiones menos estudiadas en Colombia en cuanto a la taxonomía y ecología de los insectos acuáticos, pues las actividades de recolección y evaluación de la biodiversidad estuvieron muy restringidas por el conflicto armado durante los últimos 50 años.

Agradecimientos

A la Universidad de Caldas y a la Colección Entomológica del Programa de Biología – CEBUC (Centro de Museos) por facilitar la infraestructura física y permitir el acceso al material para llevar a cabo el presente trabajo. A la Doctora Inés Gonçalves (Universidad Federal de Rio de Janeiro, Brasil) por corroborar la determinación de la especie. A la Vicerrectoría de Investigaciones y Posgrados de la Universidad de Caldas por la financiación del proyecto “Insectos Acuáticos Transamazónicos”. Al Dr. Benjamin Doncel por permitir la realización del trabajo de campo del curso de Entomología (Programa de Biología, UCaldas) en su finca La Esmeralda, en San Juan de Arama.

Contribución de los autores

LJME redactó el manuscrito; MCZ colaboró en la redacción del manuscrito; LGD colaboró en la redacción del manuscrito, recolectó los especímenes de *Campylocia araca*, identificó el material recolectado, tomó las fotografías y realizó los montajes de la genitalia.

Conflicto de intereses

Los autores no tienen conflicto de intereses.

Referencias

- Chaux-Rojas, J. P., Pimentel-Parra, G. A., García-Peña, A. L., Pareja-Neira, J. E. (2020). Primer registro del género *Campylocia* Needham y Murphy, 1924 (Insecta: Ephemeroptera: Euthyplociidae) para el departamento del Caquetá, Colombia. *Boletín Científico - Centro de Museos*. **24** (1): 242-245.
- Dias, L. G., Zúñiga, M. C., Bacca, T. (2009). Estado actual del conocimiento del Orden Ephemeroptera en Colombia. *Memorias XXXVI Congreso de la Sociedad Colombiana de Entomología. Simposio sobre Invertebrados*. Medellín, Colombia.
- Domínguez, E., Molineri, C., Pescador, M. L., Hubbard, M. D., Nieto, C. (2006). Ephemeroptera of South America, Aquatic Biodiversity of Latin America. In: Adis, J., Arias, J. R., Rueda-Delgado, G., and K. M., Wantzen, (Eds.) *Aquatic Biodiversity of Latin America*. Volume 2, Pensoft, Sofia-Moscow.

- Domínguez, E., Molineri, C., Nieto, C., Zúñiga, M. del C.** (2020). Lista de especies de Ephemeroptera sudamericanos. Fecha de consulta: enero de 2021. Disponible en: http://ibn.conicet.gov.ar/wpcontent/uploads/sites/113/2020/04/catalogo2020_version1abril.pdf
- Eaton, A.E.** (1883). A Revisional Monograph of Recent Ephemeridae or Mayflies. Transactions of the Linnean Society of London. 2nd Series: Zoology. **3** (1): 1-77.
- Gama-Neto, J. L. & Araujo-Bastos, P.M.** (2017). A new species of *Campylocia* Needham & Murphy, 1924 (Ephemeroptera, Euthyplociidae) from Northern Brazil. Zootaxa. **4244** (2): 296-300.
- Gaston, K. J.** (2000). Global patterns in biodiversity. Nature. **405** (12): 220-227.
- Gonçalves, I. C., Takiya, D. M., Salles, F. F., Peters, J. G., Nessimian, J. L.** (2017). Integrative taxonomic revision of *Campylocia* (mayflies: Ephemeroptera, Euthyplociidae). Systematics and Biodiversity. **15** (6): 564-581.
- Granados-Martínez, C., Lasso, C. A., Núñez-Avellaneda, M., Morales-Betancourt, M. A.** (2018). Macroinvertebrados acuáticos de los ríos Guayabero medio, bajo Losada y bajo Duda, Sierra de La Macarena, Meta, Colombia. En: C.A. Lasso, M.A. Morales-Betancourt, I.D. Escobar-Martínez. (Eds.) Biodiversidad de la Sierra de La Macarena, Meta, Colombia. Parte I. Ríos Guayabero medio, bajo Losada y bajo Duda (pp. 97–119). Bogotá, DC, Colombia: Serie Editorial Fauna Silvestre Neotropical. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Gutiérrez, C. & Reinoso-Florez, G.** (2010). Géneros de ninfas del orden Ephemeroptera (Insecta) del departamento del Tolima, Colombia: listado preliminar. Biota Colombiana. **11** (1-2): 23-32.
- Hagen, H.** (1888). Unsere gegenwärtige Kenntniss der Ephemerer. Stettiner Entomologische Zeitung. **1890** (1888): 11-13.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).** (1999). Paisajes fisiográficos de Orinoquía-Amazonia (ORAM) Colombia. Análisis Geográficos. Nos 27-28. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Moreno, F., Caro, C. I., Pinilla, G. A., Osorio, D. P.** (2017). Estado actual del conocimiento sobre microalgas del perifiton y macroinvertebrados bentónicos en el departamento del Meta, Colombia. Acta Biologica Colombiana. **22** (3): 274-306.
- Needham, J. G. & Murphy, H. E.** (1924). Neotropical Mayflies. Lloyd Library Bull. **24** (4): 1-79.
- Pereira, S. M. & Da Silva, R. E.** (1990). Nova especie de *Campylocia* Needham & Murphy, 1924 com notas biologicas (Ephemeroptera, Euthyplociidae). Boletim Do Museu Nacional Rio de Janeiro Zoologia. **336**: 1-12.
- Salles, F. F., Domínguez, E., Molineri, C., Boldrini, R., Nieto, C., Dias, L. G.** (2018). Order Ephemeroptera. In: N. Hamada, J. Thorp, C. Rogers. (Eds.) Thorp and Covich's Freshwater Invertebrates. Volume 3, Academic Press. pp 61-117.
- Viloria, J.** (2009). Geografía económica de la Orinoquia. Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana; No 113.
- Willis, S. C., Nune, M., Montaña, C. G., Farias, I. P., Ortí, G., Lovejoy, N.R.** (2010). The Casiquiare river acts as a corridor between the Amazonas and Orinoco river basins: Biogeographic analysis of the genus Cichla. Molecular Ecology. **19** (5): 1014-1030.
- Zúñiga, M. del C., Molineri, C., Domínguez, E.** (2004). El Orden Ephemeroptera en Colombia. En: F. Fernández, M.G. Andrade-C, G.D. Amat-G. (Eds.) Insectos de Colombia, Volumen. 3. Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Santafé de Bogotá, Colombia. pp 17-42.

Artículo original

Primer registro del camarón hada *Thamnocephalus venezuelensis* Belk & Pereira, 1982 (Anostraca, Thamnocephalidae) en Colombia con observaciones morfológicas adicionales

First record of the fairy shrimp *Thamnocephalus venezuelensis* Belk & Pereira, 1982 (Anostraca, Thamnocephalidae) in Colombia with additional morphological observations

✉ Jorge D. Oliveros-Villanueva*, ✉ Daniel J. Serna-Macias, ✉ Cesar E. Tamaris-Turizo,
✉ Pedro J. Eslava-Ejaiek

Grupo de Investigación en Biodiversidad y Ecología Aplicada, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

Resumen

En el presente estudio se registra por primera vez *Thamnocephalus venezuelensis* Belk y Pereira, 1982 en La Guajira, norte de Colombia. La especie fue recolectada en charcas temporales de dos localidades. Este estudio agrega información sobre un rasgo presente en el oviducto de las hembras de *T. venezuelensis* no mencionado hasta ahora, el cual puede estar relacionado con la población de la localidad, y extiende la distribución de esta especie a Colombia.

Palabras clave: Distribución; Morfología; Temnocéfalos; Charcas temporales.

Abstract

In the present study, we recorded for the first time *Thamnocephalus venezuelensis* Belk and Pereira, 1982 in La Guajira, northern Colombia. The species was collected in temporary ponds from two localities. Here we add information about a character present in the oviduct of *T. venezuelensis* females not mentioned before that may be related to the local population and extends the distribution of this species to Colombia.

Key words: Distribution; Morphology; Thamnocephalidae; Temporary ponds.

Introducción

La familia Thamnocephalidae Packard (1883), compuesta por los comúnmente llamados “camarones hadas” (Branchiopoda: Anostraca), es un grupo de crustáceos que habita esencialmente en charcas temporales de agua dulce y expulsa los huevos en la etapa adulta una vez se inicia el periodo de sequía en estos ecosistemas; los huevos permanecen inactivos como quistes en el suelo una vez que la charca se seca y su eclosión depende de las lluvias o la presencia de agua; si ello no sucede, pueden durar décadas inactivos en la tierra (Brendonck & Belk, 1997; Brendonck, *et al.*, 2008; Tziortzis, *et al.*, 2014). Thamnocephalidae está representada por siete géneros y 70 especies en todo el mundo. Los géneros son *Aeginecta* (Rogers, *et al.*, 2018), con una especie; *Branchinella* Sayce, 1902, con 40 especies; *Dendrocephalus* Daday, 1908, con 16; *Spiralifrons* Dixon, 2010, con dos; *Carinophallus* Rogers, 2006, con una especie; *Phallocryptus* Biraben, 1951, y *Thamnocephalus* Schrank, 1803, con cinco especies (Brtek, 1996; Brendonck & Belk, 1997; Brtek & Mura, 2000; Cohen, 2002; Rogers, 2006; Rogers, *et al.*, 2018). Este último

Citación: Oliveros-Villanueva JD, Serna-Macias DJ, Tamaris-Turizo CE, *et al.* Primer registro del camarón hada *Thamnocephalus venezuelensis* Belk & Pereira, 1982 (Anostraca, Thamnocephalidae) en Colombia con observaciones morfológicas adicionales. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):546-554, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1302>

Editor: Jaime Ricardo Cantera

***Correspondencia:**

Jorge Oliveros Villanueva;
jorgeoliveros327@gmail.com

Recibido: 18 de septiembre de 2020

Aceptado: 21 de abril de 2021

Publicado: 17 de junio de 2021



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

género se ha reportado en Argentina, Aruba, México, Venezuela y Estados Unidos (Cohen, 2002; Rogersm, 2006, 2013); en Suramérica *Thamnocephalus venezuelensis* Belk & Pereira, 1982, se ha registrado en tres estados de Venezuela (Falcón, Lara y Zulia) (Belk & Pereira, 1982; López & Pereira, 2004) y en Aruba (Belk, et al., 2002); *Thamnocephalus salinarum* Cohen, 2002, se reportó en una localidad de Córdoba, Argentina (Cohen, 2002) y *Thamnocephalus chacosaltensis* Cohen, 2016, en la provincia argentina de Salta (Cohen, 2016); *Thamnocephalus mexicanus* Linder, 1941 y *Thamnocephalus platyurus* Packard, 1877 se han encontrado distribuidas en Estados Unidos y México (Linder, 1941; Fryer, 1987; Brtek, 1996; Brtek & Mura, 2000; Harp, et al., 1997; Brendonk & Belk, 1997; Cohen, 2002; Rogers, 2006; García de Lomas & García, 2008).

En Colombia, el conocimiento sobre la composición de los temnocéfalos es escaso (Brito, et al., 2011; Eslava, et al., 2014; Serna, et al., 2019) y no existen registros previos del género *Thamnocephalus*. En este trabajo se reporta por primera vez *Thamnocephalus venezuelensis* en el norte del país y se presentan algunas descripciones morfológicas de la especie.

Materiales y métodos

Los ejemplares de *Thamnocephalus venezuelensis* se recolectaron en periodos de sequía durante octubre del 2018 en charcas temporales de dos sitios localizados en La Guajira, norte de Colombia (Figura 1). Se tomaron muestras de la columna de agua con una red de zooplancton de 100 µm y las muestras recolectadas se conservaron en etanol al 70 %. Se separaron los especímenes de *Thamnocephalus* de las muestras mezcladas y luego se procesaron para la identificación taxonómica, incluidas la examinación y la disección de los apéndices taxonómicamente importantes. Se tomaron registros fotográficos a partir de especímenes enteros y disectados (estos últimos montados en glicerina y sellados con bálsamo de Canadá) para su posterior análisis biométrico con ayuda del microscopio ZEISS™ Primo Star y el microscopio estereoscópico ZEISS™ Stemi 305 (Carl Zeiss, Oberkochen, Alemania) equipado con un cámara fotográfica digital; con la ayuda de una cámara lúcida ZEISS™ Discovery.V8 se ilustró el apéndice frontal del macho como rasgo taxonómico de mayor importancia (Obregón-Barbosa, et al., 2015).

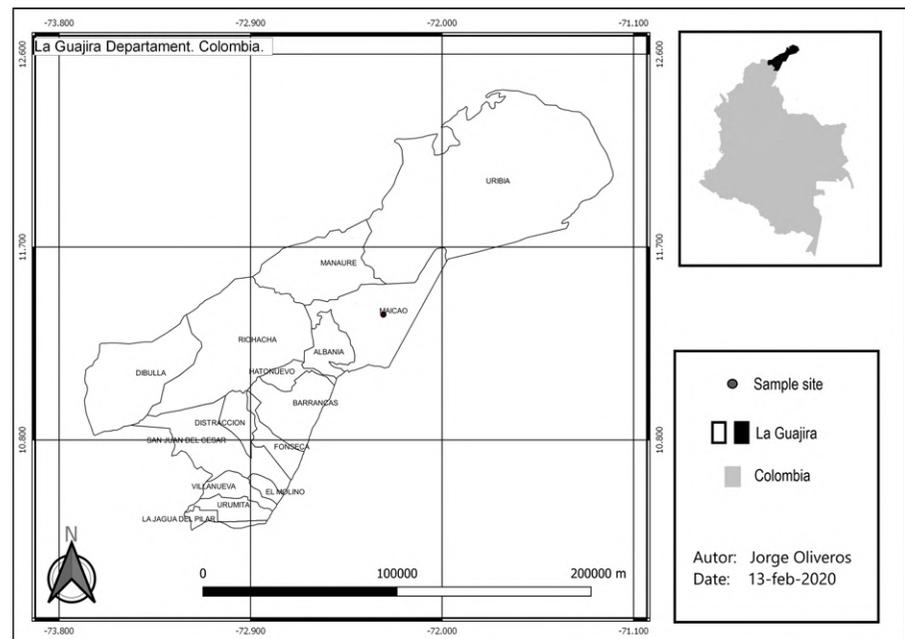


Figura 1. Distribución geográfica de los sitios de muestreo en La Guajira, norte de Colombia

Los especímenes disecados (portaobjetos) y los conservados en etanol (viales) se depositaron en el Museo de Colecciones Biológicas de la Universidad del Magdalena (CBUMAG), Colombia, donde están disponibles para consulta y examinación. La terminología morfológica utilizada fue la nomenclatura propuesta por **Obregón-Barbosa, et al.** (2015).

Resultados

Taxonomía

Clase Branchiopoda Latreille, 1817

Orden Anostraca Sars, 1867

Familia Thamnocephalidae Packard, 1883

Género *Thamnocephalus* Packard, 1877

Thamnocephalus venezuelensis **Belk & Pereira**, 1982 (Figuras 1 al 7)

Material examinado: Colombia. Región Caribe; departamento La Guajira, Manaure: 4 ♀ (CBUMAG:MAC:02005;), 3 ♂ (CBUMAG:MAC:02006), Long: 11.756517 N, Lat: -72.419700 W, 5 m a.s.l., 13 Oct. 2018; Eslava P and Quiñonez J. Región Caribe; departamento La Guajira, Maicao: 4 ♀ (CBUMAG:MAC:02007), 4 ♂ (CBUMAG:MAC:02008), Lat: 11.3848500 N, Long: -72.275950 W, 52 m a.s.l.; 13 Oct. 2018; Oliveros J, Eslava, P and Quiñonez J.

Descripción

Macho: (N = 7) longitud total 14.18 -17,75 mm, 15,96 ± 2,53 mm (promedio ± desviación estándar).

La cabeza está separada por un cuello muy pequeño del tórax, presenta ojos pedunculados (0,6 – 0,8 mm, 0,7 mm ± 0,14) (**Figura 2**), ovoides en vista lateral, sin columna prominente curvada posterior-ventral, más conspicua en especímenes más largos pero con

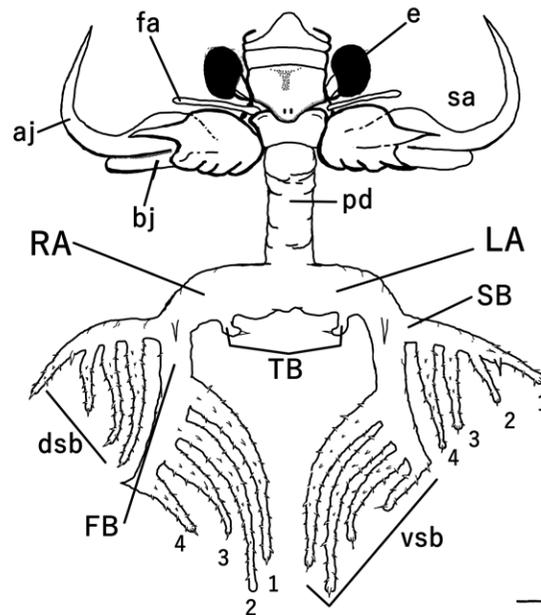


Figura 2. *Thamnocephalus venezuelensis*. Vista dorsal de la región cefálica. e: ojo; sa: segunda antena; fa: primera antena; FB, primera rama; SB, segunda rama; TB, tercera rama; aj: antenómero distal de la segunda antena; bj, antenómero basal de la segunda antena; dsb: subramas de la segunda rama; vsb: subramas ventrales de la primera rama; pd: tronco; LA: brazo izquierdo; RA: brazo derecho. Barra de escala: 1.0 mm

estructura muy similar al género. La primera antena (longitud: 1,92-2,81 mm; $2,35 \pm 0,63$) es de tipo filiforme, más larga que los ojos y se extiende hasta el extremo posterior de la segunda antena, cuya longitud en los machos es cinco veces y media mayor que la de la primera antena de las hembras; como se ve en la figura anterior, mide dos veces la longitud del ojo más el pedúnculo. La segunda antena es ornamentada, compuesta por un proceso ventral, un proceso digitiforme y dos tipos de antenómeros. El antenómero basal característico de los machos de *Thamnocephalus* es de tipo membranoso y se encuentra en la base distal de la antena, cuyo tamaño no supera un cuarto del tamaño del antenómero distal. Este último es delgado, esclerotizado, en forma de gancho, sin setas, curvado ventralmente, estrechándose hacia la punta (**Figura 3A**).

El tórax y el abdomen (longitud total: 7,12-7,88 mm, $7,50 \text{ mm} \pm 0,54$) constituyen una serie homónima de toracópodos (11 en total) en la parte ventral, similar en el género, que solo difieren en tamaño, siendo los toracópodos pares medios los más grandes. Todos los lóbulos de los toracópodos se ensanchan, como es habitual en hembras y machos del género. Los exopoditos, epipoditos, praepoditos y endopoditos tienen forma similar en todos los pares 1 a 10. En el par 11, las setas en el borde medial son cortas.

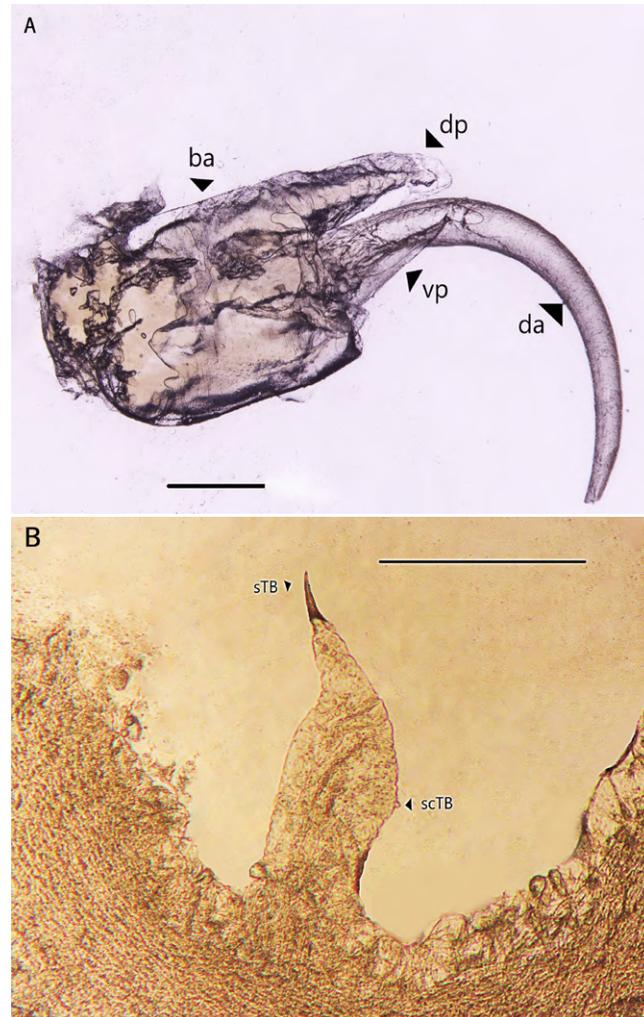


Figura 3. *Thamnocephalus venezuelensis*. **A.** Segunda antena izquierda, donde da: antenómero distal; vp: proceso ventral; ba: antenómero basal; dp: proceso digitiforme en el antenómero basal. **B.** Tercera rama izquierda del apéndice frontal del macho, donde sTB: espina esclerotizada en la punta del apéndice; scTB: espina cónica. Barra de escala: 1.0 mm

La aleta caudal (base del abdomen hasta el extremo posterior de la aleta: 4,1-6,2 mm, 5,15 mm \pm 1,48), se encuentra a partir del final del abdomen y termina en un lóbulo ancho, espatulada, en forma de abanico con setas (cercopodos) en todo el borde.

El apéndice frontal es de tipo membranoso, con un tronco corto que lleva dos ramas paralelas distalmente separadas y dobladas hacia el labrum. Plegadas ventro-lateralmente, las ramas no superan la mitad de la longitud del cuerpo; en la parte basal de los brazos principales se encuentra la tercera rama que estructuralmente es una clavija doblada hacia el centro con una espina dorsal en la punta (**Figura 3B**); la primera rama del brazo mayor se inserta dorso-medialmente, siempre a la distancia entre su base y cabeza, y está compuesta por cuatro subramas espinosas no ramificadas con una fuerte espina en la punta; normalmente la cuarta subrama es más larga que las otras tres. La segunda rama de los brazos mayores se encuentra en posición anterior con respecto a la primera rama, también compuesta por cuatro subramas espinosas con una espina singular en la punta. Normalmente la cuarta subrama tiene una columna basal gruesa como si de ella surgieran las otras tres subramas (**Figuras 2, 4**).

Hembra: (N=8): longitud total 33,8-40,1 mm, 36,9 mm \pm 4,45

La cabeza presenta ojos pedunculados ovoides en vista lateral como en los machos (0,9 -1,2 mm, 1,05 mm \pm 0,21). La primera antena de la cabeza (longitud: 3,8-4,3 mm, 4,05 mm \pm 0,35) (**Figura 5A**) es de tipo filiforme, dos veces y media más larga que los ojos. La segunda antena (longitud: 11,3-15,3 mm, 13,3 mm \pm 2,83) (**Figura 5B**) es aplanada, con una punta cuya longitud es tres veces la de la primera antena, común en las hembras

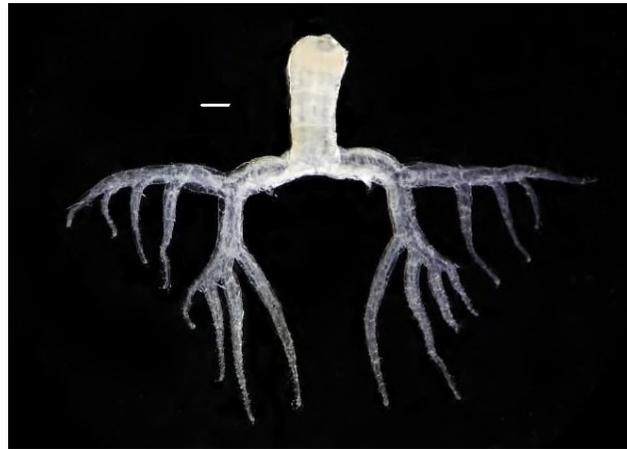


Figura 4. Vista dorsal del apéndice frontal del macho *Thamnocephalus venezuelensis*. Barra de escala: 1.0 mm

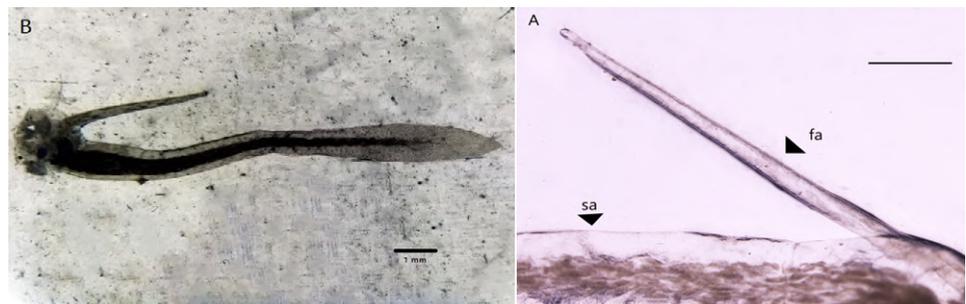


Figura 5. *Thamnocephalus venezuelensis*. Fotografías con estereomicroscopio de las antenas de la hembra. **A.** Primera antena (fa). **B.** Segunda antena (sa). Barra de escala: 1.0 mm

de *Thamnocephalus* (**Figura 5A**). El artejo proximal presenta áreas sensoriales en la superficie anterior y tiene una apófisis con setas medio-distales en forma de dedo robusto, común en el género.

El tórax y abdomen son como en los machos (tórax en longitud dorsal: 13,1-14,7 mm, 13,9 mm \pm 1,13); el ovario consta de una estructura uniramea ventral dirigida hacia la parte posterior del abdomen y un oviducto lateral en el primer segmento genital (**Figura 6A**). El surco es amplio e indiferenciado y la bolsa de cría piriforme sin estructuras complementarias para recibir los apéndices cefálicos masculinos durante el amplexo, punta del oviducto con labios triangulares ventrales y dorsales, que se extiende por debajo del sexto segmento abdominal (ocho segmentos ápodos) (**Figura 6B**).

Los genitales de las hembras presentan rayas negras en la vista lateral (**Figura 6B**); todas las hembras de este estudio presentaban este rasgo. El huevo (**Figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1302/3050>) tiene forma esférica, sin cáscara, ornamentado por nervaduras enrevesadas que forman áreas poligonales con dos hemisferios cuadrados; a veces se distribuyen de ocho a 13 áreas poligonales en una sección hemisférica; el caparazón tiene corteza externa y capa alveolar interna sin un espacio subcortical.

La aleta caudal es igual a la de los machos (base de abdomen hasta el extremo posterior de la aleta): 5,1-7,0 mm - 6,05mm \pm 1,34 (**Figura 7A, B**).

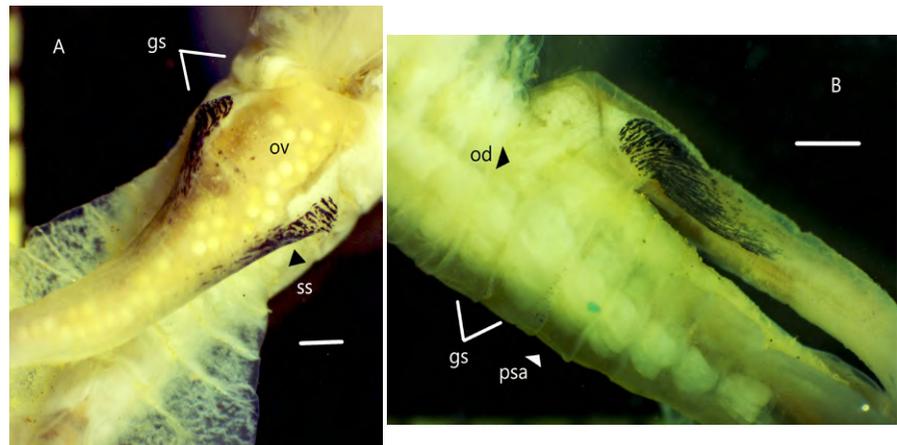


Figura 6. *Thamnocephalus venezuelensis*. Fotografías con estereomicroscopio de las estructuras de la hembra. **A.** Vista ventral del ovario (ov), se observan los huevos desarrollándose dentro; (ss): líneas en vista lateral del oviducto; (gs): segmentos de la genitalia. **B.** Abdomen en vista lateral derecha de la hembra; od: oviducto y primer segmento abdominal. Barra de escala: 1.0 mm

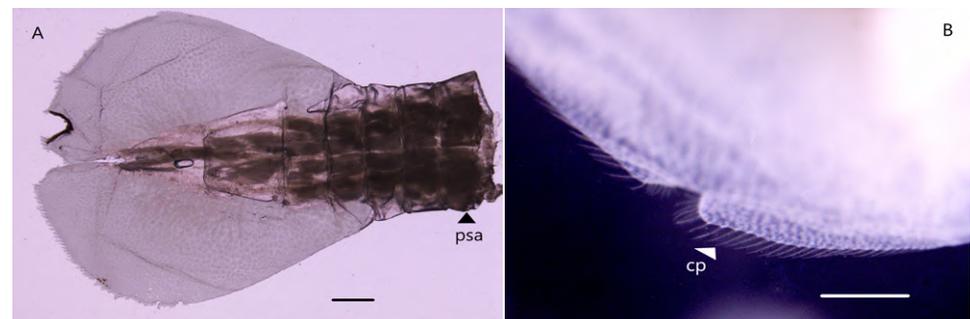


Figura 7. *Thamnocephalus venezuelensis*. Fotografías con estereomicroscopio de la aleta caudal de la especie. **A.** En vista dorsal mostrando todo el segmento del abdomen hasta el primer segmento abdominal (psa). **B.** Se observan las setas (cercopodos: cp) en la aleta. Barra de escala: 1.0 mm

Discusión

Thamnocephalus venezuelensis se diferencia de sus congéneres principalmente por tener un apéndice frontal ramificado con estructuras simples y una espina en la punta. En *T. platyurus* (Obregón-Barbosa, et al., 2015) la distribución de las ramas presenta un apéndice frontal ramificado con dos segundas ramas dorsales. En *T. mexicanus* la tercera rama es plana, ancha y en forma de hoja, con un apéndice frontal muy ramificado (Figura 5A-D en Obregón-Barbosa, et al., 2015); en Belk & Pereira (1985) las ilustraciones de *T. venezuelensis* carecen de algunos detalles del apéndice frontal, el cual tiene una subrama adicional en la segunda rama con cinco subramas en total. Esta especie muestra variabilidad en las subramas de la segunda rama: cuatro y tres (ver Cohen, 2016), aunque la variación es mínima en las subramas de la segunda rama, considerando que no afecta la relevancia de este importante rasgo taxonómico. Además, es cierto que hay una variación mínima entre las subramas en otros miembros de *Thamnocephalus* (Obregón-Barbosa, et al., 2015), lo que ameritaría un análisis molecular. Como lo indicaron anteriormente Linder (1941) y Moore & Young (1964), el rasgo morfológico más importante ha sido el apéndice frontal cefálico. En lo registrado hasta la fecha, el apéndice frontal de *T. platyurus* y *T. mexicanus* no presenta semejanza con el de *T. venezuelensis* ni el de *T. chacosaltensis* (Cohen, 2016); por otro lado, *T. venezuelensis* difiere de *T. salinarum* según la descripción de Cohen (2002), ya que este último presenta el apéndice frontal doblado, con un tronco corto que lleva dos ramas paralelas, separadas distalmente, dobladas hacia el labrum, las cuales no exceden la mitad de la longitud (excluyendo la apófisis digitiforme medial) del segmento basal de la segunda antena y no cubren parcialmente el labrum (Figura 6 en Cohen, 2002). El huevo de la hembra es similar al de otras especies de *Thamnocephalus*, pero su estructura es como la del huevo de *T. mexicanus* (Obregón-Barbosa, et al., 2015). Por último, un rasgo que no mencionan Belk & Pereira (1985) es la presencia de líneas rayadas en la vista lateral del oviducto de las hembras, por lo que posiblemente sea un rasgo distintivo de la población hallada en La Guajira, Colombia.

Información suplementaria

Figura 1S. Huevos de la hembra adulta de *Thamnocephalus venezuelensis* de La Guajira colombiana. Barra de escala: 1.0 mm. Ver figura 1S en <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1302/3050>

Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto “Redes tróficas de charcas estacionales en el norte del departamento de La Guajira, Colombia” (Proyecto número 16ED16C3F13, PIs: R. Cayón Reyes) inanciado por FONCIENCIAS de la Universidad del Magdalena. Agradecemos a Juan Manuel Fuentes por su invaluable ayuda en el manuscrito y a los estudiantes de biología de la Universidad del Magdalena Raúl Cayón y Daniel Alemán, y al biólogo José Daniel Quiñonez, por su ayuda en el trabajo de campo.

Contribución de los autores

Los cuatro autores participaron en el proceso de conceptualización, el tratamiento de la información y los datos y en la escritura del manuscrito.

Conflicto de intereses

Ninguno que declarar

Referencias

Belk, D. & Pereira, G. (1982). *Thamnocephalus venezuelensis*, new species (Anostraca: Thamnocephalidae), first report of *Thamnocephalus* in South America. *Journal of Crustacean Biology*. 2: 223-226. Doi: 10.2307/1548001

- Belk, D., Belk, M. S., Reading, KAL.** (2002). Survey of large branchiopods on Aruba and observations on taxonomic characters in *Leptestheria* (Spinicaudata): *Hydrobiologia*. **486**: 115-118. Doi: 10.2307/1549083
- Birabén M.** (1951). Nuevo género de Phyllopora Anostraca (Crust.). *Physis*. **20**: 324-329.
- Brendonck, L. & Belk, D.** (1997). On potentials and relevance of the use of copulatory structures in Anostracan taxonomy. *Hydrobiologia*. **359**: 83-92. Doi: 10.1023/A:1003125812020
- Brendonck, L., Rogers, C., Olesen, J., Weeks, S., Hoeh, W. R.** (2008). Global diversity of large branchiopods (Crustacea: Branchiopoda) in freshwater. *Hydrobiologia*. **595**: 167-176. Doi: 10.1007/s10750-007-9119-9
- Brito, D., Brito, R., Pereira, G.** (2011). Supervivencia de *Dendrocephalus spartaenovae* (Crustacea: Anostraca: Thamnocephalidae) alimentado con un cultivo mixto de microalgas. *Zootecnia Tropical*. **29**: 61-68.
- Brtek, J.** (1996). Gurneya, a new genus of Thamnocephalidae (Branchiopoda, Anostraca), with some notes on the taxonomy of the family. *Zborník Slovenského Národného Múzea. Prírodné Vedy*. **42**: 3-8. Doi: 10.11646/zootaxa.1260.1.1
- Brtek, J. & Mura, G.** (2000). Revised key to families and genera of the Anostraca with notes on their geographical distribution. *Crustaceana*. **73** (9): 1037-1088. Doi: 10.1163/156854000505083
- Cohen, R. G.** (2002). Description of a new subgenus and a new species of *Thamnocephalus* (Crustacea: Branchiopoda: Anostraca) from the Salinas Grandes Basin, Córdoba Province, Argentina. *Hydrobiologia*. **486**: 91-100. Doi: 10.1023/A:1021382214439
- Cohen, R. G.** (2016). *Thamnocephalus chacosaltensis*, a new species of Anostraca (Crustacea: Branchiopoda) from Salta province (Argentina). *Zootaxa*. **4088** (1): 076-090. Doi: 10.11646/zootaxa.4088.1.3
- Daday de Deés, E.** (1908). Diagnoses praecursoriae specierum aliquot novarum e familia Branchiopodidae. *Annales Des Sciences Naturelles, Zoologie série 9*. **7**: 137-150.
- Dixon, C. J.** (2010). *Spiralifrons*, replacement name for *Gurneya* Brtek, 1996 (Branchiopoda, Thamnocephalidae), junior homonym of *Gurneya* Roth, 1974 (Insecta, Blattaria). *Crustaceana*. **83**: 1279-1280. Doi: 10.1163/001121610X526960
- Eslava, P., Serna-Macías, D., Cohen, R.** (2014). Redescription of *Dendrocephalus affinis* (Anostraca: Thamnocephalidae): First record of the species from Colombia and additional morphological observations useful in taxonomy. *Journal of Crustacean Biology*. **34**: 82-89. Doi: 10.1163/1937240X-00002205
- Fryer, G.** (1987). A new classification of the branchiopod Crustacea. *Zoological Journal of the Linnean Society*. **91**: 357-383. Doi: 10.1111/j.1096-3642.1987.tb01420.x
- García de Lomas J. & García, C. M.** (2008). Observaciones de Branchiopoda en lagunas temporales de la provincia. *Revista de la Sociedad Gaditana de Historia Natural*. **5**: 145-151.
- Harp, G. L., Leeds, G., Robinson, H. W.** (1997). First report on the fairy shrimps (Branchiopoda: Anostraca) of Arkansas. *The Southwestern Naturalist*. **42**: 259-264.
- Linder, F.** (1941). Contributions to the morphology and the taxonomy of the Branchiopoda Anostraca. *Zoologiska Bidrag fran Uppsala*. **20**: 101-302.
- López, B. & Pereira, G.** (2004). Larval development and biometry of cysts in *Thamnocephalus venezuelensis* Belk & Pereira, 1982 (Anostraca). *Nauplius*. **12**: 11-20.
- Moore, J. & Young, B.** (1964). Fairy shrimps of the genus *Thamnocephalus* (Branchiopoda, Anostraca) in the United States and Mexico. *The Southwestern Naturalist*. **9**: 68-77. Mura, G. (1992). Additional remarks. Doi: 10.2307/3668786
- Obregón-Barbosa, H., Murugan, G., García, H., Maeda, A.** (2015). A systematic review of Mexican populations of the fairy shrimp genus *Thamnocephalus* (Branchiopoda: Anostraca). *Journal Crustacean Biology*. **35** (3): 407-432. Doi: 10.1163/1937240X-00002329
- Packard, A. S.** (1877). Descriptions of new phyllopod Crustacea from the West Bull. U. S. Geol. Geogr. Surv Terr. **3**: 171-179. Doi: 10.1023/A:1021382214439
- Packard, A. S.** (1883). A monograph of the phyllopod Crustacea of North America, with remarks on the order Phyllocarida. Twelfth annual report of the United States geological and geographical survey of the territories: a report of progress of the exploration in Wyoming and Idaho for the year 1878, F. V. Hayden, Part 1, section **2**: 295-593.
- Rogers, D. C.** (2006). A genus level revision of the Thamnocephalidae (Crustacea: Branchiopoda: Anostraca). *Zootaxa*. **1260**: 1-25. Doi: 10.5281/zenodo.173180
- Rogers, D. C.** (2013). Anostraca catalogus (Crustacea: Branchiopoda). *The Raffles Bulletin of Zoology*. **61**: 525-546.

-
- Rogers, D. C., Archangelsky, M., Pessacq, P.** (2018). A new genus and species of thamnocephalid fairy shrimp (Branchiopoda: Anostraca) from Argentina (Chubut Province). *Nauplius*. **26**, e2018021: 1-8. Doi: 10.1590/2358-2936e201802
- Sayce, O. A.** (1902). The Phyllopoda of Australia, including descriptions of some new genera and species. *Proceedings of the Royal Society of Victoria*. **15**: 224-261.
- Serna-Macías, D., Eslava-Eljaiek, P., Tamaris-Turizo, C.** (2019). Caracterización de una charca estacional del norte de Colombia y aspectos biológicos y ecológicos de *Dendrocephalus Affinis*. *Revista Peruana de Biología*. **26** (3): 361-68.
- Tziortzis, I., Zogaris, S., Papatheodoulou, A., Marrone, F.** (2014). First record of the Tadpole Shrimp *Triops cancriformis* (Branchiopoda, Notostraca) in Cyprus. *Limnetica*. **33** (2): 341-348. Doi: 10.23818/limn.33.26

Artículo de revisión

Las especies paisaje como estrategia de conservación de la biodiversidad: evaluación cuantitativa de su efectividad

Landscape species approach for biodiversity conservation: a quantitative assessment of effectiveness

German Forero-Medina*, Leonor Valenzuela, Carlos A. Saavedra-Rodríguez

Wildlife Conservation Society

Artículo de posesión para admisión de GFM, como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

Los programas de conservación de especies son una estrategia común para enfrentar la pérdida de biodiversidad. El concepto de especies paisaje se basa en la selección de un conjunto de especies cuyas características permiten determinar y abordar presiones que afectan la biodiversidad en un territorio. Esta aproximación tiene dos supuestos principales: que la conservación de las especies paisaje deriva en 1) la conservación de otras especies del sistema y 2) en la protección de la estructura del ecosistema. Para evaluar estas hipótesis usamos el ejemplo del “Proyecto Vida Silvestre”, una iniciativa de conservación desarrollada bajo esta aproximación en dos áreas de Colombia. Evaluamos de forma cuantitativa la primera hipótesis usando modelos de ocupación multitemporada, con datos de cámaras trampa (2015 a 2017). Para la segunda hipótesis, estimamos el efecto de las acciones sobre la pérdida de bosque a escala de predio y de paisaje, comparando las tasas de deforestación con áreas similares en ausencia de las acciones (contrafactual). Las intervenciones, en particular los acuerdos de conservación, aumentaron las tasas de colonización y redujeron las tasas de extinción de algunas especies paisaje y otros vertebrados. Otras especies del sistema no se vieron impactadas por esta estrategia. La deforestación fue menor en el paisaje que en el área circundante, pero no se evidenció un efecto significativo. A escala del predio, en el 2017 los acuerdos redujeron la deforestación. Los diseños presentados permitieron establecer relaciones de causalidad y probar hipótesis claras para medir el éxito de las intervenciones en programas de conservación similares.

Palabras clave: Conservación; Evaluación de impacto; Monitoreo; Especies; Biodiversidad; Trópico; Colombia.

Abstract

Species-oriented conservation programs are a common strategy to halt biodiversity loss. The landscape species concept is based on the selection of a group of species with certain characteristics allowing to identify and address the threats to biodiversity present in a particular area. It has two main assumptions: 1) that conservation of landscape species will result in the conservation of other species in the ecosystem, and 2) that it will also maintain the ecosystem structure and its corresponding functions. To assess these hypotheses, we rely on data from the Wildlife Project, a conservation initiative developed with this approach in two areas of Colombia. We evaluated in a quantitative fashion the first hypothesis through multi-season occupancy models using data from camera traps (2015 to 2017). We then estimated the effect of conservation actions in reducing forest loss at the scale of individual land properties and at the landscape scale by comparing deforestation rates in similar areas but in the absence of conservation actions (counterfactual). The strategies, specifically conservation agreements, increased colonization rates and reduced extinction rates for some landscape species and other vertebrates. Other species were not affected by this specific strategy. Deforestation was lower in the landscape than in adjacent areas, although there was no significant effect. At the individual property scale, in 2017 conservation agreements reduced deforestation rates. The methods presented here allow assessing causality and testing clear hypotheses to measure the effect of specific actions in conservation programs.

Keywords: Conservation; Program evaluation; Monitoring; Biodiversity; Tropics; Colombia.

Citación: Forero-Medina G, Valenzuela L, Saavedra-Rodríguez CA. Las especies paisaje como estrategia de conservación de la biodiversidad: evaluación cuantitativa de su efectividad. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):555-569, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1252>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

German Forero-Medina;
gforero@wcs.org

Recibido: 28 de junio de 2020

Aceptado: 26 de abril de 2021

Publicado: 17 de junio de 2021



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

Introducción

La acelerada transformación y pérdida de ecosistemas y la consecuente erosión de la biodiversidad imponen retos cada vez mayores a quienes trabajan por su adecuado manejo y conservación. El número de especies consideradas en peligro de extinción a nivel global es cerca de un millón (Díaz, *et al.*, 2019) y se ha demostrado que un gran número de poblaciones de vertebrados está en declive (Green, *et al.*, 2019; Ceballos, *et al.*, 2017). Colombia también ha experimentado estos procesos, y aunque más de la mitad del territorio nacional está aún cubierto con bosques, los motores de transformación han afectado cerca del 50 % de los ecosistemas (Etter, *et al.*, 2017) y más de 1.500 especies de fauna y flora están amenazadas (Andrade-Correa, 2011).

Para dar respuesta a estos procesos de transformación y pérdida de biodiversidad, muchos países han implementado numerosas iniciativas de conservación, con mayor o menor éxito. Gran parte de estos esfuerzos se han enfocado en la conservación de especies particulares (*single-species*), en parte influenciados por el *Endangered Species Act* (ESA) de los Estados Unidos, una política que obliga al estado a tomar acciones de conservación de las especies (y sus hábitats) que se encuentren en dicha lista de riesgo.

Sin embargo, algunos investigadores han cuestionado la aproximación basada en especies, argumentando que no es posible salvarlas a todas con los recursos limitados que existen. La única alternativa, sugieren, es pasar a una aproximación de paisaje, en donde al manejar o conservar a una escala más amplia, se lograría salvar a todos los componentes de un sistema a través de una estrategia unificada (Franklin, 1993). Esta aproximación tiene cada vez más adeptos, aunque aún presenta ciertas dificultades conceptuales y operativas (Goldstein, 1999a; Simberloff, 1998). Una de las características principales del manejo a nivel de ecosistemas es el enfoque centrado en procesos ecológicos y no en especies individuales, pero no está claro cuáles procesos son más importantes, o cómo priorizarlos o medirlos (Tracy & Brussard, 1994). Tampoco es claro cómo la protección de ciertos procesos asegura los requerimientos de los organismos que se quieren mantener (Goldstein, 1999a). En muchos casos, es posible mantener procesos a expensas de perder especies, algo que no es lo ideal desde una perspectiva de conservación.

Por estas razones, algunos autores consideran el manejo de ecosistemas como un “atajo”, que subestima el rol de las especies y los requerimientos de sus poblaciones en la construcción de los planes de manejo (Goldstein, 1999b). Además, aducen que los objetivos definidos en la aplicación de dicha aproximación tienden a ser vagos (“proteger la diversidad”, “mantener los procesos ecológicos”), sin hipótesis claras y evaluables, y sin una medición objetiva del avance en su consecución. Tales críticas no implican un desconocimiento del valor e importancia del estudio del nivel ecosistémico, sin embargo, para que el manejo de ecosistemas sea útil en la práctica, los criterios que utiliza deben reflejar las necesidades de los organismos que busca proteger, más que propiedades emergentes, funciones no definidas claramente o procesos de grupos de organismos (Goldstein, 1999a; Goldstein, 1999b).

La conservación basada en especies, por su parte, tiene sus propios retos, siendo el principal la imposibilidad de estudiar y manejar todas las especies de un sistema (Simberloff, 1998). Por esto se hace necesario seleccionar elementos que representen las condiciones del sistema y que permitan la implementación de acciones de manejo y conservación. Algunas propuestas iniciales basadas en especies han intentado responder este reto (especies indicadoras, especies sombrilla, especies bandera). Al estudiar y reconocer las limitaciones de cada una de estas propuestas, el enfoque de especies ha ido evolucionando para conciliar mejor la teoría ecológica con la práctica. Uno de los primeros conceptos fue el de especie indicadora, basado en la premisa de que su presencia o fluctuación refleja la de otras especies de la comunidad (Landres, *et al.*, 1988; Simberloff, 1998). Cuando se aspira a determinar la tendencia de otras especies, sería necesario evaluar la presencia concurrente de la especie indicadora y estas otras especies, o verificar que las acciones

en pro de la conservación de las primeras inciden en las poblaciones de las segundas (**Simberloff**, 1998). Estas evaluaciones generalmente no se realizan, lo que resulta en que las especies indicadoras (en conservación) se basen, generalmente, en supuestos.

Las especies sombrilla, un concepto más amplio, son especies con requerimientos de hábitat muy grandes, por lo que su conservación automáticamente salvaría a otras especies (**Wilcox**, 1984; **Roberge & Angelstam**, 2004). De nuevo, este concepto requiere datos que lo soporten, pues salvar a la especie sombrilla no necesariamente salvará a todas las otras especies del ecosistema, que pueden tener requerimientos de hábitat muy específicos.

Por otra parte, las especies bandera (*flagship species*) son un concepto con objetivos orientados más a la gestión que a lo ecológico. Son aquellas especies que, por su carisma, reconocimiento y aprecio por parte de los humanos, se usan como símbolo de programas de conservación con el objetivo de involucrar al público y llevar un mensaje (**Shrader-Frechette & McCoy**, 1993). Si bien el método es popular y puede ser útil en la consecución de recursos, se basa únicamente en el potencial de la especie para cautivar al público. En este sentido, este concepto, al igual que los anteriores, carece del soporte ecológico que demuestre que su conservación se traduce en beneficios para otras especies (**Caro, et al.**, 2004). Otra limitación potencial de la aplicación de este concepto es que no todas las regiones o territorios cuentan con especies llamativas y carismáticas que puedan ser usadas como especie bandera en programas de conservación.

Una aproximación novedosa en su momento, fue el uso del concepto de especie clave, o piedra angular (*keystone species*) en conservación (**Mills, et al.**, 1993; **Simberloff**, 1998), el cual alude a aquellas especies que tienen una función esencial para mantener la estructura o composición de un sistema, más allá de lo esperado por su abundancia (**Paine**, 1969). Al conservar estas especies, se estarían conservando sus funciones y dichos mecanismos de regulación. De cierta forma, este concepto intenta conjugar la aproximación de especies con la de procesos ecosistémicos. No obstante, la identificación y comprobación de especies clave y sus funciones no es sencilla, y no sabemos cuántos ecosistemas contienen especies clave que puedan ser objeto de conservación.

Una aproximación que busca conciliar el enfoque centrado en las especies con el de ecosistemas es la conservación basada en especies paisaje. En este modelo se selecciona un conjunto de especies cuyas características biológicas, requerimientos espaciales e importancia para las comunidades humanas permiten determinar y abordar actividades que tienen impacto en la biodiversidad en el paisaje (**Sanderson, et al.**, 2002). Este tipo de conservación se diferencia de otras aproximaciones basadas en especies en el hecho de que se enfoca no solo en la selección de las especies sino en el proceso de planificación, detección de las amenazas y las estrategias necesarias para su mitigación. Las especies paisaje se definen como aquellas que usan áreas extensas, ecológicamente diversas, y que usualmente tienen un impacto significativo en la estructura y función de los ecosistemas, pero son susceptibles a las alteraciones humanas de los paisajes (**Sanderson, et al.**, 2002). Los cinco criterios para elegir el conjunto de especies paisaje son: requerimientos de área, heterogeneidad de hábitats, función ecológica, vulnerabilidad e importancia socioeconómica (**Coppolillo, et al.**, 2004). Con base en las especies seleccionadas, se construyen modelos conceptuales que identifican las presiones a que están sometidas sus poblaciones, los factores que contribuyen a estas presiones y las estrategias para mitigarlos en el paisaje. Así, este modelo de trabajo considera los factores biológicos y sociales que inciden sobre el estado de las especies y ecosistemas, y viceversa. La conservación de especies paisaje reconoce, entonces, que los organismos pueden existir en espacios heterogéneos que también satisfacen requerimientos económicos y culturales de las personas.

Este tipo de conservación se basa, no obstante, en una serie de supuestos, siendo el principal que al proteger y cumplir con las necesidades de hábitat y supervivencia de las poblaciones de especies paisaje y reducir sus presiones a través de las acciones de conservación, se logrará la conservación de otras especies y del paisaje en general (**Sanderson, et al.**, 2002). En teoría, la conservación de las especies paisaje ayudaría

también a mantener la estructura de los ecosistemas y, por lo tanto, la función derivada de esa estructura. Así, es necesario estimar la validez de estos supuestos y desarrollar mecanismos de evaluación del impacto de las iniciativas de conservación implementadas bajo dicha aproximación. En este estudio proponemos un modelo de planificación basado en especies paisaje y alternativas para evaluar la efectividad en su conservación y la de otros elementos de la biodiversidad (especies de vertebrados en este caso), utilizando una aproximación cuantitativa.

Materiales y métodos

Para describir la planificación en el marco del modelo y evaluar su impacto en la conservación de la biodiversidad utilizamos como ejemplo el “Proyecto Vida Silvestre”, una iniciativa de conservación de la biodiversidad a escala de paisaje desarrollada en dos regiones del país, la Orinoquia y el Magdalena Medio. En la planificación e implementación de las acciones en cada región se desarrollaron los siguientes pasos: 1) selección del conjunto complementario de especies paisaje, 2) definición del paisaje de conservación, 3) planificación de estrategias de conservación, 4) implementación de acciones de conservación y 5) diseño e implementación de un programa de monitoreo.

Las especies paisaje en cada región se seleccionaron a partir de una lista de especies candidatas (Corzo, *et al.*, 2010), con apoyo del programa *Landscape Species Selection - LSS* (Strindberg & Didier, 2006). Se compiló información secundaria en torno a cada especie para evaluar los cinco criterios mencionados y calcular un puntaje agregado. La especie con mayor puntaje se seleccionó como la primera, en tanto que las siguientes se seleccionaron una a una en iteraciones consecutivas. En cada iteración se estableció la especie más complementaria a las ya seleccionadas, es decir la que cubría nuevos (distintos) hábitats y amenazas, y así sucesivamente hasta completar todos los hábitats y amenazas detectadas en el paisaje (Coppolillo, *et al.*, 2004; Strindberg & Didier, 2006).

En el paisaje del Magdalena Medio, partiendo de una lista de 65 especies candidatas, se seleccionaron el paujil de pico azul (*Crax alberti*), el choibo (*Ateles hybridus*), el manatí del Caribe (*Trichechus manatus*), el bagre del Magdalena (*Pseudoplatystoma magdaleniatum*) y el árbol del carrito (*Aspidosperma megalocarpon*). En el paisaje de la Orinoquia las especies seleccionadas fueron la danta de tierras bajas (*Tapirus terrestris*), el caimán llanero (*Crocodylus intermedius*), la tortuga charapa (*Podocnemis expansa*), la palma de moriche (*Mauritia flexuosa*) y el árbol de congrio (*Acosmium nitens*). Una vez seleccionadas las especies, se delimitó el paisaje de conservación dentro de cada región considerando su distribución y la presencia de actividades humanas. En cada región se incluyeron las áreas con presión debida a la deforestación con base en los datos de IDEAM (Galindo, *et al.*, 2014). El paisaje del Magdalena Medio se ubica en los municipios de Yondó, en Antioquia, y Puerto Parra y Cimitarra en Santander. Este paisaje tiene un área de 2.536 Km², de los cuales el 57 % es territorio agrícola y 5 %, humedales. Presenta ecosistemas fragmentados por actividades humanas, pero contiene relictos de bosque húmedo tropical que albergan una gran diversidad biológica. El paisaje de la Orinoquia incluye partes de la cuenca media y baja del río Bitá, en Vichada, en un área de 4.074 Km², de los cuales el 80 % corresponde a sabanas y bosques naturales, y tan solo el 1 %, a actividades agrícolas.

Para planificar las estrategias de conservación de cada paisaje, construimos de forma participativa modelos conceptuales. Un modelo conceptual es una representación gráfica de la situación en un área particular, que muestra lo que el proyecto aspira a lograr, los factores que tienen un impacto negativo (o positivo) sobre las especies seleccionadas, y cómo las acciones de conservación proyectadas abordan las amenazas y logran resultados (The Conservation Measures Partnership, 2020). Con base en los modelos conceptuales se construyeron las estrategias de conservación en cada paisaje. El trabajo y la participación de las comunidades locales fue un eje transversal en todo el proceso.

Con el fin de evaluar el impacto de las acciones en la conservación de las especies paisaje y la biodiversidad, se diseñó e implementó un programa de monitoreo entendido como un componente integral de la adopción de decisiones basado en modelos de respuesta

del sistema a las intervenciones, o monitoreo para la conservación activa (**Nichols & Williams, 2006**). El programa contiene indicadores de gestión, de resultados y de impacto. En el presente estudio nos enfocamos en el impacto de las actividades implementadas en la biodiversidad. Otros indicadores se describirán en detalle en publicaciones futuras.

Evaluamos dos hipótesis fundamentales en el marco de esta aproximación: 1) que las acciones de conservación derivadas de la planificación adecuada con base en las especies paisaje tienen un efecto positivo en sus poblaciones (abundancia estimada como ocupación) y en otros elementos de la biodiversidad, y 2) que la estrategia de conservación en el paisaje tiene efectos positivos en la estructura de los ecosistemas medida, en este caso, a través de la reducción en la deforestación.

Para evaluar la primera y principal hipótesis del modelo, utilizamos una aproximación cuantitativa basada en modelos de ocupación multitemporada a partir de datos provenientes de trampas cámara y transectos. Estos modelos son un método para describir la ocupación (*occupancy*) o la proporción de sitios ocupados por una especie durante un intervalo de tiempo limitado cuando la probabilidad de detectar dicha especie es menor a uno (**Mackenzie, et al., 2003**). Los modelos de ocupación permiten estimar parámetros como la colonización y la extinción en los sitios evaluados, para lo cual se requieren observaciones replicadas de detección o no detección en las unidades espaciales de muestreo. En cada paisaje se sobrepuso una cuadrícula de celdas de 1x1 Km², siendo la celda la unidad espacial de análisis. De cada cuadrícula (paisaje) se seleccionaron y muestrearon 60 celdas, cada una con más del 10 % de su área boscosa. Se realizaron temporadas anuales de muestreo con cámaras trampa (Reconyx HC500) en el 2015 y el 2017 durante la época seca (enero-mayo), con un muestreo efectivo de por lo menos 45 noches por cámara y por temporada. Para los análisis, se dividieron los datos de las cámaras trampa en periodos de 15 días, de manera que cada uno representaba una ocasión de muestreo. Para complementar el muestreo, en cada celda se recorrieron tres transectos de 800 m en dos ocasiones (en total seis réplicas: dos temporales y tres espaciales), en los que se registraron encuentros visuales (primates) y señales y rastros de mamíferos terrestres. La información referente a los ungulados se analizó a partir de los dos métodos combinados (cuatro réplicas para cámaras y seis de transectos), en tanto que para *Ateles hybridus* solo se tuvieron en cuenta los seis transectos por celda. Las demás especies se trabajaron solo con los datos de las cámaras trampa.

Para cada especie se generaron modelos de ocupación multitemporada (**Fiske, et al., 2011; Mackenzie, et al., 2003; MacKenzie, et al., 2006**), los cuales proporcionan estimaciones de una ocupación dinámica que tiene en cuenta la ocupación inicial (ψ_1) y las tasas de colonización (γ) y extinción (ϵ) promedio por sitio, lo que permite estimar los cambios en la ocupación entre dos periodos de tiempo (2015-2017), corrigiendo por la probabilidad de detección (p) por temporada (**Fiske, et al., 2011; Mackenzie, et al., 2003; MacKenzie, et al., 2006**). Estos modelos permiten establecer las covariables que afectan las probabilidades de colonización (que una celda no ocupada pase a ser ocupada) o extinción (que una celda ocupada deje de estarlo). De esta forma se evaluaron de manera explícita las relaciones de causalidad entre la intervención (acuerdos) y los procesos ecológicos de ocupación de un área.

Para determinar el efecto de los acuerdos de conservación en la ocupación de cada una de las especies, se generaron modelos para evaluar el efecto del área bajo acuerdo en las tasas de colonización y extinción en cada celda. El área bajo acuerdo correspondía al área incluida en los acuerdos de conservación firmados con los propietarios de predios. En los predios con acuerdos se establecieron compromisos para reducir o eliminar la cacería de especies silvestres y proteger los ecosistemas naturales, y se fomentaron prácticas sostenibles de producción como incentivo. Además, en los modelos se incluyó el área de bosque presente en el 2017 como un factor ecológico que podría influir en la ocupación de las especies. Se construyeron y evaluaron 16 modelos para cada una de las especies, incluidas las combinaciones posibles entre las dos variables (área de acuerdo, área de bosque) para ambos parámetros (colonización y extinción), que representaban hipótesis

viables y relevantes, y los modelos nulos en los que no existía un efecto de las covariables en los parámetros. Los modelos se ajustaron utilizando el paquete Unmarked en el programa R (Fiske, *et al.*, 2011). Para determinar el modelo que representaba de mejor manera los datos, se utilizaron el criterio de información de Akaike corregido (AICc) y los pesos AIC (ω AIC) para cada especie (puntaje AIC más bajo y ω más alto) (Burnham & Anderson, 2002). Para comparar el efecto de cada variable en las tasas de colonización y de extinción de cada especie, se sumaron los pesos de AIC para todos los modelos que contenían la variable de interés como una medida de su peso relativo (Arnold, 2010).

Para evaluar la segunda hipótesis, se estimó el impacto de las acciones en la deforestación ocurrida en el período de estudio. No se midió directamente la estructura de los ecosistemas, pero se usó como medida indirecta la deforestación, asumiendo que reducir la deforestación implica un mantenimiento de la estructura. Debido a que algunas intervenciones se realizaron en áreas específicas (predios con acuerdos), pero otras tuvieron alcance en todo el paisaje (fortalecimiento comunitario, educación ambiental, etc.), se evaluó el efecto en las dos escalas espaciales: de predio y de paisaje. Para determinar el efecto a escala de paisaje, se compararon las tasas de pérdida de bosque dentro de cada paisaje (el área que engloba las áreas de intervención) y un área de amortiguamiento de 5 km alrededor de cada uno (Magdalena Medio y Orinoquia), con los mismos ecosistemas y condiciones similares, reduciendo así la heterogeneidad en variables asociadas a la deforestación (Armenteras, *et al.*, 2009). Para esta comparación se usó la información sobre pérdida de bosques de Hansen, *et al.* (2013), con una resolución de 30 m², entre el 2015 y el 2018. Este método permite evaluar el impacto de las intervenciones en el paisaje en la reducción de las tasas de deforestación al compararlas con lo ocurrido en un área con condiciones similares y en ausencia de las intervenciones. Usamos estadísticas no paramétricas y pruebas de Wilcoxon pareadas debido al bajo número de réplicas (4 años) y la ausencia de normalidad en los datos de tasas de deforestación. En esta primera aproximación, hubo un valor de deforestación pareado por año (el paisaje y su zona de amortiguamiento) y las réplicas (pseudoréplicas) fueron los años, y el análisis se hizo de manera independiente para cada paisaje. Para evaluar el efecto a escala de los predios con acuerdos de conservación, se usó una aproximación similar, esta vez con una zona de amortiguamiento para cada predio, con el fin de comparar de manera pareada las tasas de deforestación. En este segundo análisis, las réplicas fueron los predios con sus respectivas zonas de amortiguamiento; se hizo una prueba estadística para cada año y cada paisaje comparando de forma pareada los valores de deforestación en predios y las zonas de amortiguamiento (2015-2018). Las pruebas de Wilcoxon se realizaron con el paquete exactRankTests de R (Hothorn & Hornik, 2019).

Resultados

Las estrategias implementadas, derivadas de la planificación participativa en cada paisaje, incluyeron acuerdos de conservación con propietarios (no cacería, protección de hábitat, restauración), generación de corredores biológicos, implementación de proyectos productivos sostenibles como incentivos y fortalecimiento comunitario. En este trabajo pudimos evaluar de manera cuantitativa el efecto de los acuerdos de conservación a escala de predio en algunas especies de vertebrados. Con base en la información obtenida de las trampas cámara y los transectos, fue posible analizar las siguientes especies en el paisaje del Magdalena Medio: paujil de pico azul (*C. alberti*), choibo (*A. hybridus*), paca (*Cuniculus paca*), guatín (*Dasyprocta punctata*) y pecarí de collar (*Pecari tajacu*). Las dos primeras son especies paisaje del proyecto, las otras tres, ejemplos de otras especies que se verían favorecidas por las acciones dirigidas a las primeras. En el paisaje de Orinoquia obtuvimos información para la danta de tierras bajas (*T. terrestres*), especie paisaje, y otras cinco especies de vertebrados terrestres (Tabla 1).

El área bajo acuerdos de conservación en el Magdalena Medio fue una variable explicativa de la probabilidad de colonización para *C. alberti* y *D. punctata*, apareciendo en los modelos con mejor ajuste y teniendo un efecto positivo y significativo (Tabla 1, figura 1).

Tabla 1. Resultado de los modelos ajustados para cada especie en el paisaje del Magdalena Medio

Especie	Modelo	N	AIC	AICc	ω	$\Delta AICc$
<i>Crax alberti</i>	Acuerdo ~ 1 ~ 1	75	203,67	204,48	0,28	0,00
	Acuerdo + bosque ~ 1 ~ 1	75	204,00	205,15	0,24	0,67
<i>Ateles hybridus</i>	Acuerdo + bosque ~ 1 ~ 1 *	80	232,95	234,10	0,36	0,00
	Acuerdo + bosque ~ bosque ~ 1	80	234,97	236,52	0,13	2,42
<i>Cuniculus paca</i>	1 ~ 1 ~ 1	75	439,16	439,70	0,24	0,00
	Acuerdo ~ 1 ~ 1	75	440,69	441,50	0,11	1,80
	Acuerdo + bosque ~ acuerdo ~ 1	75	444,64	441,64	0,02	1,94
<i>Dasyprocta punctata</i>	Acuerdo ~ acuerdo + bosque ~ 1	75	322,19	323,74	0,41	0,00
	1 ~ acuerdo + bosque ~ 1	75	323,78	324,93	0,18	1,19
<i>Pecari tajacu</i>	Acuerdo ~ bosque ~ 1	80	925,28	926,43	0,41	0,00

*El modelo no converge.

Para cada modelo se describen las variables usadas para explicar la probabilidad de colonización, la probabilidad de extinción, y la probabilidad de detección, respectivamente. Se muestran los modelos con un ΔAIC menor a dos. (1: variable constante. Bosque: área de bosque en el 2017). La probabilidad de detección es constante (1) en todos los modelos, pues no se encontró un efecto de ninguna covariable.

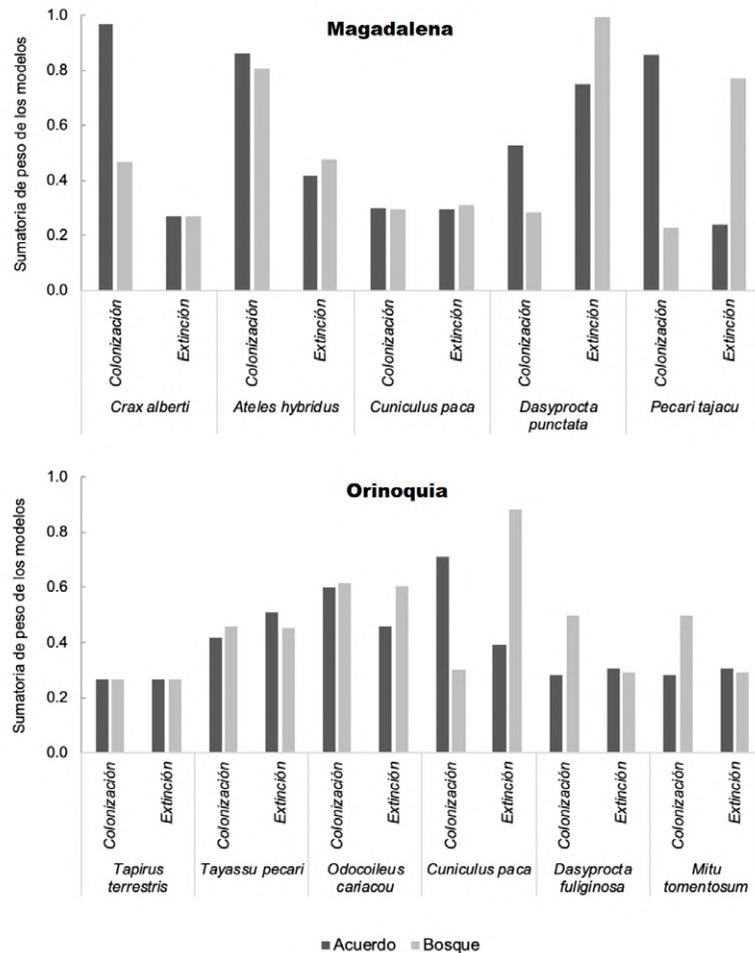


Figura 1. Peso cumulativo de las dos covariables (área bajo acuerdo de conservación en la celda y área de bosque en la celda) en los parámetros de colonización y extinción en los modelos evaluados

Para *A. hybridus* esta variable no fue significativa, sin embargo, apareció en los dos mejores modelos y presentó el mayor peso acumulado (**Tabla 1, figura 1**). Para *C. paca* no hubo un efecto de las covariables en la probabilidad de colonización, siendo el mejor modelo el nulo (**Tabla 1**). Por otro lado, para el pecarí de collar (*P. tajacu*), el área de bosque tuvo un efecto significativo en la probabilidad de extinción, pues a mayor área de bosque menor la probabilidad de extinción (**Tabla 1, figura 1**).

En el caso del paisaje de Orinoquia, para *C. paca* se evidenció un efecto positivo y significativo del área de acuerdo en la colonización (**Tabla 2, figura 1**); para el venado (*Odocoileus cariacou*) se observó un efecto significativo del área de bosque en la colonización y en la extinción, respectivamente (**Tabla 2, figura 1**). Para las demás especies de este paisaje no hubo un efecto de las covariables en las probabilidades de colonización o extinción, siendo el nulo el mejor modelo en todos los casos (**Tabla 2**).

Tabla 2. Resultado de los modelos ajustados para cada especie en el paisaje de la Orinoquia

Especie	Modelo	n	AIC	AICc	w	$\Delta AICc$
<i>Tapirus terrestris</i>	1 ~ 1 ~ 1	86	1329,03	1329,52	0,29	0,00
<i>Tayassu pecari</i>	1 ~ 1 ~ 1	86	1023,58	1024,07	0,19	0,00
	Acuerdo + bosque ~ acuerdo + bosque ~ 1	86	1023,29	1025,16	0,22	1,09
	1 ~ acuerdo ~ 1	86	1024,85	1025,60	0,10	1,53
<i>Odocoileus cariacou</i>	Bosque ~ bosque ~ 1	86	731,88	732,94	0,12	0,00
	Acuerdo ~ bosque ~ 1	86	732,08	733,14	0,11	0,20
	Acuerdo + bosque ~ bosque ~ 1	86	732,15	733,58	0,11	0,64
	bosque ~ 1 ~ 1	86	733,02	733,77	0,07	0,83
	Acuerdo + bosque ~ acuerdo ~ 1	86	732,35	733,79	0,10	0,85
	Acuerdo ~ acuerdo ~ 1	86	732,73	733,79	0,08	0,85
	1 ~ bosque ~ 1	86	733,45	734,20	0,05	1,26
	Acuerdo ~ acuerdo + bosque ~ 1	86	732,85	734,28	0,07	1,34
	Bosque ~ acuerdo ~ 1	86	733,25	734,31	0,06	1,37
<i>Cuniculus paca</i>	Acuerdo + bosque ~ 1 ~ 1	86	733,73	734,79	0,05	1,85
	Acuerdo ~ bosque ~ 1 *	86	271,72	272,78	0,27	0,00
	Acuerdo ~ acuerdo + bosque ~ 1 *	86	272,78	274,22	0,16	1,43
	1 ~ bosque ~ 1 *	86	273,83	274,58	0,10	1,79
<i>Dasyprocta fuliginosa</i>	Acuerdo + bosque ~ bosque ~ 1	86	273,41	274,84	0,12	2,06
	1 ~ 1 ~ 1	86	235,52	236,01	0,18	0,00
	Bosque ~ 1 ~ 1	86	235,48	236,23	0,18	0,22
	1 ~ acuerdo ~ 1	86	237,11	237,86	0,08	1,85
<i>Mitu tomentosum</i>	1 ~ bosque ~ 1	86	237,18	237,93	0,08	1,92
	1 ~ 1 ~ 1	86	235,52	236,01	0,18	0,00
	Bosque ~ 1 ~ 1	86	235,48	236,23	0,18	0,22
	1 ~ acuerdo ~ 1	86	237,11	237,86	0,08	1,85
	1 ~ bosque ~ 1	86	237,18	237,93	0,08	1,92

Para cada modelo se describen las variables usadas para explicar la probabilidad de colonización, la probabilidad de extinción, y la probabilidad de detección, respectivamente. Se muestran los modelos con un ΔAIC menor a dos. (1: variable constante. Bosque: área de bosque en el 2017). La probabilidad de detección es constante (1) en todos los modelos, pues no se encontró efecto de ninguna covariable.

Al comparar el efecto de las variables (área de acuerdo y área de bosque) en los dos paisajes, observamos que el área de acuerdo tuvo un efecto importante en las especies de Magdalena Medio, ya que los pesos acumulados de los modelos con esta variable fueron altos y mayores que para el área de bosque (Figura 1), y este efecto fue positivo, pues a mayor área protegida por un acuerdo, mayor la probabilidad de colonización (Figura 2). En el paisaje de Orinoquia los pesos acumulados fueron más bajos, denotando el poco poder explicativo de las covariables en la colonización o extinción en este paisaje, excepto para *C. paca* y *O. cariacou* (Figura 1). Aquí el área total de bosque en el 2017 tuvo un efecto negativo sobre la probabilidad de extinción, pues a mayor área de bosque, menor la probabilidad de extinción en una celda dada (Figura 3).

En cuanto a la segunda hipótesis evaluada, a escala de paisaje la deforestación promedio en los cuatro años fue mayor en el área de amortiguamiento que dentro del paisaje, tanto en el Magdalena Medio como en la Orinoquia (Figura 4), sin embargo, esta diferencia no fue significativa según la prueba estadística pareada no paramétrica ($V=1$, $p=0,25$; $V=0$, $p=0,125$, $n=4$). Es importante señalar que el número de réplicas (años) no tuvo un poder estadístico suficiente para detectar un efecto. A escala de predio (acuerdos

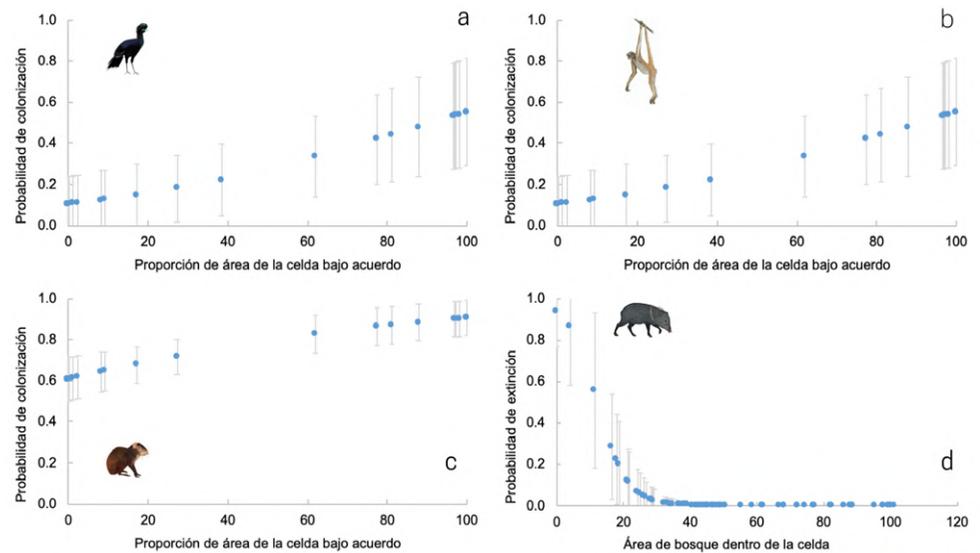


Figura 2. Relación entre las probabilidades de colonización o extinción en un cuadrante de 1x1 km² entre el 2015 y el 2017 y las distintas variables explicativas: proporción del área bajo acuerdos de conservación y área de bosque en el cuadrante. Especies del paisaje del Magdalena Medio: a) *Crax alberti*, b) *Ateles hybridus*, c) *Dasyprocta punctata* y d) *Pecari tajacu*

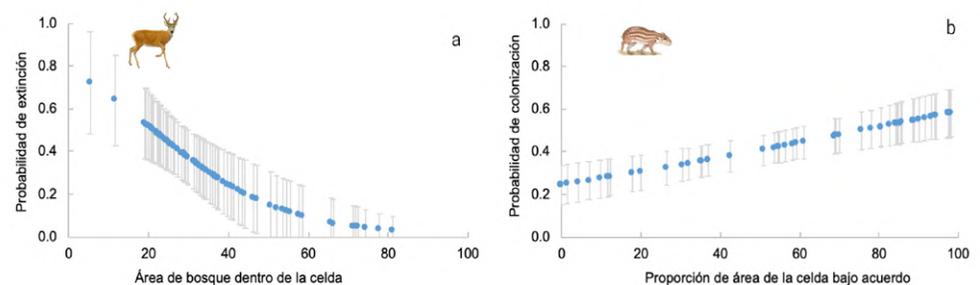


Figura 3. Relación entre las probabilidades de colonización o extinción en un cuadrante de 1x1 km² entre el 2015 y el 2017 y las distintas variables explicativas, proporción del área bajo acuerdos de conservación y área de bosque en el cuadrante. a) *O. cariacou*, b) *C. paca*

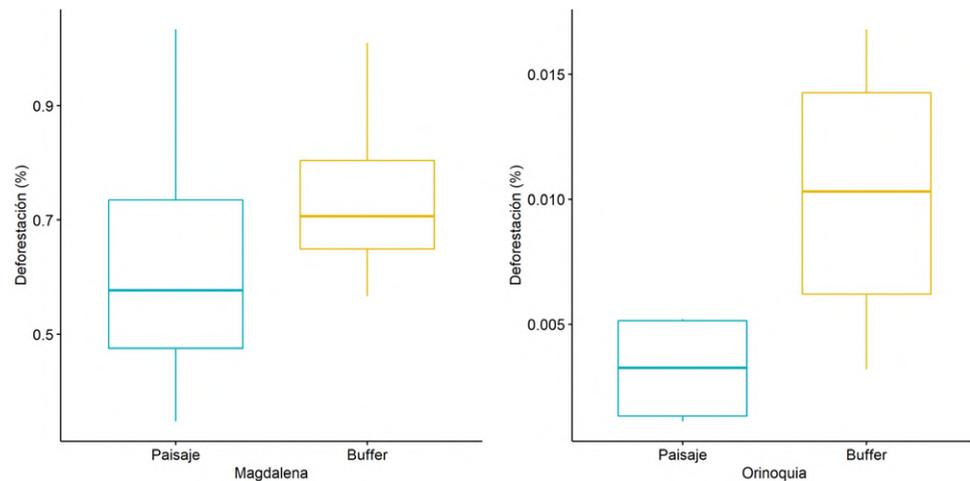


Figura 4. Tasas de deforestación de los dos paisajes, Magdalena Medio y Orinoquia, con sus respectivas zonas de amortiguamiento de 2015 a 2018. Diagrama de caja que representa la mediana (línea divisoria), los cuartiles intermedios (caja) y los valores extremos (líneas)

de conservación) se encontró un efecto significativo en la reducción de la deforestación únicamente para el 2017 ($V=66$, $p=0,033$, $n=46$) en el paisaje de Magdalena. En el paisaje de Orinoquia los valores de deforestación fueron demasiado bajos y la mayoría de predios no presentó pérdida de bosque, por lo que no fue posible realizar la prueba estadística a escala de predio.

Discusión

Se presentó aquí un método para abordar dos hipótesis de la aproximación de conservación de especies paisaje mediante la evaluación del impacto de acciones de conservación en dichas especies y otras, y en la deforestación (como medida del mantenimiento de la estructura). En el ejemplo utilizado se encontró que las intervenciones basadas en la planificación concertada, específicamente los acuerdos de conservación, tuvieron un impacto positivo en algunas de las especies paisaje. En el Magdalena Medio, las dos especies paisaje evaluadas (paujil y choibo) se vieron favorecidas por las intervenciones en los predios con acuerdos. El éxito de los acuerdos sobre la ocupación de estas especies se debió seguramente a una combinación de reducción en la cacería y la protección y restauración de su hábitat. Estas dos especies dependen de bosques en buen estado y son muy sensibles a la cacería. En el período de tiempo evaluado pasaron a ocupar preferentemente sitios con acuerdos dentro del paisaje, lo que indica que la estrategia funcionó. En la Orinoquia, la especie paisaje *T. terrestris* no se vio influenciada positivamente por los acuerdos de conservación. La proporción del área ocupada por la danta en la cuenca del río Bitá ha sido alta (>80 %) desde el inicio del proyecto, lo que sugiere que sus poblaciones se encuentran en buen estado. En este sentido, las acciones de conservación se han orientado en mantener dichas poblaciones y no a recuperarlas. Aunque no encontramos evidencia de que ocupen preferencialmente sitios con acuerdos de conservación, las bajas tasas de extinción en el paisaje (<0,1 %), indican que la especie persiste. Es posible que a escala del paisaje la apropiación que ha generado la especie como símbolo de conservación esté contribuyendo a su mantenimiento en todos los predios, no solo en aquellos con acuerdos. Para determinar el efecto del proyecto en la danta a escala de paisaje, sería necesario comparar el estado de la especie en paisajes similares donde no se esté realizando una iniciativa de conservación.

Nuestra aproximación permitió evidenciar que otras especies de vertebrados (aparte de las especies paisaje) también se vieron favorecidas por las acciones de conservación. En el Magdalena Medio los guatines (*D. punctata*) y en la Orinoquia las pacas (*C.*

paca) aumentaron su probabilidad de colonización en áreas de acuerdos. Estas especies, tradicionalmente objeto de cacería en estas regiones del país, se vieron favorecidas por la protección conferida por los predios con acuerdos. Por otro lado, otras especies evaluadas (no especies paisaje), especialmente en el paisaje de Orinoquia, no se vieron favorecidas por los acuerdos de conservación. Las tasas de colonización o extinción de varias de ellas no se correlacionaron con las variables evaluadas, lo que indica que los acuerdos de conservación han favorecido claramente a algunas especies, pero no a todas.

El pecarí en el Magdalena y el venado en la Orinoquia mostraron verse afectados también por el área de bosque. Su probabilidad de extinción disminuye a medida que el área de bosque aumenta. Este es un factor ecológico que se ha reportado como importante para la ocupación de algunos vertebrados tropicales (Boron, *et al.*, 2019). Si bien estas especies no fueron favorecidas por los acuerdos directamente, el hecho de que el área de bosque sea importante para ellas nos muestra que pueden verse favorecidas por las intervenciones, ya que es posible proteger y restaurar dichos bosques.

Con base en estos resultados, podemos decir que la hipótesis de la conservación de especies paisaje se cumplió en la iniciativa evaluada con algunas salvedades. La acción de conservación (acuerdos de conservación) sí favoreció a las especies paisaje y a algunas otras de vertebrados. Sin embargo, no hay evidencia de que los acuerdos a escala de predio, en particular, estén incidiendo de forma directa en el mantenimiento de las poblaciones de varias especies (no paisaje) evaluadas (*Mitu tomentosum*, *Odocoileus cariacou*, *Dasyprocta fuliginosa*). No obstante, es importante señalar que los acuerdos no son la única estrategia implementada en el proyecto y que existen otras acciones centradas en las comunidades (educación ambiental, proyectos económicos asociativos, etc.), que pueden tener efectos difusos en todo el paisaje de intervención. Sería necesario evaluar si estas últimas especies están siendo protegidas, no a escala de los predios con acuerdos, sino a escala de todo el paisaje. La ocupación de algunas de ellas se mantuvo o aumentó en el paisaje durante el período de trabajo. Este es un buen indicio de éxito, aunque no permite demostrar causalidad, como se hizo con la actividad específica de los acuerdos de conservación. Además, es posible que el tiempo de las intervenciones no haya sido suficiente para generar un impacto sobre ciertas especies. Se ha observado que existen retrasos temporales en la respuesta de las especies a las acciones de conservación, los cuales pueden enmascarar el avance en los objetivos (Watts, *et al.*, 2020). El marco metodológico presentado aquí permitirá evaluar en el tiempo si están ocurriendo este tipo de retrasos.

La segunda hipótesis evaluada fue si las acciones de conservación tenían un efecto en la tasa de deforestación como medida indirecta del mantenimiento de la estructura. Los resultados a escala de paisaje mostraron que, si bien la deforestación fue mayor en el área de amortiguamiento a lo largo del periodo estudiado, los datos no permiten aún detectar una tendencia significativa. En el Magdalena Medio, en tres de los cuatro años la pérdida de bosque fue mayor por fuera del paisaje, y en el paisaje de Orinoquia fue mayor en todos los años. Es un caso de réplicas insuficientes aún y requerirá acumulación de evidencia. Los resultados a escala de predio contaban con más réplicas e indicaron que solamente en el 2017 las intervenciones tuvieron un efecto significativo en el Magdalena Medio en cuanto a la disminución de la pérdida de bosque en comparación con áreas sin acuerdos en el mismo paisaje. Reducir la deforestación es una de las metas más complejas de lograr en áreas rurales del país. Los acuerdos de conservación tienen el potencial de contribuir con esta meta, como quedó demostrado en este estudio, pero requieren un decidido acompañamiento a los propietarios y una verificación continua. Esta contribución a la protección de los bosques, sumada a los resultados en las especies, confirman que los acuerdos de conservación en tierras privadas, como parte de las estrategias complementarias de conservación (*Other effective area-based conservation measures*, OECM), tienen el potencial de contribuir al mantenimiento de la biodiversidad y el cumplimiento de metas nacionales y globales (metas AICHI) de desarrollo sostenible (Dudley, *et al.*, 2018; Hardy, *et al.*, 2017).

La aproximación presentada en este estudio permitió evaluar de forma cuantitativa los efectos de un programa de conservación. De manera general, la disciplina de la conservación ha sido lenta en la adopción de métodos de evaluación de impacto que permitan determinar el efecto de las medidas o programas de conservación implementados (Ferraro & Pattanayak, 2006; Baylis, *et al.*, 2016). Sin embargo, la evidencia sobre cuáles prácticas son exitosas y cuáles no es indispensable para diseñar programas costo-efectivos y hacer uso eficiente de los recursos limitados para conservación. Algunos retos de implementar evaluaciones de impacto rigurosas en programas de conservación incluyen la búsqueda de objetivos múltiples en múltiples escalas, los factores de desviación (*confounding factors*), la limitada posibilidad de aleatorizar y replicar, y el poco tiempo de ejecución en la mayoría de las iniciativas (Ferraro & Pattanayak, 2006). Sin embargo, es necesario evitar recolectar solamente indicadores descriptivos y enfocarse en la pregunta fundamental de una evaluación de impacto: ¿qué habría sucedido si la intervención no se hubiera realizado? Esto requiere plantear hipótesis claras y evaluables, e implementar diseños que permitan identificar relaciones de causalidad, aislando el efecto de la intervención de otros posibles factores que generen sesgos (Ferraro & Pattanayak, 2006). Es necesario también contar con una ética de responsabilidad y reporte, pues muchas veces se encontrará que la intervención, cuando se aísla de los factores de sesgo, no es la causa real del cambio observado (Ferraro & Pattanayak, 2006).

Con la presentación de esta aproximación buscamos aplicar principios de la disciplina de evaluación de impacto para estudiar el efecto de las acciones de conservación de especies paisaje y probar dos hipótesis en ese modelo. En los dos casos (efecto sobre especies y deforestación) generamos hipótesis evaluables, usamos información sobre la línea de base, los grupos de control (celdas sin acuerdos, áreas de amortiguamiento sin intervención) y evaluación del efecto de las covariables. El análisis de ocupación multitemporada se basó en muestreos en celdas con acuerdos y sin acuerdos en todo el paisaje a lo largo de un periodo de dos años. El análisis de deforestación se basó en la comparación de dichas tasas en áreas equivalentes, reduciendo así efectos de covariables asociadas al riesgo de deforestación (Armenteras, *et al.*, 2009). La medición de la reducción de la deforestación en áreas protegidas ha sido uno de los campos donde más ha avanzado la evaluación de impacto en la conservación (Joppa & Pfaff, 2010; Armenteras, *et al.*, 2009; Negret, *et al.*, 2020), pero generalmente ha estado enfocada en áreas protegidas, con polígonos relativamente bien definidos, mientras que ha tenido menos desarrollo en iniciativas de conservación por fuera de áreas protegidas, donde la escala espacial del impacto es más difusa. Sugerimos que estos métodos cuantitativos sean implementados también en estos casos, pues permiten entender los efectos en las tasas de pérdida de bosque causadas por el programa y evaluar la escala de dichos impactos.

Para el análisis de ocupación evaluamos solamente un tipo de intervención, los acuerdos de conservación, a una escala específica, el predio. Sin embargo, hay acciones en todo el paisaje y un trabajo social extenso. Es posible que el efecto en algunas especies no se esté dando asociado únicamente con los acuerdos, limitados a un predio, sino en todo el paisaje. Para evaluar esto será necesario hacer un ejercicio similar comparando la ocupación con áreas que no tengan influencia del proyecto.

Los métodos utilizados representan un ejemplo del uso de enfoques cuantitativos para evaluar los impactos de un programa de conservación. Fue posible observar que la aproximación de conservación de especies paisaje implementada a escala del paisaje tiene el potencial de impactar positivamente a las especies focales y a otros vertebrados. Sin embargo, no todas las especies se ven afectadas de la misma forma por ciertas intervenciones. Las variaciones en la respuesta a las intervenciones también se evidencian entre paisajes. Además, las diferencias entre las historias de vida de las especies y el tiempo de evaluación podrían hacer que algunas especies evidencien efectos positivos, en tanto que otras aún no. Por esto, es necesario usar diseños basados en principios de evaluación de impacto para medir y entender el éxito de las intervenciones en el marco de un proyecto. Solo un reporte riguroso y transparente permitirá avanzar en el ejercicio de la conservación.

Agradecimientos

El Proyecto Vida Silvestre es una iniciativa de conservación voluntaria financiada por Ecopetrol S.A., Wildlife Conservation Society, el Fondo Acción y la Fundación Santo Domingo. Agradecemos a las organizaciones del proyecto, en especial a la Fundación Proyecto Primates, la Fundación Biodiversa Colombia, la Fundación Orinoquía Biodiversa y a la Corporación Ambiental La Pedregosa, que trabajan por las especies discutidas en este documento. Agradecemos a las comunidades de San Juan (Cimitarra, Santander), La Esmeralda, Tres Iglesias, Caño Manatí, Paso Ganado (Puerto Carreño, Vichada) y a la Margot Marsh Biodiversity Foundation. A Andrea Carneiro por comentarios y edición.

Contribución de los autores

GF, LV: diseño del manuscrito; CS, LV: recolección de los datos; GF, LV: análisis de datos; GF, LV, CS: escritura del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses.

Referencias

- Andrade-Correa, M. G.** (2011). Estado del conocimiento de la biodiversidad en Colombia y sus amenazas. Consideraciones para fortalecer la interacción ciencia-política. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **35** (137): 491-508.
- Armenteras, D., Rodríguez, N., Retana, J.** (2009). Are conservation strategies effective in avoiding the deforestation of the Colombian Guyana Shield? *Biological Conservation*. **142** (7): 1411-1419. Doi: 10.1016/j.biocon.2009.02.002
- Arnold, T. W.** (2010). Uninformative Parameters and Model Selection Using Akaike's Information Criterion. *Journal of Wildlife Management*. **74** (6): 1175-1178. Doi: 10.2193/2009-367
- Baylis, K., Honey-Rosés, J., Börner, J., Corbera, E., Ezzine-de-Blas, D., Ferraro, P. J., Lapeyre, R., Persson, U. M., Pfaff, A., Wunder, S.** (2016). Mainstreaming Impact Evaluation in Nature Conservation. *Conservation Letters*. **9** (1): 58-64. Doi: 10.1111/conl.12180
- Boron, V., Deere, N. J., Xofis, P., Link, A., Quiñones-Guerrero, A., Payan, E., Tzanopoulos, J.** (2019). Richness, diversity, and factors influencing occupancy of mammal communities across human-modified landscapes in Colombia. *Biological Conservation*. **232** (May 2018): 108-116. Doi: 10.1016/j.biocon.2019.01.030
- Caro, T., Engilis, A., Fitzherbert, E., Gardner, T.** (2004). Preliminary assessment of the flagship species concept at a small scale. *Animal Conservation*. **7** (1): 63-70. Doi: 10.1017/S136794300300115X
- Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Dirzo, R.** (2017). Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. **114** (30): E6089-E6096. Doi: 10.1073/pnas.1704949114
- Coppolillo, P., Gómez, H., Maisels, F., Wallace, R.** (2004). Selection criteria for suites of landscape species as a basis for site-based conservation. *Biological Conservation*. **115** (3): 419-430. Doi: 10.1016/S0006-3207(03)00159-9
- Corzo, G., Ramírez, W., Salamanca, B., Londoño, M. C., Fonseca, C., Castellanos, C., Alcázar, C., Lasso, C., García, H.** (2010). Planeación ambiental para la conservación de la biodiversidad en las áreas operativas de Ecopetrol localizadas en el Magdalena Medio y los Llanos Orientales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Ecopetrol S.A., Bogotá, D.C., 28 pp.
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E. S., Ngo, H. T., Gueze, M., Agard, J., Arneth, A., Balvanera, P., Brauman, K. A., Butchart, S. H. M., Chan, K. M. A., Garibaldi, L. A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S. M., Midgley, G. F., Miloslavich, P., Molna, Z., Obura, D., Zayas, C. N.** (2019). IPBES (2019): Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. In IPBES secretariat. <https://ipbes.net/global-assessment>.

- Dudley, N., Jonas, H., Nelson, F., Parrish, J., Pyhälä, A., Stolton, S., Watson, J. E. M.** (2018). The essential role of other effective area-based conservation measures in achieving big bold conservation targets. *Global Ecology and Conservation*. **15**: 1-7. Doi: 10.1016/j.gecco.2018.e00424
- Etter, A., Andrade, Á., Saavedra, K., Amaya, P., Arévalo, P.** (2017). Estado de los ecosistemas colombianos: una aplicación de la metodología de la Lista Roja de Ecosistemas. In Informe Final. Pontificia Universidad Javeriana y Conservación Internacional- Colombia. Bogotá. 108 pp. http://www.conservation.org.co/media/A7.LRE-Colombia_INFORME_FINAL_2017.pdf
- Ferraro, P. J. & Pattanayak, S. K.** (2006). Money for nothing? A call for empirical evaluation of biodiversity conservation investments. *PLoS Biology*. **4** (4): 482-488. Doi: 10.1371/journal.pbio.0040105
- Fiske, I. J., Chandler, R. B., Royle, J. A.** (2011). Unmarked: Models for Data from Unmarked Animals. <http://cran.r-project.org/package=unmarked>
- Franklin, J. F.** (1993). Preserving Biodiversity: Species, Ecosystems, or Landscapes? *Ecological Applications*. **3** (2): 202-205.
- Galindo, G., Espejo O. J., Ramírez, J., Palacios, S., Granados, L., V., Forero, C., Valbuena, C. A., Rubiano, J. C., Lozano, R. H., Vargas, K. M., Palacios, A., Palacios, S., Franco, C. A., Granados, E. I., Vergara, L. K., Cabreara, E.** (2014). Memoria técnica de la cuantificación de la superficie de bosque natural y deforestación a nivel nacional. Actualización Periodo 2012 – 2013. In Ideam. https://www.profor.info/sites/profor.info/files/Informe_Final_-_Plantaciones_Comerciales_en_Colombia_1.pdf%0Ahttp://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022976/MemoriaTecnicaPDI2.pdf
- Goldstein, P. Z.** (1999). Clarifying the role of species in ecosystem management: A reply. *Conservation Biology*. **13** (6): 1515-1517. Doi:10.1046/j.1523-1739.1999.99347.x
- Goldstein, Paul Z.** (1999). Functional ecosystems and biodiversity buzzwords. *Conservation Biology*. **13** (2): 247-255. Doi: 10.1046/j.1523-1739.1999.013002247.x
- Green, E., McRae, L., Harfoot, M., Hill, S., Simonson, W., Baldwin-Cantello, W.** (2019). Below the Canopy. <https://www.wwf.org.uk/sites/default/files/2019-08/BelowTheCanopyReport.pdf>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., Townshend, J. R. G.** (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-century forest cover change. *Science*. **342** (November): 850-854. Doi: 10.1126/science.1244693
- Hardy, M. J., Fitzsimons, J. A., Bekesy, S. A., Gordon, A.** (2017). Exploring the Permanence of Conservation Covenants. *Conservation Letters*. **10** (2): 221-230. Doi: 10.1111/conl.12243
- Hothorn, T. & Hornik, K.** (2019). exactRankTests: Exact Distributions for Rank and Permutation Tests. R package version 0.8-31. <https://cran.r-project.org/package=exactRankTests>
- Joppa, L. & Pfaff, A.** (2010). Reassessing the forest impacts of protection: The challenge of nonrandom location and a corrective method. *Annals of the New York Academy of Sciences*. **1185** (January 2010): 135-149. Doi: 10.1111/j.1749-6632.2009.05162.x
- Landres, P. B., Verner, J., Thonias, J. W.** (1988). Ecological Uses of Vertebrate Indicator Species: A Critique. *Conservation Biology*. **2** (4): 316-328. Doi: 10.1111/j.1523-1739.1988.tb00195.x
- MacKenzie, D. I., Nichols, J. D., Andrew Royle, J., Pollock, K. H., Bailey, L. L., Hines, J. E.** (2006). Occupancy Estimation and Modeling: Inferring Patterns and Dynamics of Species Occurrence. *Wildlife Biology*. **12** (3): 379.
- Mackenzie, D. I., Nichols, J. D., Hines, J. E., Knutson, M. G., Franklin, A. B.** (2003). Estimating site occupancy, colonization, and local extinction when a species is detected imperfectly. *Ecology*. **84** (8): 2200-2207. Doi: 10.1002/cpa.3160360305
- Mills, L. S., Soulé, M. E., Doak, D. F., Soule, M. E.** (1993). The keystone-species concept in ecology and conservation. *BioScience*. **43** (4): 219-224.
- Negret, P. J., Di-Marco, M., Sonter, L. J., Rhodes, J., Possingham, H. P., Maron, M.** (2020). Effects of spatial autocorrelation and sampling design on estimates of protected area effectiveness. *Conservation Biology*. **34** (6): 1452-1462. Doi: 10.1111/cobi.13522
- Nichols, J. D. & Williams, B. K.** (2006). Monitoring for conservation. *Trends in Ecology and Evolution*. **21** (12): 668-673. Doi: 10.1016/j.tree.2006.08.007
- Paine, R. T.** (1969). A Note on Trophic Complexity and Community Stability. In *The American Naturalist*. **103** (929): 91-93. Doi: 10.1086/282586
- Roberge, J.M. & Angelstam, P.** (2004). Usefulness of the Umbrella Species Concept as a Conservation Tool. *Conservation Biology*. **18** (1): 76-85. Doi: 10.1111/j.1523-1739.2004.00450.x

-
- Sanderson, E. W., Redford, K. H., Vedder, A., Coppolillo, P. B., Ward, S. E.** (2002). A conceptual model for conservation planning based on landscape species requirements. *Landscape and Urban Planning*. **58** (1): 41-56. Doi: 10.1016/S0169-2046(01)00231-6
- Shrader-Frechette, K. S. & McCoy, E. D.** (1993). *Method in ecology: strategies for conservation*. Cambridge University Press. New York, 329 pp.
- Simberloff, D.** (1998). Flagships, umbrellas and keystones: Is single-species management passé in the landscape era? *Biological Conservation*. **83** (3): 247-257.
- Strindberg, S. & Didier, K.** (2006). A quick reference guide to the Landscape Species Selection Software, version 2.1 Tech Manual 5. <https://global.wcs.org/Resources/Publications/Publications-Search-II/ctl/view/mid/13340/pubid/DMX538500000.aspx>
- The Conservation Measures Partnership.** (2020). *Open Standards for the Practice of Conservation Version 4.0* (p. 81). www.conservationmeasures.org
- Tracy, C. R. R. & Brussard, P. F. P. F.** (1994). Preserving biodiversity: species in landscapes. *Ecological Applications*. **4** (2): 206-207. Doi: 10.2460/javma.245.4.372
- Watts, K., Whytock, R. C., Park, K. J., Fuentes-Montemayor, E., Macgregor, N. A., Duffield, S., McGowan, P. J. K.** (2020). Ecological time lags and the journey towards conservation success. *Nature Ecology and Evolution*. **4**: 304-311. Doi: 10.1038/s41559-019-1087-8
- Wilcox, B. A.** (1984). In situ conservation of genetic resources: determinants of minimum area requirements. *National Parks: Conservation and Development*, September: 639-647. Doi: 10.13140/2.1.4879.2322

Original Article

Synthesis of nanostructured (Ti-Zr-Si)N coatings deposited on Ti6Al4V alloy

Síntesis de recubrimientos nanoestructurados de (Ti-Zr-Si)N depositados sobre aleación de Ti6Al4V

 Leydi Julieta-Cardenas Flechas^{1,*},  Claudia Patricia Mejía-Villagrán^{1,2},
 Miryam Rincon-Joya³,  Jhon Jairo Olaya-Florez¹

¹Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia – Campus Bogotá

²Escuela de Ingenierías y Tecnologías, Fundación Universitaria Monserrate, Bogotá, Colombia

³Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Campus Bogotá

Abstract

TiZrSiN coatings have important applications as corrosion barriers and thermal stabilizers. The addition of Si in TiZrN films helps increase hardness and thermal stability of the base coat. In this work thin films of (Ti-Zr-Si)N were deposited on the Ti6Al4V alloy by the co-sputtering technique and using Ti₃Si₂ and Zr targets. The synthesis of the coatings was carried out by varying the discharge power in the Ti5 well as a variation in the deposit temperature at room temperature 130° and 260°C. The coatings were characterized by means of X-ray diffraction (XRD), evidencing the formation of the phase that belongs to the solid solution (Zr, Ti)N, scanning electron microscopy (SEM), UV-Vis spectroscopy and hardness and pin-on-disc tests. The thickness was measured through interferometry with values between 662 and 481nm for the deposited coatings. According to the failure mechanism in the scratch test, the best results were obtained with a power of 170W and 260°C with a cohesive failure $L_{c1} = 2.1\text{N}$ and an adhesive failure $L_{c2} = 4.7\text{N}$.

Keywords: (Ti-Zr-Si)N; Ti6Al4V; Coatings; Co-sputtering; Nanostructures.

Resumen

Los recubrimientos de TiZrSiN tienen aplicaciones importantes como barreras contra la corrosión y estabilizadores térmicos. La adición de Si en las películas de TiZrN ayuda a aumentar la dureza y la estabilidad térmica del recubrimiento base. En este trabajo, películas delgadas de (Ti-Zr-Si)N fueron depositadas sobre la aleación de Ti6Al4V mediante la técnica de co-sputtering utilizando blancos de Ti₃Si₂ y Zr. La síntesis de los recubrimientos se realizó variando la potencia de descarga en la fuente RF encargada del blanco de Ti₃Si₂ a 130W, 150W y 170W, así como una variación en la temperatura de depósito a temperatura ambiente, 130° y 260°C. Los recubrimientos fueron caracterizados por medio de difracción de rayos X (XRD), donde se evidencia la formación de la fase que pertenece a la solución sólida (Zr,Ti)N, microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopia UV-Vis y ensayos de dureza y pin-on-disc. El espesor fue medido a través de interferometría con valores entre 662 y 481nm para los recubrimientos depositados. De acuerdo con el mecanismo de falla en el ensayo de rayado, los mejores resultados obtenidos se dieron para una potencia de 170W y 260°C con una falla cohesiva $L_{c1}=2.1\text{N}$ y una falla adhesiva $L_{c2}=4.7\text{N}$.

Palabras clave: (Ti-Zr-Si)N; Ti6Al4V; Recubrimientos; Co-sputtering; Nanoestructuras.

Citation: Cardenas-Flechas LJ, Mejía-Villagrán CP, Rincon-Joya M, Olaya-Florez JJ. Synthesis of nanostructured (Ti-Zr-Si)N coatings deposited on Ti6Al4V alloy. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):570-581, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1198>

Editor: Fernando Martínez O

***Corresponding autor:**

Leydi Julieta Cardenas Flechas;
ljcardenasf@unal.edu.co

Received: April 27, 2020

Accepted: February 22, 2021

Published: June 17, 2021



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

Introduction

The development of protective coatings using different techniques such as PVD (Lawal, *et al.*, 2017), CVD (Köpf, *et al.*, 2017), solid liquid vapor (VLS) method (Klamchuen, 2015), among others has allowed solving problems associated with tool corrosion, friction torques and wear (Kameneva & Kichigin, 2019). However, with the rapid progress of the

advanced industry, hard coatings with improved performance are required. To increase this performance, binary, ternary and quaternary transition metal nitrides, have been developed with the ability to protect materials exposed to hostile environments. Performance has been optimized through strategies that allow the adaptation of their nanostructural characteristics (Attari, Cruzado, & Arroyave, 2019).

Transition metal nitrides are characterized by revealing properties such as chemical inertness, (Ding, *et al.*, 2008), high hardness, (Abadias, *et al.*, 2010), as well as high melting points (Abrikosov, *et al.*, 2011). Refractory transition metal nitrides, such as TiN and ZrN, have attractive characteristics such as excellent chemical stability, corrosion resistance, as well as being chemically and mechanically robust and belonging to a new class of materials that exhibit plasmonic resonance in visible spectral regions (Nakayama, *et al.*, 2015; Moshtaghioun, *et al.*, 2018; Guler, Boltasseva, & Shalaev, 2014; Baturina, *et al.*, 2019). TiZrN has obtained special attention thanks to properties such as high thermal stability, good toughness, low electrical resistivity, among other mechanical and tribological properties (Escobar, *et al.*, 2015, Phaengam, *et al.*, 2019).

Some of the quaternary coatings are TiAlTaN (Romero, *et al.*, 2019), TiSiCN (Ma, *et al.*, 2014), TiTaBN (Mikula, *et al.*, 2014), TiAlSiN (Miletić, *et al.*, 2014) and TiZrSiN (Cardenas, Leon & Olaya, 2019), which exhibit better hardness, tribological behavior and adhesion. The modification of the properties of three-element nitride coatings by additional doping with a fourth element has promising applications (Abadias, *et al.*, 2018). This results in coatings with better characteristics of each of the materials, as well as a high mechanical performance (Pogrebñjak, *et al.*, 2012).

The addition of Si to (Ti, Zr)N films is considered a prospect for its improvement in hardness with values up to 29GPa (Saladukhin, *et al.*, 2015) for certain silicon contents, as well as the improvement of oxidation and wear resistance. According to Uglov, *et al.* (2015), the increase in Si content results in the transformation of the nanocrystalline structure into a nanocomposite state with a grain size of 11nm to 5nm. Deposition parameters such as stoichiometric nitrogen content and a high deposition temperature can generate thermal stability in the films (Sobol, *et al.*, 2011). In the present research, the synthesis of TiZrSiN nanostructured coatings was performed by the reactive co-sputtering technique on the Ti6Al4V substrate in order to establish the influence of the discharge power, as well as the temperature in the coating deposit.

Results were analyzed using techniques such as X-ray diffraction, SEM, EDS and pin-on-disc test. The thickness of the coatings was analyzed by profilometry and the optical properties were analyzed by means of UV-Vis. According to the reviewed literature, there is no work where the deposition of the (Ti-Zr-Si)N coating is carried out on Ti6Al4V substrates.

Materials and methods

Figure 1 shows the system used to manufacture the nanostructured coatings of (Ti-Zr-Si)N deposited on Ti6Al4V alloy. The coating was deposited by the co-sputtering technique using the Ti₃Si₂ and Zr targets as well as a mixture of nitrogen and argon gases in flux Ar/N relation of 14/2. Deposit conditions were varied including temperature and discharge power.

Preparation of coatings

For the coatings' metallographic preparation, a substrate of Ti6Al4V with 14mm diameter and 3mm thickness was used. For sanding, sandpaper with grains of 120 to 2500 was used too. Polishing was carried out with a cloth moistened with a suspension of 90 ml of distilled water and 10 ml of alumina with an average particle size of 1 μm. After polishing, the steels were cleaned in an ultrasound machine; 5 minutes in distilled water, 5 minutes in acetone and 5 minutes in isopropanol. Finally, they were dried with air and a dryer in order to evaporate the residues from the preceding baths. The criterion to define which is the most appropriate preparation is that the substrates are brought to a mirror finish.

Thin films were deposited by the co-sputtering system with a Ti_5Si_2 target, varying the discharge power to 130W, 150W and 170W in the Zr target and to 200W in the Ti_5Si_2 target. Films were produced by varying the deposition temperature, starting at room temperature, 130° and 260°C.

The discharge was performed with three different powers in the RF source in order to select the power with the best results in terms of adhesion tests. The rotation speed of the substrate holder was 10rev/min, which guarantees homogeneity in the coating. The deposit parameters are observed in **table 1**.

Physicochemical characterization

For the SEM analysis a FEI QUANTA 200 microscope was used, in secondary electron mode, high vacuum and 30kV voltage. The qualitative chemical composition analysis was carried out using an EDS energy dispersion microprobe.

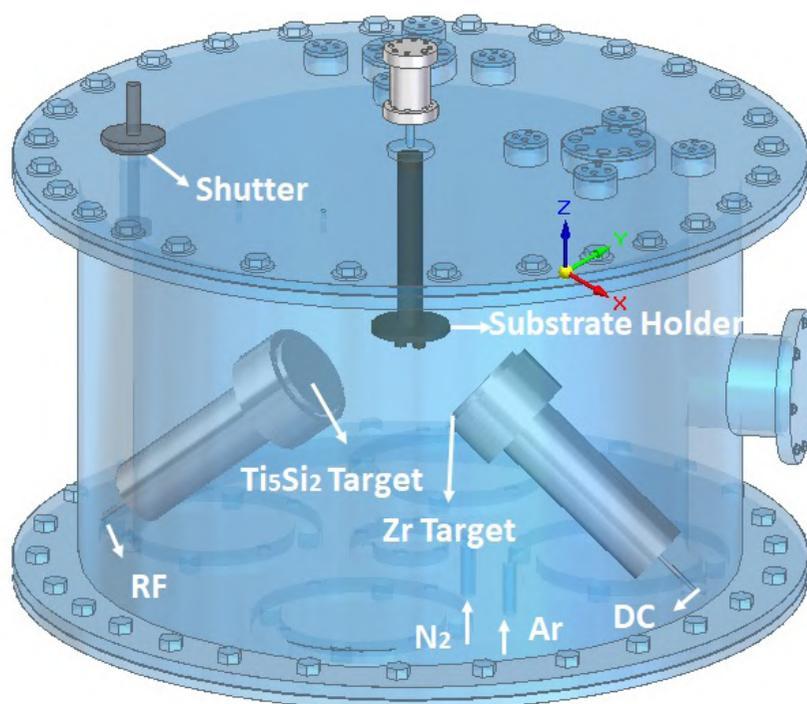


Figure 1. Schematic representation of the co-sputtering system.

Table 1. Deposition parameters used in the discharge

Deposition parameters	
RF power (W)	130; 150; 170
DC power (W)	200
Temperature (°C)	28; 130; 260
Time (min)	60
Gas flow (sccm)	Ar:14/N ₂ :2
Base pressure (mbar)	9.5×10^{-6}
Work pressure (mbar)	4.0×10^{-3}
Target-substrate distance (cm)	10.16
Rotation of substrate holder (rev min ⁻¹)	10

The X-ray diffraction analysis (XRD) was performed on a PanAnalytical X'pert Pro equipment, with data taken at an angle of 2θ between 10° and 120° , using a RTMS (realtime multiple strip) detector with Cu $K\alpha$ radiation at a wavelength of 1.542\AA and a step size of 0.0263° in Bragg-Brentano mode.

To calculate the crystallite size, the scherrer equation $D = 0.9\lambda / L\cos\theta$, was used. Where D is the crystallite size, λ is the wavelength used by the XRD source ($\text{CuK}\alpha = 1.542\text{\AA}$), θ is the value of the angle at which the peak is observed and L is the full width at half maximum (FWHM).

To calculate the lattice parameter, L was used, approximating the peaks to a voight function and then using Bragg's law $n\lambda = 2d\sin\theta$. In this case, by taking the first order reflections with $n = 1$, and where d is the interplanar distance, the lattice parameter can be calculated from $d = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}}$ being h, k and l, Miller's index.

The morphological analysis was performed with a FEI QUANTA 200 scanning electron microscope in secondary electron mode and high vacuum with a voltage of 30 KV. The qualitative chemical composition analysis was done by means of an EDS energy-dispersion microprobe.

The thickness measurement was done on a DEKTAK 150 profilometer with $1500\ \mu\text{m}$ sweep in the ridges and valleys with duration of 60 s, applying a force of 2.50 g and a resolution of $0.056\ \mu\text{m}$ per sample. The deposition time was one hour in order to achieve thickness of approximately 800 nm.

Mechanical Characterization

To determine the wear resistance and the coefficient of friction in one of the coatings, the tribometer used was used CERT-UMT type 2M-110, with a 6 mm diameter Al_2O_3 alumina ball. The wear test was obtained by performing the pin-on-disk test with a speed of 10m/s and load of 1N for 600s to determine the coefficient of friction (COF). The hardness of the coating was determined by means of a Hysitron TI 950 nano-hardness kit that uses a Berkovich-type diamond indenter with a pyramidal shape at the tip and triangular base. The load used was of 5mN. For sampling purposes, 5 measurements were made randomly on the film. The indentation penetration depth did not exceed 10% of the total thickness of the substrate.

Results and discussion

Figure 2 shows the diffractograms obtained for the different deposition conditions on the Ti6Al4V substrate, with variations in power and temperature. Peaks are observed at positions 2θ $35,125^\circ$ $39,954^\circ$ $58,975^\circ$ and $75,215^\circ$ corresponding to the formation of the solid solution (Ti, Zr) N, which is in agreement with other research (Pogrebnyak, et al., 2012; Saladukhin, et al., 2015; Sobol, et al., 2011). Diffraction peaks increase or

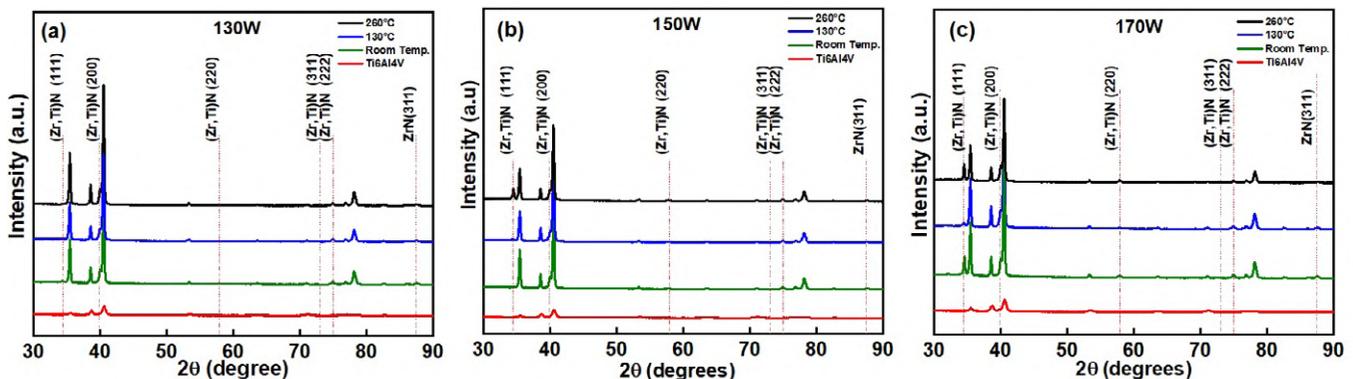


Figure 2. (Ti-Zr-Si)N X-ray diffractogram on Ti6Al4V substrates, at different temperatures: (a) 130W, (b) 150W and (c) 170W.

decrease in intensity depending on the value of the variation in the power of the RF source at 130W (a), 150W (b) and 170W (c), and on the coating deposition room temperature, 130°C and 260°C.

According **supplementary figure 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1198/3034>, with increase of temperature, the peak (111) intensity increases too, but to increase power (or Si content), the peak (111) intensity decrease (**supplementary figure 2**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1198/3035>). In these same numerals, it is possible to evidence a broadening of the peak, for intermediate temperatures and powers.

Some variation in the width of the peaks is observed, which can be attributed to the overlap generated by the TiN and TiZrN structures in orientation (111). This indicates a substitution of titanium by zirconium in the crystalline structure of titanium nitride (**Parra, et al., 2015**). Which causes the peak to appear wider, actually being the overlap of two peaks.

Some of the factors that influence the intensity of the diffraction peaks are: temperature, absorption factor, polarization factor, among others. Therefore, the width and shape of the peaks can be associated with the combination of instrumental factors and factors based on the microstructure of the sample. (**Cardenas, 2018**)

The intermediate position of the diffraction peaks between those of ZrN and TiN, with crystallographic charts (JC PDS 350753) and (JC PDS 381420), respectively, indicate that this phase belongs to the solid solution (Zr, Ti)N (**Sobol, et al., 2011, Cardenas, et al., 2018, Huang, et al., 2007**). The other peaks shown in the figures correspond to signals typical of the substrate. In the case of coatings deposited at room temperature, they have a high intensity peak in some areas, but all reflect a crystalline microstructure.

According to (**Lin, et al., 2015**), the X-ray diffraction pattern for (Ti-Zr) N shows a strong orientation (111) since this is the trend to produce nitrides of the IV group of transition metals. In the analysis of the XRD samples shown in the diffractograms, there are diffraction peaks ZrN (111) and TiN (111) indicating an orientation (111). This due to the deposition conditions in which the energy deformation is dominant compared to surface energy (**Benavid, et al., 2003**). In addition, the development of texture (111) in thin films depends on the relationship between the energy atom and the metallic flux (**Rizzo, et al., 2006**) and in consequence on the partial pressure of the reactive gas, as well as on the applied discharge power. The incorporation of silicon in ZrN-based coatings increases the hardness of the films, improves the resistance to oxidation and reduces the coefficient of friction of the films (**Yalamanchili, et al., 2014**). The results indicate the possible FCC phase of TiN with zirconium and an amorphous phase of SiN and this forms a nanocomposite. The preferential adsorption/desorption of anions in specific crystallographic planes controls the decrease in their surface energy (**Cardenas, Raba & Rincon, 2020**).

Table 2 describes the size of the crystallite for the (Ti-Zr-Si)N coating deposited on the Ti6Al4V substrate, where a change in the results is observed. This can be related to the work of (**Sobol, et al., 2011**), who describes that the change in the average size of the crystallites was 25nm and it can be caused by the decrease in the contents of titanium and silicon. In this case, the change was due to the power variation in the RF source directly associated with the Ti_5Si_2 target.

The average surface roughness varies as a function of the deposit temperature of the coating according to **figure 3**. The roughness value increases considerably, which is in the range of 15-39nm for a power of 170W, from 10-36nm for 150W and 7-25nm for 130W. It can be concluded that there is no significant change in the roughness of the samples analyzed, since they are in an average range. This may be due to a very high efficiency in the formation of ceramic-type material. For 170W, the deposit conditions indicate a greater roughness at room temperature that decreases to 130° and 260°C. These results can be related to (**Huang, et al., 2007**), who describes that the TiZrN coatings show a high roughness, due to the fact that the nitrogen flow makes the Gibbs free energy selective in

the formation of the Ti-Zr-N alloy, decreasing the nucleation of islands that interact in the densification of the coating. According to different properties including magnetic that are influenced by the size of the particles and the surface defects become more important as the size of the particles decreases (Cardenas, *et al.*, 2021).

Figure 4 shows the EDS analysis at room temperature where percentages of the substrate own elements such as titanium, aluminum, vanadium were found. The presence of the deposited coating with the elements of Ti, Zr, Si and N in various amounts is evident, with a range of 43% to 47% in Titanium, 11% to 18% in zirconium and 0.8% to 2.81% in silicon. According to the work of (Pogrebnejak, *et al.*, 2012), the chemical composition is indicated in a cross section of the (Ti-Zr-Si)N coating, which is similar with these results. The figures show the surface of the coating deposited on the alloy without pores, cracks or other defects that usually appear in the deposit. The coatings deposit had two targets for the deposit, the power variation was made through the RF source connected to the target of Ti₅Si₂, and a fixed value in the power of the DC source connected to the target of Zr therefore the relationship In the amount of Silicon it is directly with the variation mentioned, as well as in the values associated with titanium, it is also important to point out that the growth mechanisms of the film may vary due to the fact that not only one species is deposited from the source, In addition to this, additional processes may occur that change the characteristics of the deposit (Vanegas, Alfonso & Olaya, 2019).

Figure 5 shows the thicknesses obtained according to the power and temperature of the coatings deposit. For a power of 170W, the thickness varied between 662nm and 536nm as indicated in part (a), for 150W between 566 and 515nm (b), and finally for a power of 130W between 420 and 481nm (c). The thickness growth rate as a function of

Table 2. Coating crystallite size - deformation (Ti-Zr-Si)N, substrate: Ti6Al4V, Power: 130W–150W-170W, Room Temperature: 130°C and 260°C.

Assignment	Miller Indices (hkl)	Crystallite size (nm)		
		130W	150W	170W
Room Temp.	111	23,848	22,557	21,400
130°C	111	25,291	20,357	20,855
260°C	111	25,292	21,962	24,547
Deformation ε (nm)				
Room Temp.	111	3.649	3.449	3.751
130°C	111	3.865	3.660	3.173
260°C	111	3.868	3.355	3.751

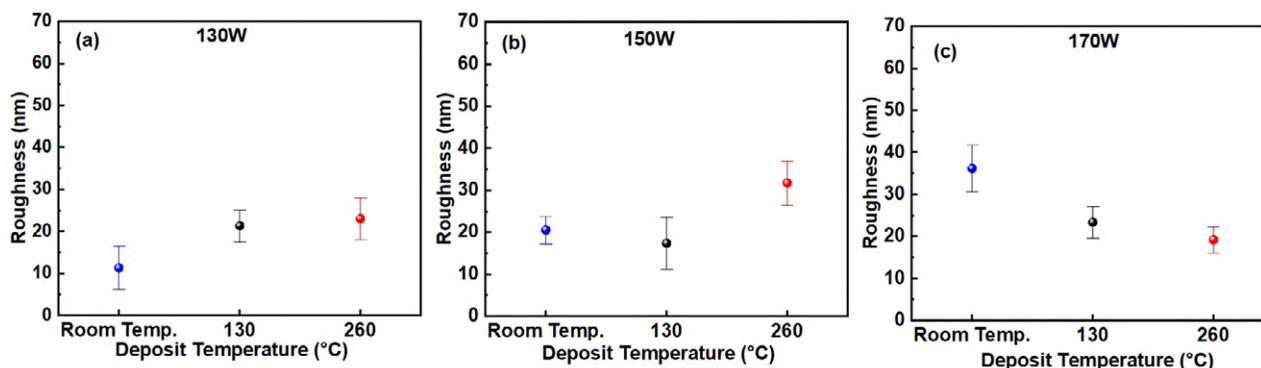


Figure 3. Roughness measurements of (Ti-Zr-Si)N coatings for Ti6Al4V substrate with RF power of (a) 130W (b) 150W and (c) 170W.

time is determined for a time of 60 minutes, where the deposit rate is 110.3A/min for a power of 170W, 94.3A/min for 150W and 80.1 A/min for 130W.

The obtained results allowed to assume that due to a high power, the thickness of the film increases (greater thickness for power of 170W and less for 130W). Analysis of the coatings indicates that a thickness of the same order of magnitude is maintained for the deposited films (Cardenas, 2018). The effect of the power in the formation of the coating is favorable, specifically at 170W there is greater uniformity in the film.

Figure 6 shows the scratch tests for Ti-Zr-Si-N coatings deposited on Ti6Al4V substrates for different temperatures and a discharge power of 170W, where thick spacing occurs and the substrate is completely exposed to the footprint left by the indenter in this case. When the diamond comes into contact with the coating at the beginning of the channel, a crack is formed at the coating-substrate interface that spreads a considerable distance before stopping. This crack may nucleate into a large interfacial defect or result in from cracking of total thickness (Kiryukhantsev-Korneev, et al., 2010).

In part (a) and (b), the lateral cracks in the coating layer can be interpreted as a failure mechanism characterized by the separation of part of the layer in order to minimize the amount of elastic energy stored by the compressive efforts before the movement of the indenter.

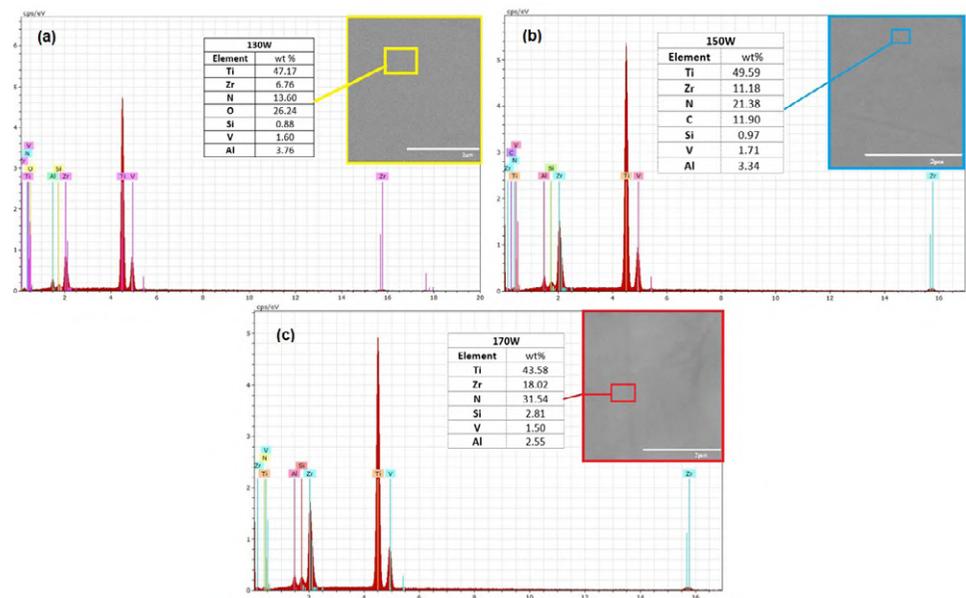


Figure 4. Chemical composition by EDS at different powers and discharge temperatures.

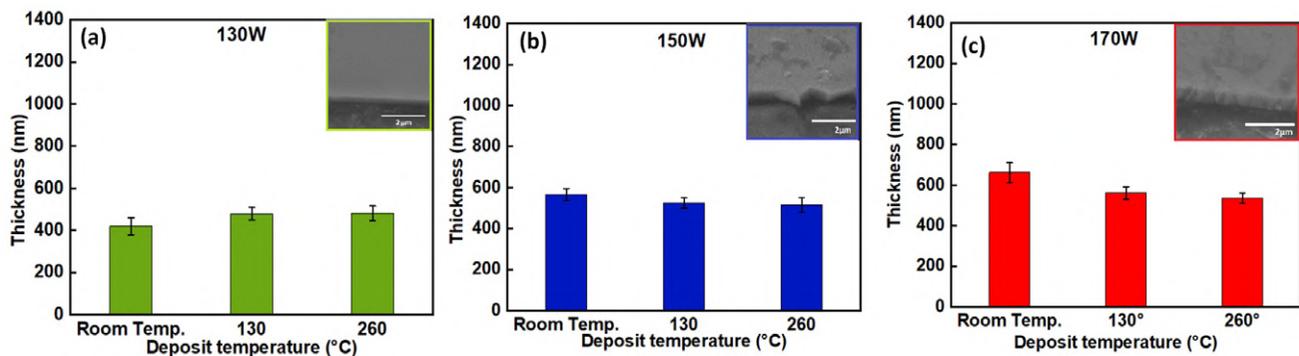


Figure 5. Thickness of the coatings according to the deposit conditions: (a) 130W, (b) 150W and (c) 170W.

In (c), there are conformal cracks and buckling as well as the material detached in the lateral areas. Once spallation occurs, there is a tendency for cracks to deviate from the interface to the surface, leading to extensive cracking of the coating area. During the tests, the values of L_{c1} (cohesive failure) and L_{c2} (adhesive failure) were determined. The cohesive failure mode consists in the separation or damage of a part of the coating and the adhesive failure that corresponds to the separation between the coating and the substrate. According to the results, the power of 170W-260°C stood out as the best deposit condition with a value $L_{c1} = 2.1$ and $L_{c2} = 4.7$ N. These values suggest that the surface should be prepared by a nitriding process or the metallic interlayer deposit to improve the adherence of the produced systems.

The optical reflectance spectra of the (Ti-Zr-Si)N coatings on the Ti6Al4V substrate are observed in **figure 7**. The results indicate that, in the infrared wavelength region, the (TiZrSi)N coating for (a) 130W-260°C has a high reflectance of approximately 72%, while

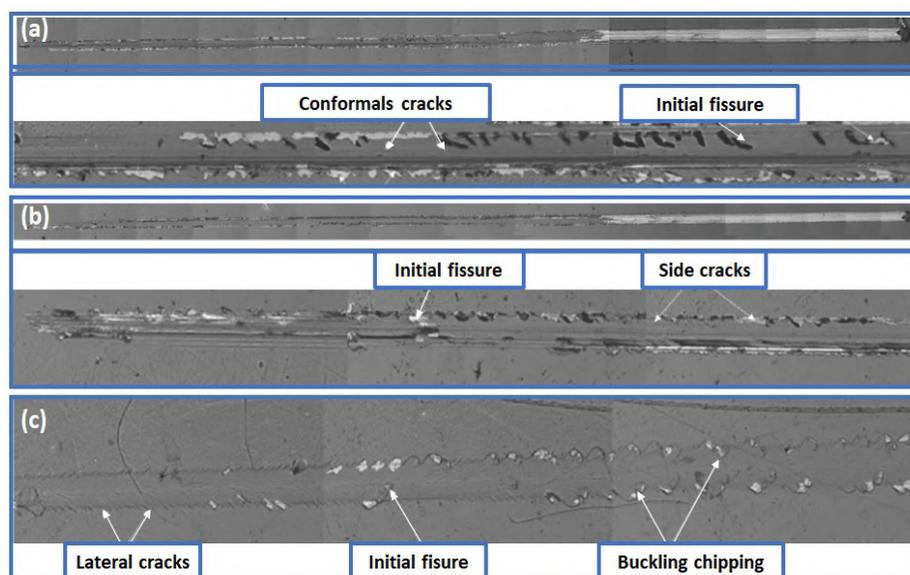


Figure 6. Ti-Zr-Si-N film scratch footprint: (a) P = 130W - 260 °, (b) P = 150W- 260 ° C, (c) P = 170W- 260°C.

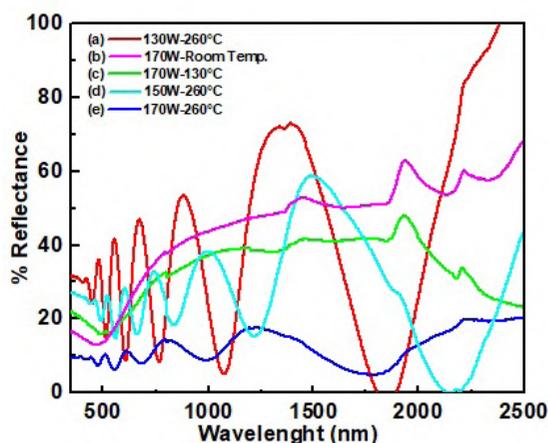


Figure 7. Experimental reflectance spectra for (Ti-Zr-Si)N coatings as a function of the wavelength of the incident electromagnetic wave: (a) 130W-260°C, (b) 170W-Room Temp., (c) 170W-130°C, (d) 150W-260°C and (e) 170W-260°C.

for (e) 170W-260°C the lowest reflectance is registered with a value of 20%. These results are associated with the effect of temperature on the deposit of substrates. As the discharge power increases, this value decreases as shown in (b), (c), (d).

According to **Veszelei, et al.**, 1994, when varying deposition parameters including the temperature of the substrate, the optical properties are different in the films obtained. A high temperature of the substrate results in a film with high optical quality, that is, high infrared reflectance and a deep minimum in the visible spectrum, as evidenced in the present work. However, these temperatures can in turn cause problems when spraying thin films, since the oxidation process accelerates with increasing temperature (**Georgson, Roos & Ribbing**, 1991).

The coatings produced presented high values of mechanical properties. The low values of hardness (20GPa) and elastic modulus (218GPa) were presented in the samples deposited with the lower power values (130W). This is possibly explained by an increase in the residual stresses or deformation of the structural one. The increase in the power of the discharge favors an increase in the content of defects in the film, which in turn favors structural deformation and an increase in the residual compression stresses (**Olaya, Capote, & Marulanda**, 2015).

The results of the COF tests and the test time are shown in **figure 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1198/3033>, for the sample with 130W, where COF is coefficient of friction. This was the sample that presented greater hardness and zirconium content. In these results, three regions can be observed where the value of the friction coefficient varies significantly. The first zone corresponds to times of less than 20 seconds, where a COF value close to 0.1 is observed. This result is attributed to the measurement of the tribological torque generated by the coating and the alumina ball. These low COF values can be explained by the high hardness values of the coating, the high density and by the zirconium oxide formed in the coating during its manufacturing process and/or during tribology tests (**Vanegas, Alfonso & Olaya**, 2019). The second part of the graph, which can be seen approximately between 20 and 150 seconds, corresponds to a transition zone that involves the gradual penetration of the indenter from the coating to the substrate. At this stage, there is loss of adhesion of the coating, generating a significant amount of particles or debris that increase the wear rates in the material. Finally, the last region of the curve is observed, after 150 seconds, corresponding to a mixed wear of the coating on the substrate. In this way, the COF value is increased to values close to 0.5, which is attributed to the reduction in surface hardness, considering that the substrate has a hardness close to 3.2GPa (**Bisbal, et al.**, 2012).

During the wear test various wear mechanisms are generated. At the start of the test, an adhesion and sliding mechanism is favored between the surface of the alumina ball and the surface of the coating. However, with increasing time, there are a fluctuation of load and loss of coating material, which generate contact fatigue and abrasion. The increase in noise and dispersion of the COF values over time can be explained by an increase in the roughness of the surface of the coating and the in abrasive wear promoted by the debris produced between the contact surfaces. The formation of corrosive wear is probable, which explains the constant part of the COF in the final part of the test. Coating elements such as Zr, Ti and Si and Fe in the substrate can form oxides that can improve the tribological properties of the system produced over time (**Macias, et al.**, 2019).

Conclusions

Nanostructured (Ti-Zr-Si)N coatings were deposited by means of the co-sputtering technique with variation in discharge power and deposit temperature. The XRD results indicate the formation of a crystalline microstructure with the presence of (Zr, Ti)N, ZrN and TiN, as well as peaks of the substrate. The size of the crystallite varies between 20-25nm for plane 111 and is greater for a power of 130W and a temperature of 260°C. For plane 200, the size is 13-22nm, which is greater for the power of 170W and a temperature of 260°C.

The highest roughness is observed for the power of 170W with a range of 10-36nm for the three temperatures. There is no significant change in the roughness of the samples analyzed, since they are in an average range, which may be due to a very good efficiency in the formation of the ceramic-type material. The highest growth rate for the discharge time (1h) was for 110.3A / min for a power of 170W. In the coatings analyzed by the adhesion test, adhesion failure was observed, with an RF power of 170W and a temperature of 260°C as best condition. A reflectance value of 72% was obtained for coatings deposited at 130W 260°C, which is the highest percentage. A decrease was recorded in other results, obtaining the lowest value of 20% for 170W 260°C. This is associated with the variation of the deposit parameters that generates different values in the optical properties. The coefficient of friction for the coating with the highest amount of Zr is 0.1, which can be explained by the high hardness values of these ceramic materials. The presence of silicon gives a greater hardness to the coating due to the synergistic effects of the elements present in the film with a smaller number of pores.

Supplementary information

Figure 1S. Pin-on-disc test on the test piece with the highest Zr content, carried out for 10 minutes. See the figure 1S in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1198/3033>

Supplementary figure 1. Zoom of the crystallographic direction (111) as a function of temperature. See the Supplementary figure 1 in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1198/3034>

Supplementary figure 2. Zoom of the crystallographic direction (111) as a function of power. See the Supplementary figure 2 in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1198/3035>

Authors contribution

LJCF: Student in charge of synthesizing and characterizing the coatings and of writing the article; CPMV: Student in charge of performing the hardness and pin-on-disc tests and the corresponding analyses; MR: Professor in charge of writing and reviewing the article; JJOF: Professor in charge of advising the manufacture and characterization of coatings, and reviewing the article

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

- Abadias, G., Daniliuk, A. Y., Solodukhin, I. A., Uglov, V. V., & Zlotzky, S. V. (2018). Thermal stability of TiZrAlN and TiZrSiN films formed by reactive magnetron sputtering. *Inorganic Materials: Applied Research*, *9* (3): 418-426. doi.org/10.1134/S2075113318030024
- Abadias, G., Koutsokeras, L. E., Dub, S. N., Tolmachova, G. N., Debelle, A., Sauvage, T., & Villechaise, P. (2010). Reactive magnetron cosputtering of hard and conductive ternary nitride thin films: Ti-Zr-N and Ti-Ta-N. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, *28* (4): 541-551. doi.org/10.1116/1.3426296
- Abrikosov, I. A., Knutsson, A., Alling, B., Tasnádi, F., Lind, H., Hultman, L., & Odén, M. (2011). Phase stability and elasticity of TiAlN. *Materials*, *4* (9): 1599-1618. doi.org/10.3390/ma4091599.
- Attari, V., Cruzado, A., & Arroyave, R. (2019). Exploration of the microstructure space in TiAlZrN ultra-hard nanostructured coatings. *Acta Materialia*. doi.org/10.1016/j.actamat.2019.05.047.
- Baturina, O. A., Epshteyn, A., Purdy, A., Simpkins, B., Forcherio, G. T., & Govorov, A. O. (2019). Comparison of Photocatalytic Activities of TiN and ZrN Nanoparticles Incorporated into TiO₂ matrix Under Visible Excitation. In Meeting Abstracts (No. 45, pp. 2072-2072). The Electrochemical Society.

- Bendavid, A., Martin, P. J., Kinder, T. J., & Preston, E. W.** (2003). Properties of Ti_{1-x}Si_xN_y films deposited by concurrent cathodic arc evaporation and magnetron sputtering. *Surf. Coat. Technol.*, 163-164. doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00491-7.
- Bisbal, R., Dávila, P., Gomez, F., Camero, S., Pérez, M., & González, G.** (2012). Efecto del Ta en la aleación Ti-6Al-4V tratada térmicamente. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 27 (4): 83-94.
- Cardenas Flechas, L. J.** (2018). Resistencia a la corrosión de recubrimientos nanoestructurados de Ti-Zr-Si-N. *Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia*. Retrieved from: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69879>.
- Cardenas, J., Leon, J., & Olaya, J. J.** (2019). Synthesis and high-temperature corrosion resistance of Ti-Zr-Si-N coatings deposited by means of sputtering. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 54 (3): 233-240. doi.org/10.1080/1478422X.2019.1573498.
- Cardenas, L. J. C., Barahona, E. T., Salamanca, M. L. P., Medina, J. X. L., & Florez, J. J. O.** (2018). Evaluación de la resistencia a la oxidación de películas de Ti-Zr-Si-N producidas por cosputtering. *Bistua Revista de la facultad de ciencias básicas*. 15 (2). doi.org/10.24054/01204211.v2.n2.2017.2889.
- Cardenas L., Raba, A. M., Barba-Ortega, J., Moreno, L. C., & Joya, M. R.** (2021). Effect of Calcination Temperature on the Behavior of the Agglomerated Co₃O₄ Nanoparticles Obtained Through the Sol-Gel Method. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 31 (1): 121-128. doi.org/10.1007/s10904-020-01685-5
- Cardenas-Flechas, L. J., Raba, A. M., & Rincón-Joya, M.** (2020). Synthesis and evaluation of nickel doped Co₃O₄ produced through hydrothermal technique. *Dyna*. 87 (213): 184-191. doi.org/10.15446/dyna.v87n213.84410
- Ding, X. Z., Tan, A. L. K., Zeng, X. T., Wang, C., Yue, T., & Sun, C. Q.** (2008). Corrosion resistance of CrAlN and TiAlN coatings deposited by lateral rotating cathode arc. *Thin Solid Films*. 516 (16): 5716-5720. doi.org/10.1016/j.tsf.2007.07.069
- Escobar, D., Ospina, R., Gómez, A. G., & Restrepo-Parra, E.** (2015). Microstructure, residual stress and hardness study of nanocrystalline titanium-zirconium nitride thin films. *Ceramics International*. 41 (1): 947-952. doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.09.012
- Georgson, M., Roos, A., & Ribbing, C. G.** (1991). The influence of preparation conditions on the optical properties of titanium nitride based solar control films. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. 9 (4): 2191-2195. doi.org/10.1116/1.577249.
- Guler, U., Boltasseva, A., & Shalaev, V. M.** (2014). Refractory plasmonics. *Science*. 344 (6181): 263-264. doi: 10.1126/science.1252722
- Huang, J. H., Ho, C. H., & Yu, G. P.** (2007). Effect of nitrogen flow rate on the structure and mechanical properties of ZrN thin films on Si (1 0 0) and stainless steel substrates. *Materials chemistry and physics*. 102 (1): 31-38. doi.org/10.1016/j.matchemphys.2006.10.007
- Kameneva, A., & Kichigin, V.** (2019). Corrosion, wear, and friction behavior of a number of multilayer two-, three- and multicomponent nitride coatings on different substrates, depending on the phase and elemental composition gradient. *Applied Surface Science*. doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.331
- Kiryukhantsev-Korneev, F. V., Shirmanov, N. A., Sheveiko, A. N., Levashov, E. A., Petrzhik, M. I., & Shtanskii, D. V.** (2010). Nanostructural wear-resistant coatings produced on metal-cutting tools by electric-arc evaporation and magnetron sputtering. *Russian Engineering Research*. 30 (9): 910-920. <https://doi.org/10.3103/S1068798X10090133>
- Klamchuen, A., Suzuki, M., Nagashima, K., Yoshida, H., Kanai, M., Zhuge, F., & Kawai, T.** (2015). Rational concept for designing vapor-liquid-solid growth of single crystalline metal oxide nanowires. *Nano letters*. 15 (10): 6406-6412. doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01604
- Köpf, A., Keckes, J., Todt, J., Pitonak, R., & Weissenbacher, R.** (2017). Nanostructured coatings for tooling applications. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 62: 219-224. doi.org/10.1016/j.jrmhm.2016.06.017
- Lawal, J., Kiryukhantsev-Korneev, P., Matthews, A., & Leyland, A.** (2017). Mechanical properties and abrasive wear behaviour of Al-based PVD amorphous/nanostructured coatings. *Surface and Coatings Technology*. 310: 59-69. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.12.031
- Lin, Y. W., Huang, J. H., Yu, G. P., Hsiao, C. N., & Chen, F. Z.** (2015). Influence of ion bombardment on structure and properties of TiZrN thin film. *Applied Surface Science*. 354: 155-160. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.02.190>
- Ma, S. L., Ma, D. Y., Guo, Y., Xu, B., Wu, G. Z., Xu, K. W., & Chu, P. K.** (2007). Synthesis and characterization of super hard, self-lubricating Ti-Si-C-N nanocomposite coatings. *Acta Materialia*. 55 (18): 6350-6355. doi.org/10.1016/j.actamat.2007.07.046

- Macias, H. A., Yate, L., Coy, L. E., Aperador, W., & Olaya, J. J.** (2019). Influence of Si-addition on wear and oxidation resistance of TiWSixN thin films. *Ceramics International*. **45** (14): 17363-17375. doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.295
- Mikula, M., Roch, T., Plašienka, D., Satrapinsky, L., Švec Sr, P., Vlčková, D., & Kúš, P.** (2014). Thermal stability and structural evolution of quaternary Ti-Ta-B-N coatings. *Surface and Coatings Technology*. **259**: 698-706. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.10.009
- Miletić, A., Panjan, P., Škorić, B., Čekada, M., Dražič, G., & Kovač, J.** (2014). Microstructure and mechanical properties of nanostructured Ti-Al-Si-N coatings deposited by magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*. **241**: 105-111. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.10.050
- Moshtaghoun, B. M., Gómez-García, D., & Domínguez-Rodríguez, A.** (2018). Spark plasma sintering of titanium nitride in nitrogen: Does it affect the sinterability and the mechanical properties. *Journal of the European Ceramic Society*. **38** (4): 1190-1196. doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.029
- Nakayama, H., & Ozaki, K.** (2015). Effect of mechanical milling of elemental powders on interface formation in TiN-Ni cermets prepared by pulsed current sintering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. **51**: 309-314. doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2015.05.007
- Olaya, J. J., Capote, G., & Marulanda.** (2015). Producción, caracterización y aplicaciones de recubrimientos producidos por plasma. Universidad Nacional de Colombia. 1ra ed.
- Parra JP, Piamba OE, Olaya JJ.** (2015). Resistencia a la corrosión a alta temperatura en películas delgadas de Bix Tiy Oz producidas por sputtering R. F. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. **36**: 2-8.
- Phaengam, W., Horprathum, M., Chananonwathorn, C., Lertvanithphol, T., Samransuksamer, B., Songsiriritthigul, P., & Chaiyakun, S.** (2019). Oblique angle deposition of nanocolumnar TiZrN films via reactive magnetron co-sputtering technique: The influence of the Zr target powers. *Current Applied Physics*. **19** (8): 894-901. doi.org/10.1016/j.cap.2019.05.002
- Pogrebnyak, A. D., Shpak, A. P., Beresnev, V. M., Kolesnikov, D. A., Kunitskii, Y. A., Sobol, O. V., ... & Demyanenko, A. A.** (2012). Effect of thermal annealing in vacuum and in air on nanograin sizes in hard and superhard coatings Zr-Ti-Si-N. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. **12** (12): 9213-9219. doi.org/10.1166/jnn.2012.6777
- Rizzo, A., Signore, M. A., Penza, M., Tagliente, M. A., De Riccardis, F., & Serra, E.** (2006). RF sputtering deposition of alternate TiN/ZrN multilayer hard coatings. *Thin Solid Films*. **515** (2): 500-504. doi.org/10.1016/j.tsf.2005.12.279
- Romero, E. C., Osorio, J. C., Soto, R. T., Macías, A. H., & Botero, M. G.** (2019). Microstructure, mechanical and tribological performance of nanostructured TiAlTaN-(TiAlN/TaN) n coatings: Understanding the effect of quaternary/multilayer volume fraction. *Surface and Coatings Technology*. **377**: 124875. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.086
- Saladukhin, I. A., Abadias, G., Michel, A., Uglov, V. V., Zlotski, S. V., Dub, S. N., & Tolmachova, G. N.** (2015). Structure and hardness of quaternary TiZrSiN thin films deposited by reactive magnetron co-sputtering. *Thin Solid Films*. **581**: 25-31. doi.org/10.1016/j.tsf.2014.11.020
- Pogrebnyak, A. D., & Beresnev, V. M.** (2011). Effect of the preparation conditions on the phase composition, structure, and mechanical characteristics of vacuum-Arc Zr-Ti-Si-N coatings. *The Physics of Metals and Metallography*. **112** (2): 188. doi.org/10.1134/S0031918X11020268
- Uglov, V. V., Abadias, G., Zlotski, S. V., Saladukhin, I. A., Skuratov, V. A., Leshkevich, S. S., & Petrovich, S.** (2015). Thermal stability of nanostructured TiZrSiN thin films subjected to helium ion irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. **354**: 264-268. doi.org/10.1016/j.nimb.2014.12.043
- Vanegas, H. S., Alfonso, J. E., & Olaya, J. J.** (2019). Effect of Si content on functional behavior of nanostructured coatings of Zr-Si-N. *Materials Research Express*. **6** (11): 115076.
- Veszelei, M., Andersson, K., Ribbing, C. G., Järrendahl, K., & Arwin, H.** (1994). Optical constants and Drude analysis of sputtered zirconium nitride films. *Applied optics*. **33** (10): 1993-2001. doi.org/10.1364/AO.33.001993
- Yalamanchili, K., Forsén, R., Jiménez-Piqué, E., Jöesaar, M. J., Roa, J. J., Ghaffoor, N., & Odén, M.** (2014). Structure, deformation and fracture of arc evaporated Zr-Si-N hard films. *Surface and Coatings Technology*. **258**: 1100-1107. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.07.024

Artículo de revisión

Estudio químico del aroma y bioactividad de la fruta del pepino dulce (*Solanum muricatum*)

Flavor chemistry and bioactivity studies on sweet cucumber (*Solanum muricatum*) pulp fruit

Karen Nataly Díaz,  Carmen Tatiana Cuadrado-Silva,  Coralia Osorio*

Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

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

Resumen

Los compuestos volátiles activos olfativamente en el aroma de la fruta del pepino dulce (*Solanum muricatum*) se extrajeron mediante la técnica de extracción de *aroma asistido por disolventes (solvent-assisted flavor evaporation, SAFE)*, se analizaron por cromatografía de gases acoplada a olfatometría (CGO), y cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG/EM) y se compararon con estándares. Los compuestos con más influencia en el aroma de la fruta se diferenciaron mediante el análisis por dilución del extracto de aroma (*aroma extract dilution analysis, AEDA*). Con base en el cálculo del valor de la actividad del olor (*odor activity value, OAV*) se identificaron como compuestos de impacto de la fruta el *E*-6-nonenal (nota acuosa), el *E*-2-nonenal (nota verde-pepino), el hexanal (nota verde), el nonanal (nota verde-pepino) y la 1-penten-3-ona (nota etérea). También se estudiaron *in vitro* algunas de las propiedades biofuncionales de la fruta: la actividad antihipertensiva mediante la inhibición de la enzima convertidora de angiotensina-I (ECA-I) y la actividad antihipercolesterolemica con base en la inhibición de la 3-hidroxi-3-metilglutaril-coenzima A (HMG-CoA) reductasa. Se encontró que la fruta presenta una actividad inhibitoria de la ECA-I promisoriosa ($IC_{50}=3,72 \pm 0,19$ ppm), ya que se obtuvo un valor mucho menor que el obtenido para el control positivo (lisinopril). También se evidenció con el tiempo que el extracto de la fruta inhibió la actividad de la HMG-CoA reductasa con una cinética comparable a la del control positivo (pravastatina). Con estos resultados, la fruta de *S. muricatum* se convierte en una candidata potencial para el desarrollo de alimentos funcionales.

Palabras clave: Análisis sensorial; SAFE; AEDA; Inhibición ECA-I; Sustancias activas olfativamente; Actividad antihipercolesterolemica.

Abstract

Odor-active volatile compounds of sweet cucumber (*Solanum muricatum*) fruit were extracted by using the solvent-assisted flavor evaporation (SAFE) technique and analyzed, by gas chromatography coupled to olfactometry (GC-O) and gas chromatography coupled to mass spectrometry (GC-MS), and compared with standards. The most relevant compounds in the aroma of this fruit were determined by the aroma extract dilution analysis (AEDA) technique. Based on the odor activity value (OAV) the following key-aroma compounds were identified: (*E*)-6-nonenal (aqueous odor note), (*E*)-2-nonenal (green, cucumber-like odor note), hexanal (green odor note), nonanal (green, vegetable odor note), and 1-penten-3-one (ethereal note). Some biofunctional properties of the fruit were studied *in vitro*. Antihypertensive and anti-hypercholesterolemic activities were measured by using the angiotensin-converting enzyme inhibition (ACE-I) and the 3-hydroxy-3-methylglutaryl-coenzyme A (HMG-CoA) reductase inhibition assays, respectively. The fruit exhibited a promising ACE-I inhibitory activity ($IC_{50}=3.72 \pm 0.19$ ppm) but lower than that of the positive control (lisinopril). The fruit extract inhibited the activity of the HMG-CoA reductase over time with similar kinetics to the positive control (pravastatin). Based on these results, *S. muricatum* fruit could be considered a potential candidate for the development of functional foods.

Keywords: Sensory analyses; SAFE; AEDA; ACE-I inhibition; Odor-active volatiles; Anti-hypercholesterolemic activity.

Citación: Nataly Díaz K, Cuadrado-Silva CT, Osorio C. Estudio químico del aroma y bioactividad de la fruta del pepino dulce (*Solanum muricatum*). Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):582-590, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1323>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**
Coralia Osorio; cosorio@unal.edu.co

Recibido: 15 de octubre de 2020

Aceptado: 11 de marzo de 2021

Publicado: 17 de junio de 2021



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

Introducción

El pepino dulce o pepino melón (*Solanum muricatum* Aiton) pertenece a la familia *Solanaceae* y es originario de las regiones tropicales y subtropicales de los Andes, pero ha sido domesticado con éxito en otros continentes. Es un fruto jugoso, con un sabor fresco y agradable y con un aroma que recuerda al del melón (Contreras, *et al.*, 2016). Se consume en fresco y se utiliza también para hacer ensaladas o postres dependiendo de su estado de madurez y recientemente se está utilizando en batidos de frutas debido a su bajo contenido calórico (Botrel, *et al.*, 2020). En cuanto a sus nutrientes, se han reportado las vitaminas A, B₁, y C, de las cuales esta última es la más abundante (por lo general entre 30 y 80 mg/100 g), así como cantidades significativas de calcio, fósforo, hierro y potasio (InfoAgro, 2020).

En un estudio realizado en tres cultivares de pepino dulce, uno de Japón y dos de Nueva Zelanda, se aislaron los compuestos volátiles mediante destilación por vapor y extracción simultánea de solvente (*simultaneous steam distillation and solvent extraction*, SDE) y se caracterizó su aroma con la presencia de las siguientes notas olfativas: verde, fresca, dulce y agradable que recuerda el aroma de frutas como el melón o el mango. Mediante el uso de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG/EM), se identificaron como componentes mayoritarios el 3-metil-2-buten-1-ol, el 3-metil-3-buten-1-ol, el acetato de 3-metil-2-buten-1-ilo, el acetato de 3-metil-3-buten-1-ilo, el acetato de butilo y el acetato de (*Z*)-6-nonen-1-ilo (Shiota, *et al.*, 1988). En otro estudio se aislaron en diez clones de pepino (*Solanum muricatum*) los componentes volátiles con actividad olfativa, también extraídos por SDE, se analizaron por CG/EM, y se encontró que 17 de ellos contribuían significativamente al aroma de la fruta, con las siguientes notas olfativas: frutal fresca (acetatos y 3-metil-2-buten-1-ol), verde (aldehídos C₆ y C₉), y exótica (lactonas, mesifurano y *b*-damascenona) (Rodríguez-Burruezo, *et al.*, 2004). Sin embargo, hasta el momento no se han identificado los compuestos de impacto del aroma de la fruta.

Las enfermedades relacionadas con el estilo de vida (hipertensión, diabetes, hipercolesterolemia y obesidad, entre otras) se han incrementado en los últimos años. De estas, la hipertensión es una enfermedad cardiovascular peligrosa que puede producir infarto de miocardio o accidentes cerebrovasculares y cuyo pronóstico es complejo, además, recientemente se ha determinado que es la comorbilidad más frecuente de la Covid-19. La hipertensión se define como presión arterial muy elevada y en su tratamiento y control por lo general se utilizan los inhibidores de la enzima convertidora de angiotensina (ECA-I) (Rachmawati, *et al.*, 2016).

Las frutas de la familia *Solanaceae*, específicamente la uchuva (*Physalis peruviana*), el tomate de árbol (*Solanum betaceum*) y el lulo (*Solanum quitoense*), sobresalen por su producción en la región andina de Colombia y su potencial para abrir nuevos mercados internacionales. Recientemente, se determinó la presencia de derivados de espermidina con actividad antihipertensiva (inhibición de la ECA-I) en la pulpa de lulo (*S. quitoense* Lam.) mediante acoplamiento molecular *in silico* y experimentos *in vitro* (Forero, *et al.*, 2016). En el caso del tomate de árbol (*S. betaceum*), se encontró que el ácido rosmarínico era uno de los responsables de la actividad inhibidora de la ECA-I (Prieto-Pabón, 2016). La uchuva, por su parte, es una fuente de provitamina A, vitamina C, complejo E, vitamina B y minerales. Esta fruta deshidratada ya se ha introducido de manera exitosa en el mercado de Estados Unidos y ha sido catalogada como una “*superfruit*” gracias a sus propiedades funcionales, entre las que se destaca la reducción de la concentración de colesterol en sangre, actividad confirmada mediante experimentos en ratas (Ramadan, *et al.*, 2013; Osorio, *et al.*, 2016). Estos resultados sugieren que las frutas de la familia de las solanáceas se pueden considerar alimentos funcionales porque podrían beneficiar la salud de los consumidores más allá del efecto nutricional *per se* (Durán & Valenzuela, 2010).

En este contexto, en el presente trabajo se definió como objetivo identificar y cuantificar los compuestos activos en el aroma del pepino dulce responsables de una de las características más llamativas de este fruto, combinando herramientas analíticas y sensoriales

(*sensomics approach*) (Hofmann, et al., 2014). Además, se evaluó la actividad antihipertensiva y antihipercolesterolemica *in vitro* de la fruta para determinar su potencial como alimento funcional.

Materiales y métodos

Material vegetal

Las frutas de pepino dulce se adquirieron en estado de madurez de consumo en mercados locales de la ciudad de Bogotá. El estado de madurez se caracterizó midiendo su pH con un pHmetro C6820 (Schott Geräte, Berlín, Alemania) y el contenido de sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix) utilizando un refractómetro Atago® PAL-alfa a 20 °C.

Reactivos

Se utilizó una mezcla de parafinas patrón (C_8 - C_{25}) marca Restek (Bellefonte, PA, USA). Además, se utilizaron las siguientes sustancias de referencia para confirmar la identidad de los compuestos volátiles: (*E*)-2-hexenal, (*E*)-2-nonenal y nonanol (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA); hexanol (Alfa Aesar, Heysham, UK), y hexanal, acetato de hexilo, nonanal, (*E*)-6-nonenal, γ -nonalactona y δ -octalactona, generosamente suministrados por la empresa DISAROMAS S.A. (Bogotá, Colombia). Otros reactivos como diclorometano y sulfato de sodio anhidro se adquirieron comercialmente (Merck, Darmstadt, Alemania).

Obtención del extracto de compuestos volátiles

Se tomaron 260 g de fruta fresca sin cáscara, la cual se cortó en rodajas y se homogenizó con un mezclador automático. Con el fin de remover el agua de la fruta (>90 %) se adicionaron 270 g de sulfato de sodio anhidro y posteriormente se hizo la extracción con 250 mL de diclorometano para después destilar en vacío mediante SAFE (Engel, et al., 1999). La fase orgánica enriquecida en compuestos volátiles se concentró en una columna Vigreux hasta un volumen de 0,2 mL.

Análisis cromatográfico por cromatografía de gases acoplada a olfatometría (CGO)

Para determinar cuáles compuestos volátiles contribuían al aroma de *S. muricatum*, se analizó el extracto obtenido mediante SAFE por CGO utilizando un cromatógrafo de gases Hewlett Packard 5890, Serie II, equipado con una columna FFAP (30 m x 0,32 mm i.d., 0,25 μ m de espesor de película). El volumen de inyección fue de 1 μ L en modo *split* (1:10). La temperatura del horno se programó a partir de 40 °C donde se mantuvo por un minuto, luego se calentó a 6 °C por minuto hasta los 180 °C y, finalmente, a 12 °C por minuto hasta los 230 °C. La temperatura del inyector y del detector se ajustó a 230 °C y se usó helio como gas de arrastre a 1,5 mL/min. El final de la columna se conectó a un divisor de flujo en Y, se dividió el flujo del eluente en dos partes iguales, una para el detector de ionización de llama (*flame ionization detector*, FID) y la otra para el puerto de olfacción (1:1) usando capilares de sílice fundido desactivados y de la misma longitud. Tres panelistas entrenados en las notas más relevantes del aroma de la fruta detectaron las regiones donde eluían los compuestos activos en el aroma y describieron las notas olfativas percibidas, análisis que se efectuó por triplicado.

A continuación se empleó el método AEDA (Grosch, 1994), con el fin de establecer la contribución individual al aroma total de la fruta de cada compuesto volátil activo olfativamente. Así, se diluyó el extracto original obtenido por SAFE en un factor de 2ⁿ (hasta 2¹⁴), y se hizo el respectivo análisis por CGO de cada una de las diluciones en serie. La máxima dilución en la cual se alcanzaba a detectar cada compuesto (2ⁿ), se expresó como el factor de dilución de aroma (FD) (Tabla 1).

Análisis por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG/EM), e identificación y cuantificación de los compuestos volátiles activos olfativamente

El extracto obtenido por la técnica SAFE se analizó en un detector selectivo de masas Agilent 5977A acoplado a un cromatógrafo de gases Agilent 7890B en modo de ionización electrónica a 70 eV. Los espectros de masas se tomaron en el rango de 30 a 350 u.

Tabla 1. Compuestos volátiles activos en el aroma del pepino dulce (*S. muricatum*) identificados en el extracto mediante SAFE

No. ^a	Compuesto ^b	Nota olfativa ^c	IR ^d (FFAP)	FD ^e	Cantidad ± DE ^f (microg/ kg fruta)	Valor umbral de olor ^g (microg/ kg en agua)	OAV ^h
1	1-Penten-3-ona*	Solvente, etéreo	1034	128	66,7 ± 49,1	1.3	51
2	Acetato de butilo*	Tostado, verde	1081	8	100,6 ± 23,2	66	2
3	Hexanal	Verde-pasto	1096	64	553,5 ± 310,9	5	111
4	1-Penten-3-ol*	Verde, verdura	1153	256	24,1 ± 13,2	400	0
5	(<i>E</i>)-2-Hexenal	Verde fresco	1226	128	740,1 ± 455,8	17	44
6	Acetato de hexilo	Verde, frutal	1249	256	33,2 ± 13,7	2	17
7	2-Heptenal*	Frutal	1347	256	31,8 ± 1,4	13	2
8	Hexanol	Frutal	1360	256	13,8 ± 10,3	2500	0
9	Nonanal	Pepino, verde	1396	4096	61,9 ± 8,0	1	62
10	2-Hexenol*	Verde, sandía, hoja	1439	1024	9,9 ± 6,2	70	0
11	(<i>E</i>)-6-Nonenal	Melón, sandía	1447	256	130,2 ± 14,2	0.02	6509
12	Metiltio acetato de etilo*	Frutal, rancio	1526	4096	11,3 ± 5,4	250	0
13	(<i>E</i>)-2-Nonenal	Pepino, verde	1582	2048	53,6 ± 4,6	0.1	536
14	Nonanol	Frutal, verde, grasoso	1646	512	12,6 ± 1,2	50	0
15	4-Oxo-Nonanal*	Verde	1889	4096	58,9 ± 3,6	-	-
16	δ-Octalactona	Frutal, coco	2007	2048	18,7 ± 7,2	400	0
17	γ-Nonalactona	Dulce, almíbar, coco	2048	32	29,4 ± 7,0	220	0
EI	Cinamato de etilo	-	2114		250,0	-	-

^a Los odorantes se enumeraron según su tiempo de retención en columna FFAP. EI = estándar interno. ^b Los odorantes se identificaron por comparación de su índice de retención, espectro de masas, y nota olfativa con los respectivos compuestos de referencia; los que tienen asterisco solo se identificaron por comparación con la base de datos NIST/EPA/NIH Mass Spectral Library 2014 (2.2). ^c Nota olfativa como se percibe en el olfatómetro durante los análisis por CGO. ^d Factor de dilución de aroma. ^e IR: índice de retención. ^f FD: factor de dilución de aroma determinado mediante el experimento AEDA. ^g Los datos son el resultado de dos medidas ± desviación estándar (DE). ^h **Leffingwell & Associates** (2008). ^h OAV: *odor activity value*, concentración del compuesto dividido entre el valor umbral de olor; -: no reportado

El cromatógrafo de gases tenía una columna FFAP (Agilent) de 50 m x 0,2 mm i.d. y 0,233 μm de espesor de película, la cual se usó con el mismo programa de temperatura de los experimentos por CGO. La temperatura del inyector fue de 250 °C y el gas de arrastre, helio, se aplicó a 1 mL/min. La inyección se hizo en el modo *split* (1:10).

La identificación de los compuestos volátiles activos olfativamente en el aroma de la fruta se hizo comparando sus espectros de masas, sus índices de retención calculados con base en los tiempos de retención de una mezcla de parafinas patrón, y las notas de olor con los respectivos estándares. Se consultó la base de datos NIST/EPA/NIH Mass Spectral Library 2014 (2.2) en aquellos casos en los cuales no se consiguieron los estándares (**Tabla 1**).

Para la cuantificación de los compuestos se utilizó el método del estándar interno. Para tal fin, se utilizó cinamato de etilo (98 %, 50 μg; 250 mg/kg fruta) (Alfa Aesar, Heysham, UK) en diclorometano adicionado directamente a la fruta homogenizada antes

del proceso de extracción por SAFE. La relación de áreas entre el estándar y cada uno de los compuestos volátiles activos olfativamente permitió calcular la cantidad de cada compuesto. Los experimentos se realizaron por duplicado.

Evaluación de las propiedades biofuncionales

Se retiró la cáscara de 360 g de pepino dulce que se sometieron a liofilización durante 48 horas en un liofilizador Beta1-8 LD plus (Martin Christ, Alemania) a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y presión de 1,0 mbar para obtener 32,7 g de liofilizado. Luego se tomaron 0,5 g del liofilizado, se homogenizaron en 10 mL de agua desionizada y se pasaron a través de un cartucho RP 18 (Merck LiChrolut) con ayuda de un sistema Manifold con vacío para extracción en fase sólida. Los compuestos de interés se eluyeron con 10 mL de etanol, el solvente se eliminó en rotavapor y el residuo se liofilizó y, por último, se preparó una solución en 2 mL de etanol con agua (1:1, v/v) para hacer el análisis de las propiedades biofuncionales.

La actividad antihipertensiva se midió *in vitro* utilizando el kit enzimático ACE-Kit WST (Dojindo Laboratories, Kumamoto, Japón). El ensayo se llevó a cabo siguiendo el protocolo proporcionado por el fabricante (**Dojindo Molecular Technologies**, 2017) y por triplicado. La absorbancia de las reacciones se midió en un lector multimodal de microplacas Berthold (Alemania) a $\lambda=450\text{ nm}$. La actividad inhibitoria de la ECA-I (angiotensina-I) se calculó según la fórmula incluida en el protocolo (ecuación 1). Se utilizó lisinopril como control positivo (5-100 ppm), y se hicieron experimentos con blanco en las mismas condiciones, uno sin muestra (blanco 1) y otro sin enzima (blanco 2, blanco de reactivos). Los resultados se expresaron como la IC_{50} definida como la concentración de extracto requerida para inhibir al 50 % la actividad de la ECA-I bajo las condiciones del ensayo.

$$\% \text{ inhibición} = \frac{(A_{\text{Blanco1}} - A_{\text{Muestra}})}{(A_{\text{Blanco1}} - A_{\text{Blanco2}})} * 100 \quad (1).$$

La actividad antihipercolesterolemica del extracto del fruto de *S. muricatum* se determinó usando el kit enzimático de HMG-CoA reductasa (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) según el protocolo recomendado por el fabricante. La concentración de la solución *stock* de HMG-CoA reductasa fue de 0,5–0,75 mg/mL. El extracto de la fruta se adicionó a una mezcla de reacción que contenía el sustrato de HMG-CoA (400 μM) y una solución *buffer* de fosfato de sodio (100 mM, pH 7,4), y a continuación se agregó la HMG-CoA reductasa (2 μL). La reacción se incubó a $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la absorbancia se midió a $\lambda=340\text{ nm}$ durante 30 minutos en un lector multimodal de microplacas Berthold (Alemania). Se usó pravastatina (Sigma- Aldrich Co.) como control positivo.

Análisis estadístico

Los datos de la cuantificación de los compuestos volátiles se reportaron como promedios \pm desviación estándar (DE) de las determinaciones realizadas en duplicado.

Resultados y discusión

El valor de pH de las frutas de pepino dulce fue de $5,1 \pm 0,4$ y el porcentaje de sólidos solubles, de $6,5 \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{Brix}$, lo que indicaba un estado de madurez de consumo (**Figura 1**).

Estudio del aroma del pepino dulce

Al extracto enriquecido en compuestos volátiles del pepino dulce, obtenido mediante la técnica SAFE, se le hizo un análisis sensorial descriptivo con ayuda de panelistas entrenados utilizando CGO. Se encontró que las notas olfativas más relevantes eran la acuosa, verde, frutal, fresca y dulce. Este análisis permitió detectar también 17 zonas olfativas (**Figura 2**) que correspondían a ésteres (acetatos), compuestos alifáticos C6 y C9 y algunas lactonas (**Tabla 1**).

Según los resultados del AEDA, se encontró que los compuestos con aporte olfativo en las mayores diluciones fueron el nonanal, el metiltio acetato de etilo, el 4-oxo-nonanal, el (*E*)-2-nonenal, la δ -octalactona y el 2-hexenol. Después de cuantificar y calcular los OAV, se determinó que los compuestos de impacto del aroma de la fruta eran el (*E*)-6-nonenal,



Figura 1. Foto de la fruta del pepino dulce (*Solanum muricatum*).

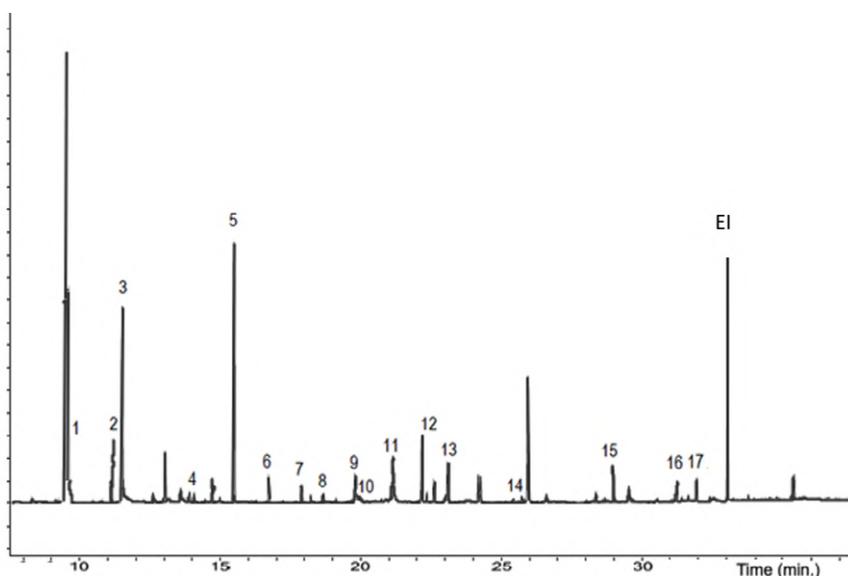


Figura 2. Análisis cromatográfico del extracto SAFE de pepino dulce (*S. muricatum*) con la identificación numérica de compuestos listados en la **tabla 1**. Análisis realizado por CG/EM en columna FFAP. EI: estándar interno

el (*E*)-2-nonenal, el hexanal, el nonanal y la 1-penten-3-ona. Estos compuestos exhibieron notas acuosas, verde y fresca, respectivamente. La presencia de nonenales no es común en el aroma de otras frutas de la familia Solanaceae, sin embargo, se han encontrado como relevantes en el aroma de la sandía, pues contribuye a su aroma con bajos valores del umbral de olor y notas acuosas características (Liu, *et al.*, 2018).

La composición de compuestos volátiles muestra que la ruta catabólica de la β -oxidación de los ácidos grasos está activada en esta fruta por la producción de ésteres alifáticos (acetato de butilo y acetato de hexilo), cetonas (1-penten-3-ona), γ -lactonas. La degradación oxidativa del ácido linoleico también se activa por la vía 9-lipoxigenasa

mediante la producción de (*E*)-6-nonenal, (*E*)-2-nonenal, nonanol y nonanal, y por la vía de la 13-lipoxigenasa mediante la producción de hexanal, (*E*)-2-hexenal, hexanol y 2-hexenol (Fisher, *et al.*, 1997), lo que genera compuestos volátiles que producen las notas olfativas características de esta fruta.

Los resultados acá obtenidos son similares a los obtenidos previamente por Rodríguez-Burruezo, *et al.* (2004), quienes reportaron la presencia de aldehídos alifáticos C6 y C9 como compuestos relevantes en el aroma de *S. muricatum*, pero difieren de lo reportado por Shiota, *et al.* (1988), quienes reportaron varios alcoholes insaturados alifáticos, metil butenoles y algunos de sus ésteres. Esto debido a que utilizaron un método de extracción con calentamiento de la muestra y no hicieron experimentos de olfatometría para determinar la real contribución de cada uno de estos compuestos volátiles al aroma.

Evaluación de las propiedades biofuncionales

Se estudió la actividad antihipertensiva *in vitro* de la fruta de *S. muricatum* evaluando su efecto inhibitor sobre la actividad de la enzima ECA-I y se encontró que dicha actividad dependía de la concentración. El valor de IC_{50} fue de $3,72 \pm 0,19$ ppm (ecuación de regresión: $y=50,94x - 29,17$; $r=0,9302$), es decir, mucho menor que el del control positivo, el lisinopril ($709,36 \pm 54,90$ ppm, $y=13,84x - 10,54$; $r=0,9959$), y ligeramente mayor pero comparable con el reportado por Forero, *et al.* (2016) para el lulo (*S. quitoense*), cuyo IC_{50} fue de $1,08 \pm 0,30$ ppm. Este resultado evidencia una actividad antihipertensiva promisoriosa en la fruta que amerita continuar los estudios e identificar los compuestos fitoquímicos responsables de esta actividad.

La actividad antihipercolesterolemica del extracto acuoso de *S. muricatum* se determinó evaluando la actividad de la 3-hidroxi-2-metilglutaril-CoA (HMG-CoA) reductasa en presencia del sustrato HMG-CoA y registrando el cambio de la absorbancia del NADPH ($\lambda = 340$ nm) con el tiempo (Figura 3). Esta enzima es la que controla la producción de colesterol a partir de acetilCoA, de modo que su inhibición indica una actividad antihipercolesterolemica. En la figura 3 se observa la actividad significativa del extracto de pepino dulce al inhibir progresivamente con el tiempo y de manera exponencial la actividad enzimática. En otros estudios se ha detectado la presencia de saponinas con actividad antihipercolesterolemica en algunas especies de la familia solanácea, como *S. aculeatissimum* (Kohara, *et al.*, 2005).

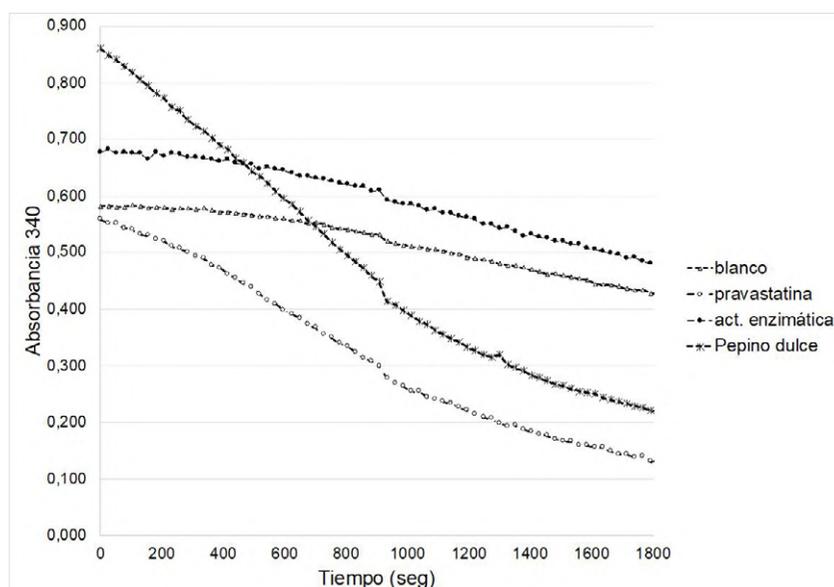


Figura 3. Resultados de la evaluación de la actividad antihipercolesterolemica del pepino dulce. Control positivo: pravastatina

Al obtener una respuesta promisorio en la actividad antihipertensiva del pepino dulce, se hizo una encuesta a 20 personas entre los 41 y los 50 años diagnosticadas como hipertensas. Se encontró que el 50 % de ellas sabían que el tomate de árbol y el lulo son frutas que ayudan a regular la tensión alta; sin embargo, se observó que ninguna sabía del pepino dulce. Al preguntar sobre la presentación más deseable para un nuevo producto funcional a base de esta fruta expresaron su preferencia por una bebida acuosa (85 %) y, en segundo lugar, por una presentación pulverizada (15 %).

Conclusiones

Los compuestos activos en el aroma de *S. muricatum* exhibieron notas características descritas como verde, frutal y acuosa similares a las percibidas en la sandía o el pepino común. La relevancia de los nonenales, el (*E*)-2-hexenal y hexanal en el aroma de la fruta se reporta aquí por primera vez. Se encontró que la fruta tenía actividad antihipertensiva y antihipercolesterolemica *in vitro*, lo que conjuntamente con su agradable aroma, la hace promisorio para el desarrollo de alimentos funcionales. El consumo de esta fruta puede beneficiar a la población que sufra de enfermedades asociadas con el estilo de vida, algunas de las cuales son comorbilidades asociadas con la Covid-19.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Francisco José de Caldas (contrato No. 0459-2013, Red Nacional para la Bioprospección de Frutas Tropicales-RIFRUTBIO). C. T. Cuadrado Silva agradece la financiación de sus estudios posdoctorales por parte de Colciencias (Contrato No. FP44842-183-2018). Los autores agradecen la colaboración de Diana Martín en la utilización de las técnicas de identificación de los compuestos activos en el aroma de la fruta de estudio.

Contribución de los autores

ND: procesamiento de la muestra para el análisis de compuestos volátiles y para la determinación de la actividad antihipertensiva, análisis e identificación de los compuestos activos en el aroma de la fruta, y escritura del manuscrito. CTC: implementación del método de actividad antihipertensiva y medición de los experimentos. CO: idea original de la investigación, análisis de los resultados, revisión y corrección del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Botrel, N. & de Castro e Melo, R. A.** (2020). Quality aspects of pepino dulce fruits in distinct ripening stages, packaging forms and storage conditions. *Braz J Food Technol.* **23**: 1-7.
- Contreras, C., González-Agüero, M., Defilippi, B. B.** (2016). A review of pepino (*Solanum muricatum* Aiton) fruit: A quality perspective. *HortScience.* **51**: 1127-1133.
- Dojindo Molecular Technologies Inc.** (2017). ACE Kit - WST Technical Manual Fecha de consulta: octubre de 2020. Consultado en: https://www.dojindo.eu.com/TechnicalManual/Manual_A502.pdf
- Durán C, R., Valenzuela B, A.** (2010). La experiencia japonesa con los alimentos FOSHU ¿Los verdaderos alimentos funcionales? *Rev Chil Nutr.* **37**: 224-233.
- Engel, W., Bahr, W., Schieberle, P.** (1999). Solvent assisted flavour evaporation – a new and versatile technique for the careful and direct isolation of aroma compounds from complex food matrices. *Eur Food Res Technol.* **209**: 237-241.
- Fisher, C. & Scott, T. R.** (1997). *Food Flavours, Biology and Chemistry* (pp. 25–26). Cambridge, UK: The Royal Society of Chemistry.
- Forero, D. P., Masatani, Ch., Fujimoto, Y., Coy-Barrera, E., Peterson, D. G., Osorio, C.** (2016). Spermidine derivatives in lulo (*Solanum quitoense* Lam.) fruit: sensory (taste) versus bio-functional (ACE-inhibition) properties. *J Agric Food Chem.* **64**: 5375-5383.

- Grosch, W.** (1994). Determination of potent odourants in food by aroma extract dilution analysis (AEDA) and calculation of odor activity values (OAVs). *Flavour Frag J.* **9**: 147-158.
- Hofmann, T., Schieberle, P.** (2014). Elucidation of the chemosensory code of foods by means of a SENSOMICS approach. En: AJ Taylor & DS Mottram (Eds.), *Flavour Science. Proceedings of the XIV Weurman Flavour Research Symposium*. Context Products Ltd: Leicestershire, UK, pp 3-18.
- InfoAgro.** El cultivo del Pepino Dulce. (2020). Fecha de consulta: en octubre 2020. Consultado en: https://www.infoagro.com/hortalizas/pepino_dulce.htm
- Kohara, A., Nakajima, Ch., Hashimoto, K., Ikenaga, T., Tanaka, H., Yukihiro, S., Yoshida, S., Muranaka, T.** (2005). A novel glucosyltransferase involved in steroid saponin biosynthesis in *Solanum aculeatissimum*. *Plant Cell Rep.* **57**: 225-239.
- Leffingwell & Associates.** (2008). Odor & Flavor Detection Thresholds in Water (In parts per billion). Fecha de consulta: octubre de 2020. Consultado en: <http://www.leffingwell.com/odorthre.htm>
- Liu, Y., He C., Song, H.** (2018). Comparison of fresh watermelon juice aroma characteristics of five varieties based on gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry. *Food Res Int.* **107**: 119-129.
- Osorio, C., Schreckinger, M., Bhargava, P., Bang, W. Y., Jacobo-Velásquez, D., Cisneros-Zevallos, L.** (2016). Golden berry and selected tropical (açai, acerola, and maqui) juices. En F. Shahidi & C. Alasalvar (Eds.), *Handbook of Functional Beverages and Human Health* (p. 890). Boca Raton: Taylor and Francis Group.
- Prieto-Pabón, L. J.** (2016). Estudio de los compuestos bioactivos reponsables del sabor de tomate de árbol Var. Amarilla (*Solanum betaceum* Cav.). Tesis de Maestría en Ciencias-Química. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Rachmawati, H., Soraya, I. S., Fisher Kurnati, N., Rahma, A.** (2016). *In vitro* study on antihypertensive and antihypercholesterolemic effects of a curcumin nanoemulsion. *Sci Pharm.* **84**: 131-140.
- Ramadan, M. F., Hassan, N. A., Elsanhoty, R. M., Sitohy, M. Z.** (2013). Goldenberry (*Physalis peruviana*) juice rich in health-beneficial compounds suppresses high-cholesterol diet-induced hypercholesterolemia in Rats. *J Food Biochem.* **37**: 708-722.
- Rodríguez-Burruezo, A., Kollmannsberger, H., Prohens, J., Nitz, S., Nuez, F.** (2004). Analysis of the volatile aroma constituents of parental and hybrid clones of pepino (*Solanum muricatum*). *J Agric Food Chem.* **52**: 5663-5669.
- Shiota, H., Young, H., Paterson, V. J., Irie, M.** (1988). Volatile aroma constituents of pepino fruit. *J Sci Food Agric.* **43**: 343-354.

Artículo original

Parámetros focales del terremoto del 28 de abril de 1894 en los Andes venezolanos usando datos macrosísmicos

Focal parameters of the April 28, 1894 earthquake in the Venezuelan Andes using macrosismic data

Elkin de J. Salcedo-Hurtado^{1,2}, Franck A. Audemard³, Nathalie García-Millán^{2,*}

¹ Departamento de Geografía, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia

² Grupo Georiesgos, Observatorio, Departamento de Geografía, Universidad del Valle

³ Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Departamento de Ciencias de la Tierra, Caracas, Venezuela

Resumen

El terremoto del 28 de abril de 1894 ocurrido en los Andes venezolanos es uno de los más destructores del siglo XIX en este país. Dejó grandes daños materiales y pérdidas humanas en diversas poblaciones vecinas a la frontera entre Colombia y Venezuela. En la zona epicentral causó grandes grietas, dislocaciones en el terreno y eyecciones de lodo, petróleo y gases. Varios estudios paleosismológicos, históricos y sismológicos se han publicado con información sobre los efectos causados e interpretaciones macrosísmicas de sus parámetros focales. En el presente trabajo se utilizaron datos extraídos de la exploración de un mapa de isosista publicado anteriormente para determinar los principales parámetros focales del terremoto. Los resultados obtenidos ubican el epicentro local (*El*) en las coordenadas geográficas $\phi = 8,55^\circ\text{N}$ y $\lambda = -71,72^\circ\text{W}$, y el normal (*En*) en $\phi = 8,56^\circ\text{N}$ y $\lambda = -71,51^\circ\text{W}$. La profundidad normal $hn = 18,24 \pm 1,66$ km, y el foco local $hl = 8,8 \pm 2,23$ km; la magnitud de Richter y la energía sísmica liberada corresponden a $Ml = 7,3$ y $E = 1,58 \cdot 10^{23}$ ergios, respectivamente. Se determinó el momento sísmico escalar $M_0 = 3,16 \cdot 10^{27}$ dinas-cm y la magnitud de momento sísmico $Mw = 7,6$. La magnitud de ondas superficiales fue $Ms = 6,6$ y también se obtuvo la aceleración sísmica, $a = 0,69$ g. Los parámetros obtenidos son compatibles con los publicados por otros autores y se aporta nueva información que permite alimentar los catálogos sismológicos.

Palabras clave: Parámetros focales; Terremoto; Isosistas; Macrosísmica; Venezuela.

Abstract

The earthquake of April 28, 1894, in the Venezuelan Andes was one of the most destructive of the 19th century in this country. It left great material damages and human losses in various neighboring populations on the border between Colombia and Venezuela. In the epicentral zone, it caused large cracks, dislocations in the terrain, and ejections of mud, oil, and gases. Several paleoseismological, historical, and seismological studies have been published with information on its effects and macroseismic interpretations of the focal parameters. Here, we used data extracted from the exploration of an isoseismal map published previously to determine the main focal parameters of the earthquake. The results obtained locate the local epicenter (*El*) at the geographical coordinates $\phi = 8.55^\circ\text{N}$ and $\lambda = -71.72^\circ\text{W}$, and the normal (*En*) at $\phi = 8.56^\circ\text{N}$ and $\lambda = -71.51^\circ\text{W}$. The normal depth was $hn = 18.24 \pm 1.66$ km and the local focus, $hl = 8.8 \pm 2.23$ km. The Richter magnitude and the seismic energy released corresponded to $Ml = 7.3$ and $E = 1.58 \cdot 10^{23}$ ergs, respectively. The scalar seismic moment was $M_0 = 3.16 \cdot 10^{27}$ dynes-cm and the seismic moment magnitude, $Mw = 7.6$. We also obtained the magnitude of surface waves $Ms = 6.6$ and the seismic acceleration $a = 0.69g$. The parameters obtained are compatible with those published by other authors and we provide new information to feed seismological catalogs.

Keywords: Focal parameters; Earthquake; Isoseismal; Macroseismic; Venezuela.

Citación: Salcedo-Hurtado E de J, Audemard FA, García-Millán N. Parámetros focales del terremoto del 28 de abril de 1894 en los Andes venezolanos usando datos macrosísmicos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):591-606, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefy.n.1195>

Editor: Carlos Alberto Vargas Jiménez

***Correspondencia:**

Nathalie García-Millán;
nathalie.garcia@correounivalle.edu.co

Recibido: 17 de abril de 2020

Aceptado: 20 de abril de 2021

Publicado: 17 de junio de 2021



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

Introducción

Uno de los principales inconvenientes que se presentan en muchas regiones para realizar estudios exitosos sobre la valoración de la amenaza y de los riesgos sísmicos es la falta de conocimiento de los parámetros focales de los sismos históricos que, en ocasiones, son los que mayor cantidad de energía sísmica liberan, y por la falta de instrumentación sismológica para el monitoreo de las fuentes sismogénicas y la detección confiable de los eventos sísmicos recientes, lo que resulta en catálogos sismológicos incompletos y faltos de homogeneidad (**Stucchi**, 1994).

Una posible solución a estos problemas se encuentra en la valoración macrosísmica de los terremotos ocurridos en periodos preinstrumentales, lo cual es factible a partir de los estudios de sismicidad histórica, que propenden por el registro y descripción cualitativa de los efectos macrosísmicos de los terremotos del pasado que, interpretados apropiadamente, permiten determinar los principales parámetros focales: el tiempo en que ocurren, la localización epicentral, la intensidad y, cuando es posible, la magnitud macrosísmica equivalente y la profundidad del foco. Existen modelos teóricos o empíricos que proponen el uso de información macrosísmica, en este caso de la intensidad sísmica, para valorar diversos parámetros focales de terremotos históricos (**Blake**, 1941; **Shebalin**, 1968; **Bakun & Wentworth**, 1997; **Bakun**, 1999); asimismo, están las relaciones geológicas, también empíricas, que de manera complementaria proporcionan información para mejorar el conocimiento de los parámetros focales de los terremotos (**Wells & Coppersmith**, 1994).

En diferentes regiones del mundo se han usado con éxito métodos macrosísmicos empíricos para evaluar los parámetros focales de terremotos históricos y recientes, lo que ha permitido un mejor conocimiento de sus particularidades físicas (**Shebalin**, 1971; **Shebalin**, 1974; **Barbano, et al.**, 1979; **Bottari, et al.**, 1979; **Bottari, et al.**, 1982 a, b; **Bottari, et al.**, 1986; **Sibol, et al.**, 1987; **Dorbath, et al.**, 1990; **Shebalin**, 1991; **Bakun**, 2000; **Gómez & Salcedo**, 2000; **Hinzen & Oemisch**, 2001; **Arango & Tabares**, 2002; **Bakun**, 2005; **Bakun**, 2006; **Marín, et al.**, 2006; **Musson, et al.**, 2008; **Marín, et al.**, 2009; **Beauval, et al.**, 2010; **Szeliga, et al.**, 2010; **Gasperini, et al.**, 2010; **Bakun, et al.**, 2011; **Bindi, et al.**, 2013). En Venezuela, además de los trabajos peleosismológicos realizados por la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas - FUNVISIS (**Audemard**, 1997; **Audemard**, 1998), diversos autores han usado métodos macrosísmicos para determinar los parámetros focales de algunos sismos históricos ocurridos en este país (**Palme de Osechas, et al.**, 2005; **Choy, et al.**, 2010).

En el presente trabajo se aplicó el método Blake-Shebalin (**Shebalin**, 1968; **Shebalin**, 1971) para determinar los parámetros focales del terremoto del 28 de abril de 1894 ocurrido en los Andes Venezolanos que dejó numerosos muertos y una extensa zona de devastación en diversas poblaciones de Colombia y Venezuela. Usando el mapa de isosistas de dicho terremoto publicado por **Kingland, et al.** (2008), se determinaron las coordenadas de los epicentros macrosísmicos local y normal y se evaluó la profundidad de los focos local y normal y, a partir de estos parámetros, se obtuvieron los valores de magnitud, energía y aceleración sísmica.

Estado del arte

El terremoto del 28 de abril de 1894 ocurrido en los Andes venezolanos se presentó a las 10:30 de la noche, hora local (**Schubert**, 1994). La mayoría de las fuentes bibliográficas que dan cuenta del suceso lo referencian como el “Gran Terremoto de Los Andes Venezolanos” debido a los numerosos muertos y la extensa zona de devastación en las poblaciones colombianas de San José de Cúcuta, Pamplona, Ocaña, Bucaramanga, Tunja y Bogotá, así como los muchos daños y efectos en otras poblaciones venezolanas como Coro, La Vela, Acarigua, Tinaco, Tinaquillo, Puerto Cabello, Valencia, Maracay, Villa de Cura, San Juan de Ortíz, Cúa, Charallave, Santa Lucía, San Casimiro, Ocumare del Tuy,

Altagracia, Valle de la Pascua, Tucupido y Zaraza. También se le atribuye la generación de grandes grietas, dislocaciones en el terreno y eyecciones de lodo, petróleo y gases, según el relato de José Ignacio Lares (Altuve, 2005).

Sobre este terremoto se han elaborado varios estudios paleosismológicos, así como históricos y sismológicos, que sustentan las diversas interpretaciones macrosísmicas para determinar las causas y algunos de los parámetros focales más relevantes. En la **figura 1** se esquematiza el árbol simplificado (“árbol genealógico investigativo”), que expresa el estado del arte y del conocimiento que se tiene sobre este evento sísmico.

Estudios paleosismológicos

Los estudios paleosismológicos sobre el terremoto del 28 de abril de 1894 han sido adelantados principalmente por el grupo de investigaciones en paleosismología de la FUNVISIS (Tabla 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1195/3055>). Los investigadores lo asocian con la falla de Boconó, lo que determinó su magnitud entre $M_s=7,1$ y $7,3$, siendo este el evento más grande en dicha falla, cuyo periodo de retorno es del orden de 300 años (Audemard, 1998) (Figura 2).

La falla de Boconó se caracteriza por ser de carácter transcurrente dextral, se extiende por más de 500 km en el occidente venezolano en dirección SW-NE, entre la población de San Cristóbal, cerca de la frontera con Colombia, y la población de Morón, en la costa caribeña del golfo Triste (Audemard, 2009).

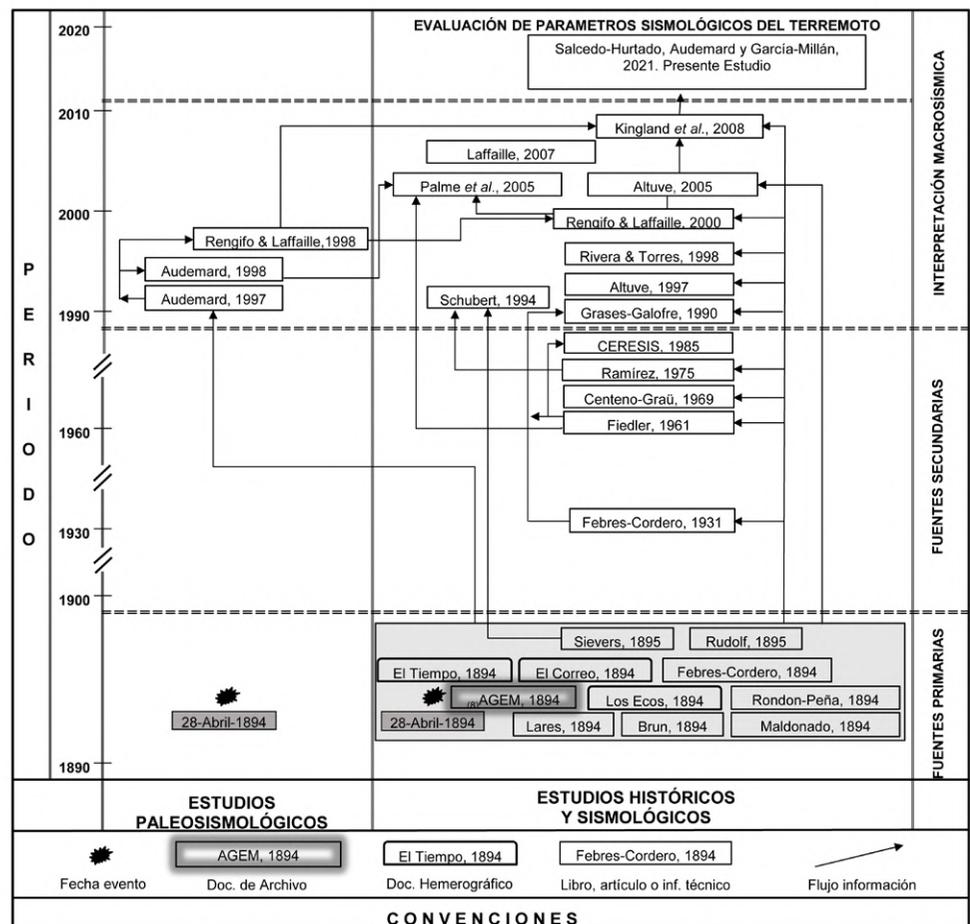


Figura 1. Árbol simplificado de estudios realizados sobre el terremoto del 28 de abril de 1894 en los Andes venezolanos

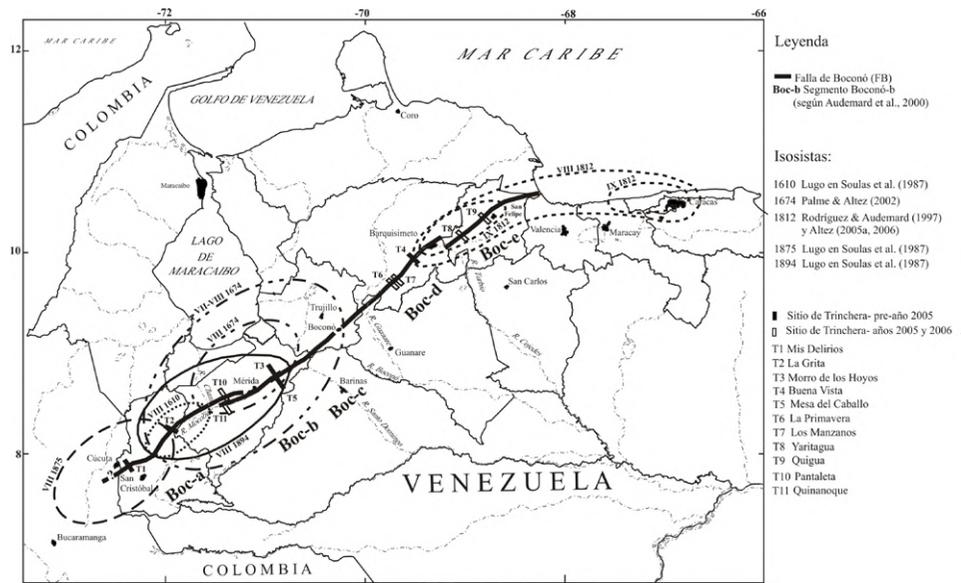


Figura 2. Mapa de localización de la falla de Boconó. Fuente: Audemard, 2016

Estudios históricos y sismológicos

Fuentes primarias

Los documentos catalogados como fuentes primarias (documentos hemerográficos como periódicos, documentos de archivo, artículos, relatos o documentos) se enumeran en la **tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1195/3055>.

Fuentes secundarias

En la literatura aparecen documentos escritos por importantes investigadores que sintetizan la información descrita en fuentes anteriores, pero sin llegar a dar interpretaciones de los principales parámetros focales del evento (**Tabla 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1195/3055>).

Interpretaciones macrosísmicas

Varios autores reportan algunos parámetros del terremoto de abril de 1894 que reflejan sus características físicas (**Tabla 1**). Además, en la **tabla 2** se presentan los trabajos publicados sobre las interpretaciones macrosísmicas del terremoto.

Tabla 1. Parámetros dados para el terremoto del 28 de abril de 1894

Coordenadas del epicentro		Profundidad (km)	Magnitud	Intensidad	Número de puntos de intensidad	Referencia
Lat. °N	Long. °W					
71,7	8,7	10 fijada	7,56±0,33 M _{lw}	---	32	Palme de Osechas, <i>et al.</i> , 2005
71,7	8,5	20	7,1 M _l	---	---	Fiedler (1961)
71,7	8,5		7,0 m _C	---	---	Fiedler (1961)
---	---	---	7,1-7,3 M _s	---	---	Audemard (1998)
71,69	8,55	---	7,1-7,4 M _l	¿?	¿?	Rengifo & Laffaille (2000)
71,90	8,5	20	7,1 M _l	X-XI (MCS)	---	Rivera & Torres, 1998
---	---	---	---	X (MM)	100	Kingland, <i>et al.</i> (2008)

Tabla 2. Estudios de interpretación macrosísmica del terremoto del 28 de abril de 1894

Nombre de la fuente	Autor	Fecha	Páginas	Referencia
<i>Documentos Archivos – Archivo General Estado de Maracaibo (AGEM):</i>				
Áreas afectadas por terremotos en Venezuela. Memoria del III Congreso Geológico Venezolano, 3: Caracas	G. Fiedler	1961	p. 1791-1810	Grases, 1990
Terremotos destructores del Caribe 1502-1990: una contribución al Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales, Caracas. Montevideo: Unesco-Relacis	José Grases	1990	132 p	---
Wilhelm Sievers (1895) y el gran terremoto de los Andes. Centro de Ecología I.V.I.C. Apartado 21827 Caracas 1020-A, Venezuela	Carlos Schubert	1994	10 p	---
El gran terremoto de Los Andes venezolano: 28 de abril de 1894. Revista Presente y Pasado, Vol. 2. No. 3. Mérida, Venezuela	Frank Reinaldo Altuve	1997	p. 63-73	---
Estudio de daños originados a las iglesias de la ciudad de Mérida por la acción de los terremotos de 1812 y 1894. Revista Geográfica Venezolana, Vol. 39 (Nº 1 y 2)	Ángela Rivera De Uzcátegui y Rafael Torres	1998	p. 219-256	---
Reevaluación del sismo del 28 de abril de 1894. Acta Científica Venezolana 51	Martín Rengifo y Jaime Laffaille	2000	p. 160-175	---
El gran terremoto de los Andes venezolanos y las juntas de socorro 28 de abril de 1894. Universidad De Los Andes, Mérida-Venezuela. Tesis.	Frank Reinaldo Altuve	(2005).	---	---
Re-evaluación de las intensidades de los grandes sismos históricos de la región de la cordillera de Mérida utilizando el método de Bakun & Wentworth. Revista Geográfica Venezolana, Número especial	Christl Palme de Osechas, María T. Morandi S. y José E. Choy	2005	p. 233-253	---
El gran terremoto de los Andes de 1894: memorias de una destrucción. En: El Desafío de la Historia, Nº 12, Caracas	Jaime Laffaille	2007	p. 56-63	---
Modelo de atenuación de la intensidad y mapa de isosistas del gran terremoto de los Andes venezolanos de 1894 a partir de datos macrosísmicos. XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. 26 a 30 de mayo de 2008 - Santiago – Chile. Conference paper	Jorge Kingland, Rafael Torres y Pether Inglessis	2008	33p	---

Fundamentos teóricos y metodológicos

El comportamiento de la intensidad sísmica con respecto a la distancia hipocentral puede expresarse matemáticamente con la siguiente relación:

$$I_i = I_0 - f(r_i) \quad (1),$$

donde I_i representa la intensidad en un punto cualquiera de la superficie terrestre, I_0 es la intensidad epicentral, y $f(r_i)$ corresponde a una función con respecto a la distancia hipocentral, donde r_i se expresa como:

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + h^2} \quad (2),$$

donde x define la distancia epicentral y h la profundidad focal del sismo.

La ecuación (1), que corresponde a la expresión matemática del campo macrosísmico de un terremoto, muestra el decaimiento de la intensidad macrosísmica en dependencia de la profundidad focal del terremoto y representa los efectos dejados por el evento sísmico en la superficie terrestre.

El campo macrosísmico se entiende como la región geográfica en la superficie de la tierra alrededor del epicentro en la que interactúa la fuerza del terremoto con los elementos que ocupan dicho espacio, de tal manera que en ella el sismo puede ser percibido y en algunos casos producir daños y efectos considerables. Una buena representación del campo macrosísmico es el trazado de los mapas de isosistas, que corresponden a isóneas que encierran áreas de igual nivel de intensidad sísmica en una región durante un terremoto.

Modelo de Blake-Shebalin

En términos generales, el modelo de Blake-Shebalin para la representación del campo macrosísmico se expresa mediante la siguiente ecuación (Shebalin, 1974):

$$I_i = a_i - \gamma \log x_i \quad (3)$$

Al comparar las ecuaciones (1) y (3) para focos superficiales ($h \rightarrow 0$), se puede ver que $a_i = I_0$ y $\gamma \log x_i = f(x_i)$. Análogamente, para focos no superficiales el postulado de Blake-Shebalin en términos de la i -ésima isosista se expresa como (Shebalin, 1974):

$$I_i = I_0 - \gamma \log(r_i/h) \quad (4)$$

La ecuación (4) define el campo macrosísmico cuando la atenuación anelástica de las ondas sísmicas es despreciable en comparación con la atenuación geométrica, de tal manera que γ es el coeficiente de atenuación geométrica, denominado también como coeficiente de Blake-Shebalin.

Profundidad focal (h) y coeficiente de Blake-Shebalin (γ)

Según Shebalin (1968), el foco del terremoto se entiende como la mínima región suficientemente isométrica (igual medida o escala de medición en los tres ejes principales x , y , z), dentro de la cual se encierran todas las deformaciones irreversibles iniciales que ocurren durante el terremoto. Así, el foco de un terremoto puede considerarse puntual solo si se ubica a una distancia suficientemente lejana del punto de observación. En los puntos más cercanos al epicentro macrosísmico, los efectos locales del campo macrosísmico se manifiestan condicionados por la gran extensión vertical del foco (Shebalin, 1974). Por otra parte, la extensión vertical del foco, condicionada por el incremento de la intensidad, se revela por la presencia de un máximo o un mínimo en la relación de las áreas limitadas por las isosistas vecinas al epicentro, manifestado en la curva, donde representa el área de la i -ésima isosista (Shebalin, 1968). Sin embargo, la ausencia de este máximo o mínimo no significa la ausencia del efecto de extensión vertical. El efecto local o manifestación de una mayor intensidad en una región de la superficie terrestre, también puede evidenciarse en el caso de que el epicentro local (E_l) no coincida con el epicentro normal (E_n). En el mapa de isosistas el epicentro normal estaría localizado en el baricentro de todo el sistema de isosistas, mientras que el epicentro local estaría representado por el baricentro de las tres primeras isosistas contadas desde el centro hacia afuera (Shebalin, 1974).

Cabe señalar que en el presente trabajo se diferenció entre el epicentro local y el normal, puesto que el primero está relacionado con la zona de mayores daños o efectos locales y el segundo corresponde al centro de intensidades del campo lejano por fuera de la zona de los posibles efectos locales causados por el terremoto.

La determinación de la profundidad del foco de un terremoto se logra satisfactoriamente usando la ecuación (4) siempre y cuando se conozca el coeficiente de Blake-Shebalin, que representa la atenuación geométrica en la ecuación general del campo macrosísmico, de tal manera que h se determina por la siguiente expresión (Shebalin, 1968, 1974):

$$h_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\sqrt{(10^{2(U_0 - I_i)/\gamma} - 1)}} \quad (5)$$

donde N es el número total de isosistas correspondiente al campo macrosísmico normal del terremoto y x_i es la distancia epicentral de la i -ésima isosista, en tanto que h_n representa la profundidad normal del terremoto, la cual se asocia con el lugar donde inicia la ruptura.

La profundidad local h_p , que corresponde a la prolongación y culminación de la ruptura, y a la cual se asocian los efectos locales del terremoto, se determina por la expresión:

$$h_i = \frac{x_j}{\sqrt{(10^{2(I_0 - I_i)/\gamma} - 1)}} \quad (6).$$

Tanto en la ecuación (5) como en la (6) el coeficiente de Blake-Shebalin (γ) puede determinarse como (Shebalin, 1968):

$$\gamma = -\frac{2}{\log(S_i/S_{i+1})} \quad (7),$$

donde S_i es el área de la i -ésima isosista.

Datos macrosísmicos

Los datos macrosísmicos del terremoto de 28 de abril de 1894 usados en el presente trabajo corresponden a los publicados por **Kingland, et al.** (2008), quienes presentan valores de intensidad para cien poblaciones de Venezuela donde el evento causó algún tipo de afectación. La intensidad máxima (X) se asignó a la población Selva de Onía (Mérida), la cual se propuso como la zona epicentral. Otras poblaciones del estado de Mérida como Zea, Chiguará, Santa Cruz de Mora, Tovar, Mesa de Culebra/Culebra, Mesa Bolívar/Tala y Estanques, se evaluaron con una intensidad de IX en la escala de Mercalli modificada.

A su vez, el trabajo de **Kingland, et al.** (2008) se basó en la recolección y revisión de información en documentos históricos, trabajos, tesis, libros y revistas que dan información sobre los efectos causados por este evento sísmico (**Maldonado, 1894; Sievers, 1895; Febres-Cordero, 1931; Febres-Cordero, 1985; Febres-Cordero, 1991; Castillo & Hernández, 1993; Salvatierra, 1993; López, 1996; Rengifo & Laffaille, 1998; Rivera De Uzcátegui & Torres, 1998, Grases, et al., 1999; Altuve, 2005**).

A partir de la evaluación de la intensidad en cada una de las poblaciones, **Kingland, et al.** (2008) trazaron el respectivo mapa de isosistas, que consta de seis isolíneas, donde la de mayor valor corresponde a la isosista de grado X (10) (**Figura 3**). Se observa que las isolíneas dibujadas pueden circunscribirse en una figura de forma elíptica en la cual se deduce que el eje mayor estaría orientado en dirección SW-NE, lo que indica la mejor propagación de la energía sísmica y concuerda con las estructuras tectónicas presentes en la zona, en especial la falla de Boconó, en tanto que el eje menor estaría orientado en dirección SE-NW.

Resultados

Parámetros macrosísmicos

Los resultados corresponden a la determinación de la profundidad del foco (normal y local), las coordenadas del epicentro macrosísmico (normal y local), la magnitud, la energía liberada, el momento sísmico y la aceleración macrosísmica.

Análisis del mapa de isosistas

La aplicación del modelo de Blake-Shebalin implica el análisis del mapa de isosistas. En este caso, las isosistas se circunscribieron en una elipse, de tal manera que en cada una de las isolíneas se midió el diámetro mayor (d_{max}), el diámetro menor (d_{min}), el área S_i (en km^2), el radio equivalente a la isosista que limita el área señalada (R_i), y la extensión horizontal, la cual corresponde a la distancia de las isosistas de mayor valor que indican el campo lejano del terremoto, y que es dada por la diferencia entre los dos diámetros:

$$l_x = \frac{(d1_{max} - d1_{min}) + (d2_{max} - d2_{min})}{2} \quad (8).$$

De esta forma, la exploración del mapa de isosistas señalado permitió obtener los valores mostrados en la **tabla 3**.

El coeficiente de Blake-Shebalin obtenido a partir de la ecuación 7 correspondió a $\gamma = 3,8$.

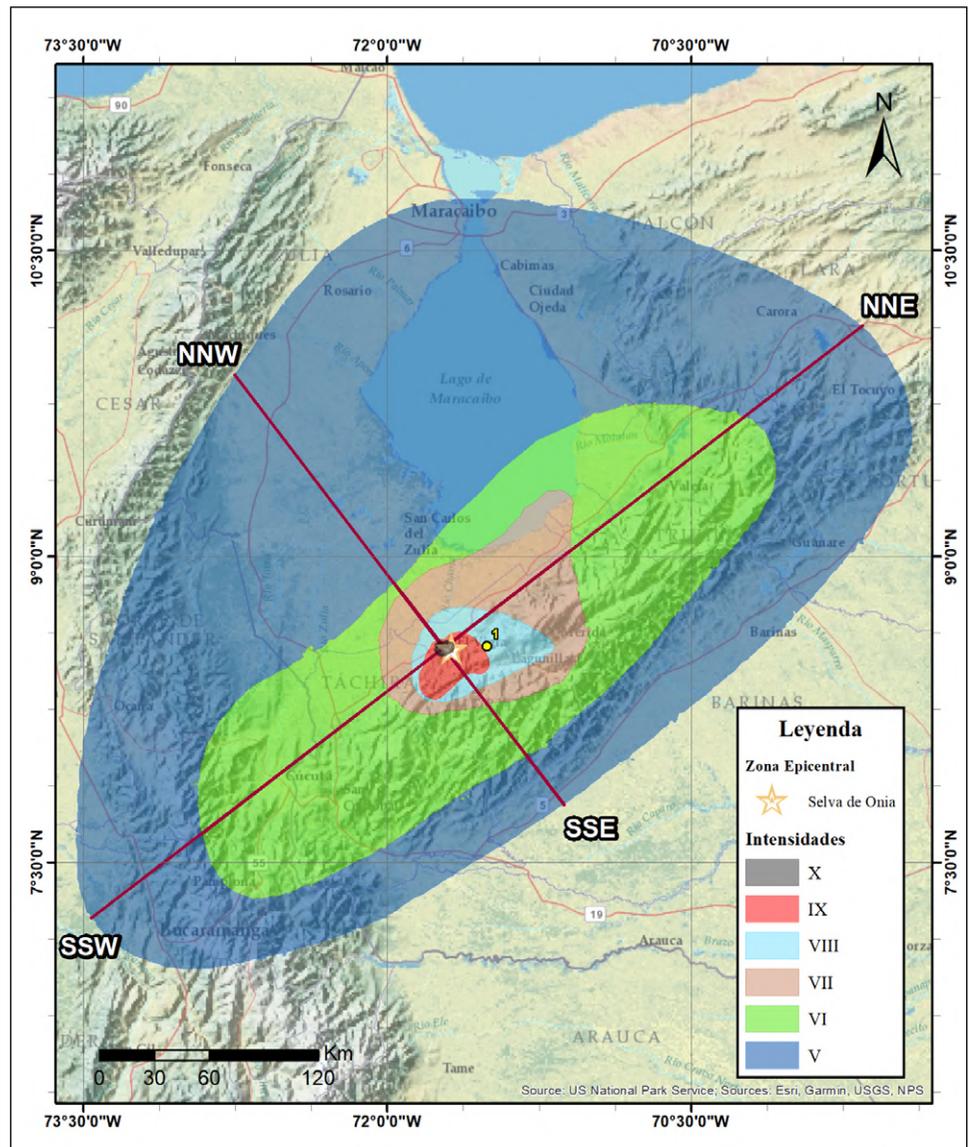


Figura 3. Mapa de isosistas del terremoto del 28 de abril de 1894. Fuente: Kingland, et al., 2008.

Tabla 3. Datos obtenidos a partir de la exploración del mapa de isosistas del terremoto del 28 de abril de 1894

Intensidad de la isosista $I(MM)$	Diámetro (km)		Área (S_i) (km ²)	$S_i/S_{(i+1)}$	Radio (R_i) (km)	$R_i/R_{(i+1)}$	Extensión horizontal (L_x) (km)		
	d_{max}	d_{min}					L_1	L_2	N
10	9,4	7,2	54,9	---	4,98	---	2,2		
9	26,7	24,5	877,9	0,063	20,71	0,24	2,2	} 29,4 226,95	
8	54,1	44,6	2.664,6	0,329	39,72	0,52	9,5		
7	125,8	76,5	8.976,7	0,297	73,56	0,54	49,3		
6	371,4	151,8	39.493,9	0,227	191,49	0,38	219,6		
5	528,3	294,0	123.144,0	0,321	264,79	0,72	234,3		

Profundidad del foco

En la **figura 4** se representa la relación de las áreas limitadas por las isosistas con el valor de intensidad para el terremoto del 28 de abril de 1894. Se observa un mínimo y un máximo en las isosistas de intensidad de 6 y 8, respectivamente, es decir, las isosistas de menor valor están asociadas con el capo normal del terremoto, en tanto que las isosistas de mayor intensidad, a partir del 8 ($I = 10$ y 9), están relacionadas con un efecto local causado por el evento sísmico.

Las profundidades normal (h_n) y local (h_l) del foco se determinaron a partir de las ecuaciones (5) y (6), respectivamente, obtenido los siguientes valores:

$$h_n = (18,24 \pm 1,66) \text{ km.}$$

$$h_l = (8,8 \pm 2,23) \text{ km.}$$

Epicentro macrosísmico

Los epicentros macrosísmicos normal (E_n) y local (E_l) corresponden a los baricentros de los dos conjuntos de isosistas que, separadamente, representan los campos macrosísmicos normal y local. Los valores obtenidos para dichos epicentros fueron los siguientes:

$$E_l: \phi = 8,55^\circ\text{N}; \lambda = -71,72^\circ\text{W}$$

$$E_n: \phi = 8,56^\circ\text{N}; \lambda = -71,51^\circ\text{W}$$

Magnitud, energía liberada y momento sísmico

Con el propósito de aportar nuevos parámetros focales de este terremoto, en el presente estudio se calculó la magnitud del sismo utilizando las relaciones empíricas propuestas por **Gutenberg & Richter** (1942), válidas para cualquier región cuando se conoce la profundidad h :

$$Ml = 2,2 + 3,6 \log \frac{R}{h} \tag{9}$$

$$\log E = 11,1 + 6,4 \log R - 3,2 \log h \tag{10}$$

donde Ml es la magnitud de Richter, E es la energía, R , el radio de perceptibilidad, y h la profundidad hipocentral.

Para el cálculo de estos parámetros se usaron los datos del radio de perceptibilidad R (**Tabla 3**), el cual corresponde al radio equivalente del límite espacial en el cual el sismo se ha percibido y la profundidad local h_l ya determinados. De acuerdo con las ecuaciones (9) y (10), se obtiene una $Ml = 7,3$ y una $E = 1,58 \cdot 10^{23}$ ergios.

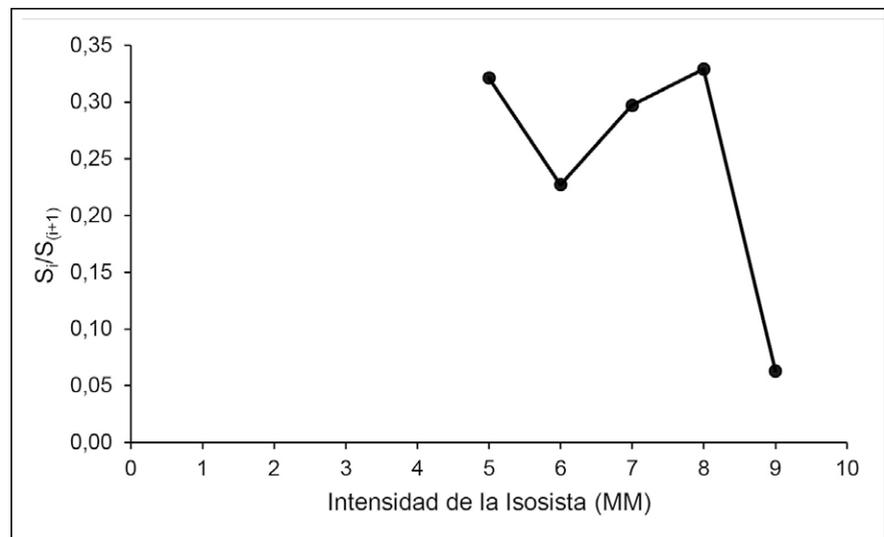


Figura 4. Relación de las áreas de las isosistas con la intensidad de las isolíneas

Ahora, según **Kanamori (1977)**, **Abe (1982)**, **Vassiliou & Kanamori (1982)**, **Kanamori (1983)**, **Sauter (1989)** y **Bormann & Giacomo (2010)**, el momento sísmico escalar puede calcularse en términos de la energía sísmica liberada a partir de la siguiente relación:

$$E = \frac{M_0}{2 * 10^4} \quad (11),$$

donde E es la energía sísmica liberada dada en ergios y M_0 el momento sísmico escalar expresado en dinas-cm.

Asimismo, Kanamori propuso la magnitud de momento M_w para eventos profundos y superficiales a partir de M_0 expresada como (**Kanamori, 1983**):

$$M_w = (\log M_0 - 16,1)/1,5 \quad (12).$$

Con estos datos se obtuvieron los siguientes valores de M_0 y M_w : $M_0 = 3,16 * 10^{27}$ dinas-cm y $M_w = 7,6$.

A partir de las intensidades consideradas en el mapa de isosistas, también es posible realizar un cálculo aproximado de la magnitud M_s considerando la siguiente ecuación (**Bommer, 1994**):

$$M_s = 0,83 \text{ Log}(R^2) + 0,28I_0 - 0,13 \quad (13),$$

donde M_s es la magnitud de ondas superficiales, R el radio equivalente del límite de perceptibilidad (en kilómetros) e I_0 la intensidad epicentral o la máxima intensidad registrada. Así se obtuvo un valor de $M_s = 6,6$.

Aceleración (macrosísmica)

Gutenberg & Richter (1942, 1956) proponen una relación empírica entre la intensidad macrosísmica y la aceleración sísmica, expresada de la siguiente manera:

$$\log a = \frac{I}{3} - 1/2 \quad (14).$$

La aceleración calculada es, entonces, $a = 676$ cm/seg², que equivale a 0,69 g.

En resumen, los parámetros sismológicos del terremoto del 28 de abril de 1894 se presentan en la **tabla 4**.

Tabla 4. Parámetros sismológicos del terremoto del 28 de abril de 1894 obtenidos a partir de datos macrosísmicos

Parámetro sismológico	Símbolo	Unidad	Valor
Epicentro macrosísmico local	E_l	grados	$\phi = 8,55^\circ\text{N};$ $\lambda = -71,72^\circ\text{W}$
Epicentro macrosísmico normal	E_n	grados	$\phi = 8,56^\circ\text{N};$ $\lambda = -71,51^\circ\text{W}$
Coefficiente de expansión geométrica	γ	adimensional	3,8
Profundidad normal del foco	h_n	km	18,24±1,66
Profundidad local del foco	h_l	km	8,8±2,23
Intensidad macrosísmica máxima	I_0	escala MM	X (10)
Magnitud de Richter	M	adimensional	7,3
Energía sísmica liberada	E	ergios	1,58*10 ²³
Momento sísmico escalar	M_0	dinas-cm	3,16*10 ²⁷
Magnitud de momento sísmico	M_w	adimensional	7,63
Magnitud de ondas superficiales	M_s	adimensional	6,58
Aceleración sísmica	a	cm/seg ²	676,0 ≈ 0,69g

Discusión

El uso de datos de intensidad obtenidos mediante métodos macrosísmicos sólidos permite hacer una valoración apropiada de los parámetros focales de terremotos ocurridos en cualquier región geográfica. Así, los estudios macrosísmicos deben considerarse como una herramienta complementaria de los estudios con datos instrumentales para la caracterización de terremotos históricos o recientes donde la cobertura y sensibilidad de las redes sismológicas sea baja.

En el presente estudio se utilizó el mapa de isosistas del sismo del 28 de abril de 1894 propuesto por **Kingland, et al.** (2008), quienes trazaron las isolíneas a partir de datos de intensidad macrosísmica en cien puntos diferentes del territorio venezolano afectados.

Los parámetros focales descritos en la **tabla 4** evidencian un avance en el conocimiento de las características físicas del terremoto, pues se rebasa el número de parámetros presentados en otros estudios para este evento (**Tabla 5**).

La diferencia entre los epicentros macrosísmicos normal y local establecida en el presente estudio muestra que el proceso sísmico asociado con la zona de ruptura en la región focal fue complejo y que los efectos de un evento sísmico en la superficie no están asociados con un solo punto de nucleación de la energía, lo que permitió establecer que dicha nucleación se concentró en dos puntos diferentes en el interior de la tierra, mostrando una clara extensión de la región focal. De esta manera, se establecieron dos subfocos denominados normal y local, a los cuales se asociaron diferentes parámetros de epicentro y profundidad. Se nota, entonces, la correlación entre el epicentro macrosísmico local obtenido en este estudio con el único dado por otros autores.

Asimismo, en el estudio se asignó la profundidad local y la normal asociada geoméricamente a las localizaciones epicentrales anteriores. La profundidad normal ($18,24 \pm 1,66$ km) obtenida fue similar al único valor de profundidad (20 km) propuesto en otros estudios,

Tabla 5. Comparación de parámetros sismológicos deducidos para el terremoto del 28 de abril de 1894 en los Andes venezolanos obtenidos en diferentes estudios mediante datos macrosísmicos

Parámetro sismológico del terremoto del 28 de abril de 1894 obtenidos mediante datos macrosísmicos	Resultados		Otros autores		
	Presente estudio	Palme, et al., 2005	Fiedler (1961)	Rengifo & Laffaille (2000)	Rivera & Torres (1998)
Epicentro macrosísmico local (E_l)	$\phi = 8,55^\circ\text{N}$ $\lambda = -71,72^\circ\text{W}$	$\phi = 8,7^\circ\text{N}$ $\lambda = -71,7^\circ\text{W}$	$\phi = 8,5^\circ\text{N}$ $\lambda = -71,7^\circ\text{W}$	$\phi = 8,55^\circ\text{N}$ $\lambda = -71,69^\circ\text{W}$	$\phi = 8,5^\circ\text{N}$ $\lambda = -71,90^\circ\text{W}$
Epicentro macrosísmico normal (E_n)	$\phi = 8,56^\circ\text{N}$ $\lambda = -71,51^\circ\text{W}$	---	---	---	---
Profundidad normal del foco (h_n) - km	$18,24 \pm 1,66$	10 fijada	20	---	20
Profundidad local del foco (h_l) - km	$8,8 \pm 2,23$	---	---	---	---
Magnitud de Richter (M_l)	7,3	---	7,1	7,1-7,4	7,1
Magnitud momento sísmico (M_w)	7,63	$7,56 \pm 0,33$	---	---	---
Magnitud de ondas superficiales (M_s)	6,58	---	7,0 mC	---	---
Momento sísmico escalar (M_0) - dinas·cm	$3,16 * 10^{27}$	---	---	---	---
Energía sísmica liberada (E) - ergios	$1,58 * 10^{23}$	---	---	---	---
Aceleración sísmica (a) - cm/seg ²	$676,0 \approx 0,69g$	---	---	---	---

en tanto que la profundidad local ($8,8 \pm 2,23$ km), al ser menor que la normal, evidenció un efecto local causado por el evento que se reflejó con mayor precisión en la gravedad de los daños relatados en las diferentes fuentes bibliográficas descritas arriba, y que no había sido calculada en trabajos anteriores.

Se ha estimado el epicentro local y el normal, cuyas extensiones coinciden con la traza de la falla de Boconó, también establecida por otros autores como la fuente de este terremoto (Audemard, 1998).

En cuanto a la magnitud, en el presente trabajo se calcularon las magnitudes M_I , M_w y M_s , y se encontró una fuerte correlación entre ellas que concuerda con los valores propuestos por otros autores. Solo se obtuvo un valor más bajo en M_s comparado con el dado por Audemard (1998), quien propuso una $M_s = 7,1-7,3$ a partir de un método paleosismológico. Ahora, la leve diferencia entre el valor de la magnitud M_w encontrada en este trabajo y la que proponen Palme de Osechas, et al. (2005) puede atribuirse a que estos autores usaron el método de Bakun & Wentworth (1997), el cual fija la profundidad de 10 km, obligando a que geoméricamente el centro de intensidades sea restringido a este hipocentro, constriñendo, por lo tanto, el cálculo de la magnitud. Algo similar podría ocurrir con la ecuación que relaciona la magnitud (M_w) en el territorio venezolano con la atenuación de la intensidad macrosísmica, la cual se seleccionó para la actualización del catálogo sismológico de América del Sur en una ventana temporal antes de 1964 (Gómez, et al., 2017). Dicha ecuación se expresa como:

$$M_w = 1,3328 + 0,5993 I \quad (15),$$

donde al reemplazar el valor de X (10) de la intensidad máxima del mapa de isosistas usado en el presente trabajo, se obtendría una magnitud de $M_w = 7,3$, valor ligeramente inferior a los correspondientes que se presentan en la **tabla 5**.

Es importante precisar que los métodos macrosísmicos son una potente herramienta que aporta información suficiente para alimentar los catálogos sismológicos nacionales y locales, los cuales ayudan a mejorar la estimación de la amenaza y el riesgo sísmico en cualquier región geográfica sismológicamente activa.

Conclusiones

En el presente estudio se aplicó un método macrosísmico empírico para deducir los parámetros sismológicos del terremoto del 28 de abril de 1894 ocurrido en los Andes Venezolanos. Los resultados arrojaron que el epicentro macrosísmico local (E_l) se localizó en las coordenadas $\phi = 8,55^\circ\text{N}$ y $\lambda = -71,72^\circ\text{W}$, mientras que el epicentro macrosísmico normal (E_n) se localizó a $\phi = 8,56^\circ\text{N}$ y $\lambda = -71,51^\circ\text{W}$. La profundidad del foco normal obtenida fue de $h_n = 18,24 \pm 1,66$ km, y la del foco local de $h_l = 8,8 \pm 2,23$ km, localizaciones que sugieren que la fuente del terremoto fue la falla de Boconó.

Se obtuvo un valor de magnitud $M_I = 7,3$ y de energía sísmica liberada de $E = 1,58 * 10^{23}$ ergios. También se determinó el momento sísmico escalar con un valor de $M_0 = 3,16 * 10^{27}$ dinas-cm y la respectiva magnitud de momento sísmico de $M_w = 7,6$. Mediante una relación empírica se obtuvo una magnitud de ondas superficiales aproximada de $M_s = 6,6$ y el valor de aceleración sísmica fue de $0,69$ g.

Los cálculos realizados y los valores obtenidos permiten concluir que el método de análisis macrosísmico usado en este trabajo representa una herramienta apropiada para la determinación de los parámetros focales de terremotos históricos y aporta datos e información que conducen a mejorar los problemas de completitud y homogeneidad de los catálogos sismológicos para la valoración de la amenaza y el riesgo sísmicos.

Información suplementaria

Tabla 1S. Estudios paleosismológicos sobre el terremoto del 28 de abril de 1894. Vea la tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1195/3055>

Tabla 2S. Fuentes históricas primarias sobre el terremoto del 28 de abril de 1894. Vea la tabla 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1195/3055>

Tabla 3S. Fuentes históricas secundarias sobre el terremoto del 28 de abril de 1894. Vea la tabla 3S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1195/3055>

Agradecimientos

Los autores agradecen al Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano de la Universidad del Valle - Colombia (OSSO), y a las directivas de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), por el apoyo y la colaboración para la realización de este trabajo.

Contribución de los autores

Todos los autores participaron en la escritura del documento y en la búsqueda de la información. EJSJH participó en el desarrollo teórico y metodológico; FAA en la interpretación macrosísmica y NGM en la exploración del mapa de isosistas y en la interpretación de resultados.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses que puedan influir en el proceso de publicación.

Referencias

- Abe, K.** (1982). Magnitude, seismic moment and apparent stress for major deep earthquakes. *J. Phys. Earth.* **30**: 321-330.
- AGEM.** (1894a). Fondo Gobernación. Correspondencia con la Junta Subalterna de Instrucción Popular del Distrito Sucre. (Citado en Altuve, 2005).
- AGEM.** (1894b). Fondo Gobernación Presidencia del Estado Los Andes. Acta de la Junta Comunal de la Parroquia Libertad. (Citado en Altuve, 2005).
- AGEM.** (1894c). Fondo Gobernación. Presidencia del Estado Los Andes. Acta de la Junta Comunal de la parroquia Chiguará. (Citado en Altuve, 2005).
- AGEM.** (1894d). Fondo Gobernación. Presidencia del Estado Los Andes. Correspondencia con el Jefe Civil del Distrito Torondoy. Leg.1-2. (Citado en Altuve, 2005).
- AGEM.** (1894e). Fondo Gobernación. Presidencia del Estado Los Andes. Informe de José Antonio Dávila. Leg. 1. (Citado en Altuve, 2005).
- AGEM.** (1894f). Fondo Gobernación. Presidencia del Gran Estado Los Andes. Correspondencia con el Presidente de la República. Leg. 1. (Citado en Altuve, 2005).
- AGEM.** (1894g). Fondo Gobernación. Sección Presidencia del Estado Los Andes. Correspondencia con el Jefe Civil del Distrito Tovar. Leg. 1. (Citado en Altuve, 2005).
- AGEM.** (1894h). Fondo Gobernación: Correspondencia de la Jefatura Civil de la Parroquia San Juan con la Jefatura Civil del Distrito Sucre. (Citado en Altuve, 2005).
- Altez, R.** (2010). Si la naturaleza se opone... Terremotos, historia y sociedad en Venezuela. Caracas, Venezuela: Editorial Alfa. 321 p.
- Altuve, F. R.** (1997). El gran terremoto de Los Andes venezolano: 28 de abril de 1894. *Revista Presente y Pasado.* **2** (3): 63-73.
- Altuve, F. R.** (2005). El gran terremoto de los andes venezolanos y las juntas de socorro 28 de abril de 1894. Mérida, Venezuela: Universidad De Los Andes. 40 p.
- Arango, O. H., Tabares, J. H.** (2002). Estudio macrosísmico del terremoto de Armenia- Colombia del 25 de enero de 1999: modelo de reconstrucción geométrica del foco sísmico. Cali, Colombia: Universidad del Valle (Trabajo de grado).
- Audermard, F.** (1997). Holocene and historical earthquakes on the Boconó fault system, southern Venezuelan Andes: Trench confirmation. *Journal of Geodynamics.* **24** (1-4): 155-167.
- Audermard, F.** (1998). Contribuciones de la Paleosismología a la sismicidad histórica: los terremotos de 1610 y 1894 en Los Andes venezolanos. *Revista Geográfica Venezolana.* **39** (1- 2): 87-105.
- Audermard, F.** (2009). 5.3.8 Falla de Boconó (VE-06b y VE-06c). En: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades andinas. Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes. Publicación Geológica Multinacional No. 7 (259-271). Canadá.

- Audemard, F.** (2016). Evaluación paleosísmica del segmento San Felipe de la Falla de Boconó (Venezuela noroccidental): ¿responsable del terremoto del 26 de marzo de 1812? *Boletín de Geología*. **38** (1): 125-149.
- Bakun, W. H. & Wentworth, C. M.** (1997). Estimating earthquake locations and magnitude from seismic intensity data. *Bull. Seism. Soc. Am.* **87**: 1502-1521.
- Bakun, W. H.** (1999). Erratum to Estimating earthquake location and magnitude from seismic intensity data. *Bull. Seism. Soc. Am.* **89**: 557.
- Bakun, W. H.** (2000). Seismicity of California's north coast, *Bull. seism. Soc. Am.* **90**: 797-812.
- Bakun, W. H.** (2005). Magnitude and location of historical earthquakes in Japan and implications for the 1855 Ansei Edo Earthquake. *J. Geophys. Res.* **110**: B02304. Doi: 10.1029/2004JB003329.
- Bakun, W. H.** (2006). Estimating locations and magnitudes of earthquakes in Southern California from modified Mercalli intensities, *Bull. Seism. Soc. Am.* **96**: 1278-1295.
- Bakun, W. H., Gómez-Capera, A. A., Stucchi M.** (2011). Epistemic uncertainty in the location and magnitude of earthquakes in Italy from macroseismic data. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **101** (6): 2712-2725.
- Barbano, M. S., Bottari, A., Carvani, P., Cosentino, M., Federico, B., Fonte, G., Lo Giudice, E., Lombardo, G., Patane, G.** (1979). Macroseismic Study of the Gulf of Patti Earthquake in the Geostructural Frame of North – Eastern Sicily. *Boll. Soc. Geol. It.* **98**: 155-174.
- Beauval, C., Yepes, H., Bakun, W. H., Egred, J., Alvarado, A., Singaicho, J-C.** (2010). Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador (1587-1996). *Geophys. J. Int.* **181**: 1613-1633.
- Bindi, D., Gómez-Capera, A. A., Parolai, S., Abdrakhmatov, K., Stucchi, M., Zschau, J.** (2013). Location and magnitudes of earthquakes in Central Asia from seismic intensity data: model calibration and validation. *Geophys. J. Int.* **192**: 710-724.
- Blake, A.** (1941). On the Estimation of Focal Depth from Macroseismic Data. *Bull. Seism. Soc. Am.* **31** (3): 225-231.
- Blanco, E. J.** (2017). El gran terremoto de los Andes de 1894. Fecha de consulta: 12 de mayo de 2020. Disponible en: <http://matriavigiense.blogspot.com/2017/04/el-gran-terremoto-de-los-andes-de-1894.html>
- Bommer, J.** (1994). Sismología para ingenieros. Papeles Técnicos UCA. Serie Fundamentos F93001. San Salvador: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas. 7 p.
- Bormann, P. & Giacomo, D.** (2010). The moment magnitude and the energy magnitude: common roots and differences. *Journal of Seismology*. **15** (2): 411-427.
- Bottari, A., Carapezza, E., Carapezza, M., Carvani, P., Cefali, E., Lo Giudice, E., Pandolfo, C.** (1986). The 1908 Messina Strait Earthquake in the Regional Geostructural Framework. *Journal of Geodynamics*. **5**: 275-302.
- Bottari, A., Federico, B., Lo Giudice, E.** (1979). Metodological Considerations Regarding the Determination of Some Macroseismic Field Parameters. Application to earthquakes in the Calabro-Pelotarian Arc. *Boll. Geof. Teor. Appl.* **23** (83): 197-225.
- Bottari, A., Federico, B., Lo Giudice, E.** (1982a). Nuove Evidenze di Correlazione tra l'Attenuazione Macrosísmica ed Campi di Lineamenti Strutturali nell'Italia Meridionale. *Ann. di Geofisica*. **35**: 5-26.
- Bottari, A., Giovani, L., Lo Giudice, E., Longo, V., Spadea, M., Vecchi M.** (1982b). Regional Macroseismic Field of the 1980 Irpinia Earthquake. *Ann. di Geofisica*. **35**: 27-84.
- Brun, J. A.** (1894). Relación circunstanciada de la situación de los edificios, de la línea, puente, material rodante y máquinas del Ferrocarril de Santa Bárbara a El Vigía después del temblor de tierra del día 28 de abril de 1894. Documentos del Ministerio de Obras Públicas. (Citado por Eudes J. Blanco P., 2017).
- Castillo, M. & Hernández, A. del C.** (1993). Santa Cruz del Carmelo de Mora (1840-1993). Venezuela: Universidad de Los Andes. Facultad de Humanidades y Educación- Escuela de Historia (Tesis de pregrado).
- Centeno-Graü, M.** (1969). Estudios Sismológicos. 2ª edic. Caracas, Venezuela-. Min de Obras Públicas y Academia de Ciencias Físicas Matemáticas y Naturales. (Citado en Altuve, 2005).
- Centro Regional de Sismología para América del Sur-CERESIS.** (1985). Catálogo de terremotos para América del Sur. Datos de hipocentro e intensidades. Venezuela, Vol. 8.
- Choy, J.E., Palme de Osechas, C., Guada, C., Morandi, M., Klarica, S.** (2010). Macroseismic Interpretation of the 1812 Earthquake in Venezuela Using Intensity Uncertainties and A Priori Fault-Strike Information. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **100**: 241-255.
- Dorbath, L., Cisternas, A., Dorbath, C.** (1990). Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Perú. *Bull. Seism. Soc. Am.* **80** (3): 551-576.

- El Correo de los Estados.** (1894). Caracas, Venezuela. 2. (Citado en Altez, 2010).
- El Tiempo.** (1894). Caracas, Venezuela. Única. (Citado en Altez, 2010).
- Febres-Cordero, T.** (1894). Terremoto de los Andes. Óbolo para Los Andes. Folleto No. **3**: 46-50. (Citado en Altuve, 2005).
- Febres-Cordero, T.** (1931). Archivo de Historia y Variedades. Tomo II. Caracas, Venezuela: Editorial Suramerica. (Citado en Altuve, 1997).
- Febres-Cordero, T.** (1985). El Lápiz, Datos Curiosos, Apuntes de Cartera, Misceláneas. Mérida-Venezuela: Instituto Autónomo Biblioteca Nacional, Universidad de Los Andes. Edición facsimilar.
- Febres-Cordero, T.** (1991). Obras Completas. Segunda Edición. 9 v. San Cristóbal, Venezuela: Banco Hipotecario de Occidente. 2243 p.
- Fiedler, G.** (1961). Áreas afectadas por terremotos en Venezuela. En: Memoria del III Congreso Geológico Venezolano. **3**: 1791-1810. Caracas.
- Gasparini, P., Vannucci, G., Tripone, D., Boschi E.** (2010). The location and sizing of historical earthquakes using attenuation of macroseismic intensity with distance, Bull. Seismol. Soc. Am. **100**: 5A:2035-2066. Doi: 10.1785/0120090330.
- Gómez, A. & Salcedo, E.** (2000). Determinación de la profundidad focal de algunos sismos ocurridos en Colombia, a partir de datos macrosísmicos. Rev. Red Sismológica Regional del Eje Cafetero. **5**: 12-16. ISSN. 0123-9074.
- Gómez-Capera, A. A., Stucchi, M., Arcila, M., Bufaliza, M., Choy, J., Leyton, L., Pirchiner, M., Rendón, H., Rodríguez, L., Sarabia, A. M., Tavera, H., Yepes, H.** (2017). Updated earthquake catalogue for South America: time window pre-1964. En: 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017.
- Grases, J., Altez, R., Lugo, M.** (1999). Catálogo de sismos sentidos o destructores, Venezuela 1530-1998. Caracas, Venezuela: Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales-Facultad de Ingeniería, UCV.
- Grases, J.** (1990). Terremotos destructores del Caribe 1502-1990: una contribución al Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales, Caracas. Montevideo: Unesco-Relacis. 32 p.
- Gutenberg, B. & Richter, C.** (1942). Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration. Bull. Seismol. Soc. Amer. **32**: 163-191.
- Gutenberg, B. & Richter, C. F.** (1956). Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration: (Second paper). Bull. Seismol. Soc. Amer. **46** (2): 105-145.
- Hinzen, K. G. & Oemisch, M.** (2001). Location and magnitude from seismic intensity data of recent and historic earthquakes in the Northern Rhine area, central Europe. Bull. seism. Soc. Am. **91**: 40-56.
- Kanamori, H.** (1977). The energy release in great earthquakes. J. Geophys Res. **82**: 2981-2987.
- Kanamori, H.** (1983). Magnitude scale and quantification of earthquakes. Tectonophysics. **93**: 185- 199.
- Kingland, J., Torres, R. A., Inglessis, P.** (2008). Modelo de atenuación de la intensidad y mapa de isosistas del gran terremoto de los Andes venezolanos de 1894 a partir de datos macrosísmicos. XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. 26 a 30 de mayo de 2008 - Santiago – Chile. Conference paper.
- Laffaille, J.** (2007). El gran terremoto de los Andes de 1894: memorias de una destrucción. El Desafío de la Historia. **12**: 56-63.
- Lares, J. I.** (1894). Volvamos al hogar: después del terremoto del 28 de abril de 1894. Mérida, Venezuela: Imprenta Picón Grillet. (Citado en Altuve, 2005).
- López, Y.** (1996). Evaluación histórica y análisis morfoestructural de los efectos del terremoto del 28-04-1894 en los Andes venezolanos: una aproximación integral a un estudio de riesgo sísmico. Mérida, Venezuela: Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales (Tesis de pregrado).
- Los Ecos del Zulia.** 08-05-1894 Maracaibo, Venezuela. 2. (Citado en Altez, 2010).
- Maldonado, J.** (1894). Terremoto de Tovar (Ruinas). Hojas sueltas. Tovar. Biblioteca Febres Cordero. Mérida. (Citado en Kingland, *et al.*, 2008).
- Marín, J. P., Castillo, H., Salcedo, E.** (2006). Modelo geométrico del foco del terremoto de Popayán (Colombia) a partir de datos macrosísmicos. Boletín de Geología. **28** (2): 93-109.
- Marín, J. P., Valencia, L. Y., Rendón, L. M.** (2009). Análisis macrosísmico del terremoto de Murindó – Antioquia (Colombia) octubre de 1992. Boletín de Geología. **31** (1): 85-93.
- Musson, R., Jiménez, M. J., Gómez-Capera, A. A.** (2008). Earthquake parameter estimation from historical macroseismic data. Seismological Research Letters. **79** (2): 313.

- Palme de Osechas, C., Morandi, M. T., Choy, J. E.** (2005). Re-evaluación de las intensidades de los grandes sismos históricos de la región de la cordillera de Mérida utilizando el método de Bakun & Wentworth. *Revista Geográfica Venezolana*. Número especial: 233-253.
- Ramírez, J. E.** (1975). *Historia de los terremotos en Colombia*. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 250 p.
- Rengifo, M. & Laffaille, J.** (1998). El terremoto del año 1894 en Los Andes venezolanos. *Revista Geográfica Venezolana*. **39** (1- 2): 141-162.
- Rengifo, M. & Laffaille, J.** (2000). Reevaluación del sismo del 28 de abril de 1894. *Acta Científica Venezolana*. **51** (3): 160-175.
- Rivera De Uzcátegui, A. & Torres, R. A.** (1998). Estudio de daños originados a las iglesias de la ciudad de Mérida por la acción de los terremotos de 1812 y 1894. *Revista Geográfica Venezolana*. **39** (1-2): 219-256.
- Rondón-Peña, R.** (1894) *Triste Suerte de Zea*. Tovar, Venezuela: Imprenta de V. de Jesús. (Citado en Altuve, 2005).
- Rudolf, E.** (1895). Über submarine Erdbeben und Eruptionen. *Beiträge zur Geophysic*. **II**: 537-666. (Citado por Grases, 1994).
- Salvatierra, M.** (1993). Estudio preliminar sobre la vulnerabilidad sísmica de Mérida. Trabajo de Ascenso. Mérida-Venezuela: Universidad de Los Andes.
- Sauter, F.** (1989). *Introducción a la sismología. Fundamentos de ingeniería sísmica I*. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica. 270 p.
- Schubert, C.** (1994). Wilhelm Sievers (1895) y el gran terremoto de los Andes. Fecha de consulta: 12 de mayo de 2020. Disponible en: <https://es.calameo.com/read/0051660166c4c67e9b973>
- Shebalin, N. V.** (1968). Método de utilización de datos ingeniero-geológicos en la zonación sísmica. En: *Zonación sísmica de la U.R.S.S (95-111)*. Moscú: Nauka. (En ruso).
- Shebalin, N. V.** (1971). Cálculo del tamaño y posición del foco del terremoto de Tashkent mediante datos macrosísmicos e instrumentales. En: *El terremoto de Tashkent de 1966 (68-80)*. Tashkent, Uzbekistán. (En ruso).
- Shebalin, N. V.** (1974). Focos de terremotos fuertes en el territorio de la URSS. Moscú: Nauka. (En ruso).
- Shebalin, N. V.** (1991). Cálculo del tamaño y posición del foco del terremoto de Spitak mediante datos macrosísmicos. *Problemas de la Ingeniería Sísmica*. **32**: 35-44. (En ruso).
- Sibol, M. S., Bollinger, G. A., Birch, J. B.** (1987). Estimations of magnitudes in central and eastern North America using intensity and felt area. *Bull. Seism. Soc. Am.* **77**: 1635-1654.
- Sievers, W.** (1895). Das Erdbeben in Venezuela am 28. April 1894. En: *Mitteilungen der geographische Gesellschanfl (237-244)*. Giessen, Alemania. Traducido y presentado por C. Schubert (1994) en el Foro: "A cien Años del Gran Terremoto de los Andes", Mérida. (Citado en Kingland, *et al.*, 2008).
- Stucchi, M.** (1994). Recommendations for the compilation of a European parametric earthquake catalogue, with special reference to historical records. En: *Materials of the CEC Project "Review of historical seismicity in Europe"*. Vol 2. (181-190).
- Szeliga, W., Hough, S., Martin, S., Bilham, R.** (2010). Intensity, magnitude, location and attenuation in India for felt earthquakes since 1762. *Bull. Seism. Soc. Am.* **100** (2): 570-584.
- Vassiliou, M. S. & Kanamori, H.** (1982). The energy release in earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.* **72**: 371-387.
- Wells, D. L. & Coppersmith K. J.** (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*. **84** (4): 974-1002.

In Memoriam



Germán Domingo Amat García

16 mayo 1960 - 21 abril 2021

Con este emotivo escrito quiero honrar y recordar al profesor Germán Domingo Amat García, biólogo y magíster en Biología, una persona discreta, estudiosa y de destacada labor en la docencia, la investigación y la extensión universitaria.

Quiero referirme a este gran hombre como amigo, compañero, colega, sobresaliente científico estudioso de los insectos, historiador y excelente profesor, que brilló por sus realizaciones personales y académicas, actividades que lo posicionaron como un reconocido investigador en el contexto nacional e internacional de la entomología.

Es importante resaltar la calidad y el impacto de sus contribuciones al conocimiento de los coleópteros de Colombia, sobre todo su taxonomía y ecología, y la distribución de la familia Passalidae, cuyos ejemplares son muy diversos y llamativos. Estudió a este grupo de coleópteros con pasión durante la mayor parte de su vida tal como se evidencia en la mayoría de su producción científica, reflejada en 125 publicaciones entre libros, artículos y notas divulgativas que vieron la luz para beneficio de sus colegas, sus estudiantes de pregrado y maestría y todo aquel que abordara con interés el estudio de estos organismos.

El privilegio de conocer a Germán Amat es de larga data, pero en los últimos años coincidimos en un interés común: el estudio y las anotaciones en torno al pensamiento naturalístico en nuestro país, su origen y su desarrollo y, en especial, sus exponentes desde la colonia hasta nuestros días. Reflexionamos largamente sobre cómo preparar y divulgar escritos dedicados a los “Protagonistas de la biodiversidad en Colombia”, a lo largo de una línea de tiempo coherente y crítica, fácil de entender, para conocer y acreditar a todos aquellos que tuvieron un papel fundamental en la vida científica de la nación y de la Universidad Nacional, particularmente del Instituto de Ciencias Naturales. En esa búsqueda constante encontramos caminos que nos condujeron de una fuente a otra de la literatura especializada y nos permitieron descubrir otros libros y autores llenos de sorpresas por la forma provocadora de abordar este tópico. Ello nos permitió desempolvar ese pasado y compartirlo con el público interesado en la historia de la ciencia en Colombia, develando personajes y vivencias desconocidas sobre ellos.

Germán deja un legado muy grande a todos aquellos a quienes formó. Compartía su tiempo y sus experiencias de vida siempre que nos acercábamos a su oficina o a la colección de entomología de la que fue curador. Era un tremendo incentivo hablar con él, pues como buen maestro, comunicaba su saber y sus vivencias con emoción y alegría. Por ello vivirá en los corazones de sus alumnos.

Con su prematura partida, la academia sufre un duro golpe, difícil de superar en el corto plazo. En memoria de este hombre afable, de generoso corazón, y conversación polifacética, vale la pena recordar no solo sus historias sobre lugares de la geografía nacional a los que amó inmensamente, como los morichales, sino expresar el afecto de quienes tuvimos el privilegio de ser amigos suyos.

Germán era un buen hombre, optimista, educado, juicioso, riguroso en su quehacer científico, de buen humor y excelentes modales, un deportista con una gran energía que, además, disfrutaba de la buena música, otra de sus pasiones. Su recuerdo nos acompañará siempre y su ejemplo será un constante estímulo para perseverar en la causa de la investigación científica.

Con gran tristeza asumimos la partida de un colega y amigo. Merecía vivir una larga vida porque la amaba y disfrutaba su trabajo intensamente. Seguirá siendo un ejemplo digno de imitar como modelo de académico cabal.

Jaime Aguirre Ceballos

Profesor titular-emérito

Instituto de Ciencias Naturales

Universidad Nacional de Colombia

In Memoriam



Regino Enrique Martínez-Chavanz

El pasado 5 de abril falleció en París, a los 80 años, el profesor Regino Enrique Martínez-Chavanz, quien dedicó su vida a la generación y difusión del conocimiento en los campos de la física, la historia y la filosofía de la ciencia.

Hace más de un año el grupo de investigación “Patrimonio Observatorio Astronómico Nacional” inició un trabajo académico al cual se vinculó el profesor Martínez-Chavanz. Al inicio de cada semana y en medio de la virtualidad a la que obligaba la pandemia, él nos compartía sus hallazgos sobre la vida de Julio Garavito Armero, pues llevaba varios años elaborando una completa biografía del ingeniero, matemático y astrónomo colombiano. Frente a su extensa biblioteca hacía significativas intervenciones sobre la historia y el valor patrimonial del Observatorio Astronómico Nacional y el trabajo de Garavito.

Interactuamos tan solo unos meses con él, los suficientes para conocer sus cualidades como ser humano y recoger algo de su vasto conocimiento, que se extendía a las ramas de la física y la epistemología, algo que propios y extraños pudieron constatar durante el foro de conmemoración de los 50 años del Cráter Garavito en la Luna, realizado el 27 de agosto del 2020, y que sería su último evento público. Las intervenciones de Regino eran siempre esclarecedoras, transitaba con holgura entre el conocimiento científico y el saber enciclopédico, habilidad que solo académicos consagrados como él pueden exhibir.

Regino nació en San Jacinto (Bolívar) el 10 de noviembre de 1940, allí realizó la primaria, y luego en Cartagena culminó el bachillerato. Decidido a estudiar física en Europa, escogió la Sorbona en París al conocer la biografía de Marie Curie, que su madre le había regalado. No tuvo entonces sino un solo objetivo: seguir las huellas de Madame Curie en la misma ciudad donde se había formado y trabajado. Atravesó el Atlántico para radicarse en la ciudad europea que vio surgir a destacados científicos modernos, un lugar al cual llegó gracias al apoyo de una beca obtenida para desarrollar estudios que por aquel entonces eran impensables en Colombia.

Al terminar la maestría, regresó a su bella Cartagena a enseñar y sentir «el olor de la guayaba», nos cuenta su hija Elsa. De allí, siguió a Medellín antes de volver a París para obtener un doctorado en física teórica con una tesis titulada *Sobre la experiencia de Sagnac y el disco rotante*. Retornó a Medellín y se vinculó a la Universidad de Antioquia, donde se desempeñó como profesor titular hasta su jubilación en 1998, cuando regresó a Francia a reunirse con sus hijos Elsa y David y su esposa Françoise que se le habían adelantado tres años antes. En el 2020 recibió la alegría de su nieto Trystan, de quien esperaba que siguiera sus pasos. Tenía su foto en la pantalla del computador para que «vea lo que hago, que le tome gusto a trabajar duro y con disciplina, y que sea físico.»

En París siguió con su labor científica, colaborando con el Rehseis (hoy en día laboratorio SPHERE) y volvió con regularidad a Colombia para participar en escuelas, seminarios y dictar conferencias. Mientras trabajaba escuchaba mucha música (rancheras, tangos o vallenatos y también ópera y sinfonías). Se mantenía muy al tanto de lo que pasaba en el mundo. Cuando emergía de sus libros y dejaba por un rato el teclado del computador, le encantaba viajar, estar con sus amigos o familiares para compartir un buen vino y una buena comida, jugar con las palabras, bromear...

A pesar de las enfermedades graves que sufrió a partir del 2014, con esa gran fuerza de voluntad que lo caracterizaba, siguió leyendo, investigando, escribiendo, en especial sobre Julio Garavito Armero. Estuvo en Colombia para la celebración del sesquicentenario de su nacimiento en el 2015, organizada por la Facultad de Ingeniería, el Observatorio Astronómico y la Academia Colombiana de Ciencias.

Fue, además, catedrático en la Universidad de Cartagena y la Universidad de Pereira, entre otros claustros privados, en los cuales impartió cursos de matemáticas y física desde los niveles elementales hasta el posgrado, incluidas sus lecciones en álgebra y análisis tensorial, mecánica cuántica relativista, mecánica cuántica avanzada, seminarios de grupos topológicos, fractales, teoría cuántica de campos y de electrodinámica cuántica.

Fue Miembro de la *Société Française d'Histoire des Sciences et des Techniques*, y participó como profesor investigador asociado del equipo *Laboratoire SPHERE: Sciences, Philosophie et Histoire* perteneciente al *Centre National de la Recherche Scientifique de la Universidad Paris 7- Denis Diderot*. Asimismo, fue profesor invitado de la Universidad Nacional de Colombia y de la *Università degli Studi di Roma "La Sapienza"*, en Italia, y miembro del Grupo de Historia y Filosofía de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Autor de obras de suma importancia, su producción abarcó más de 40 años continuos de trabajo que se reflejan en un sinnúmero de artículos, ponencias y simposios en distintos claustros universitarios. Destacamos el *Tomo VI - La Física en Colombia y su Filosofía*, texto que forma parte de los nueve volúmenes de la *Historia Social de la Ciencia en Colombia* publicada por Colciencias en 1993; también es el autor del libro *Álgebra multilineal real y compleja* editado por la Universidad de Antioquia en el 2006. Dejó muy avanzada una biografía intelectual de Garavito, más de 700 páginas, tarea que culminaremos con el compromiso que habíamos adquirido para su publicación en la Universidad Nacional de Colombia.

Con motivo de su defunción distintas instituciones en Colombia enaltecen las contribuciones del profesor Regino Martínez-Chavanz a la formación de incontables profesionales y sus alumnos y colegas reconocen con especial afecto la trascendencia de sus conocimientos y sus aportes a la historia de la ciencia en Colombia. La comunidad académica lamenta profundamente su partida con la certeza de que su memoria vivirá por siempre.

**Mario Armando Higuera, Santiago Vargas, Alejandro Jiménez,
Lady Johana González, Juanita Ariza, Clara Helena Sánchez**

Grupo Patrimonio OAN, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia

Comentario bibliográfico

Los editores del *Emerging Infectious Diseases Journal* (EID) la revista del CDC de Atlanta, en su portada de junio de este año recordaron los 40 años del inicio de la pandemia del sida.

Por considerarlo de interés para nuestros lectores y con la debida autorización, reproducimos el comentario Sobre la portada titulado, *Fluid Motion and Frozen Time*. La referencia completa es: **Breedlove, B.** (2021). Fluid Motion and Frozen Time. *Emerging Infectious Diseases*, 27 (6): 1762-1763. <https://doi.org/10.3201/eid2706.ac2706>.

Byron Breedlove autor del artículo y *Managing Editor* del EID otorgó el permiso correspondiente.

ABOUT THE COVER



Thomas Red Owl Haukaas (1950–). *More Time Expected*, 2002. Hand-made ink and pencil on antique ledger paper, 16.5 in × 27.5 in/41.9 cm × 69.9 cm. Tacoma Art Museum, 1701 Pacific Avenue, Tacoma, WA 98402, United States. Gift of Greg Kucera and Larry Yocoreem in honor of Rock Hushka.

Fluid Motion and Frozen Time

Byron Breedlove

In June 1981, five cases of *Pneumocystis pneumonia* in gay men were described in CDC's *Morbidity and Mortality Weekly Report*. Those cases signaled the start of the AIDS pandemic, which now enters its fifth decade and has to date resulted in more than 75 million HIV infections and 32 million deaths worldwide. UNAIDS estimates that in 2019, 38 million persons were living with HIV, 1.7 million became newly infected, and 690,000 died with HIV disease.

Since the beginning of the HIV/AIDS pandemic, artists—some involved in AIDS activist organizations

and others working independently—have applied their talents and skills to create, share, and deliver works that depict messages calling for political action and scientific research, documenting the impact of AIDS among various and diverse communities and groups, and celebrating medical breakthroughs and advances in treating AIDS. In 2016, a traveling exhibition entitled *Art AIDS America* examined the ongoing influence and impact of the AIDS pandemic on American art.

Among the more than 125 works featured in that traveling exhibition was *More Time Expected* by Lakota artist Thomas Red Owl Haukaas, displayed on this month's cover. Haukaas conveys both a sense of fluid motion and frozen time in this image, a modern example of Native American ledger art (a genre of

Author affiliation: Centers for Disease Control and Prevention, Atlanta, Georgia, USA

DOI: <https://doi.org/10.3201/eid2706.AC2706>

narrative drawing or painting on paper or cloth) that developed during the Indian Wars era and continued in the forced relocations of Plains tribes to government reservations from the 1860s through the 1920s. Widespread hunting had depleted buffalo and other game animals that provided hides the tribes traditionally used as canvases for recording events, ceremonies, and exploits. As a result, Native Americans began using paper taken from ledgers and other sources and employing ink, pencils, and watercolors rather than bone or wooden implements dipped in mineral and other natural pigments.

In this work, Haukaas shows a group of Native Americans and horses sweeping from right to left across the paper. The figures and horses are crowded, flattened, and overlapping each other. Riders and horses are looking straight ahead and moving in unison toward a destination beyond the edge of the image. The artist carefully depicts his figures of Native Americans dressed in traditional garb and wearing an array of bright colors and patterns. The horses are also stylized and individualized: many are boldly colored, and others are sketched with repeating patterns and rows of stripes. Half of the horses carry either a single rider or a pair of riders, but the other half are riderless, including the cobalt blue horse that draws attention to the center of the image.

Michelle Reynolds, Associate Director of Marketing and Communications at the Tacoma Art Museum, which organized *Art AIDS America* in partnership with the Bronx Museum of the Arts, explains how this work is related to HIV/AIDS: "The imagery, specifically the riderless horse, explores the complicated issues of stigma surrounding HIV/AIDS and the Native American experience with the disease. Historically, instances of HIV on the reservation are virtually unmentioned, a silence that only worsens an already high rate of infection. The horse with no rider, often used as a symbol for a warrior who fell in battle, represents individuals on the reservation who have died of AIDS-related causes. By focusing on absence within a group, Haukaas plays to the importance of community and families within these settings."

In a 2018 interview, Haukaas told writer and editor Emily Withnall, "My pieces are meant for dialogue, for discussion, for thinking about." Despite the fluidity and motion of his work, the underlying message carried by his portrayal of these riderless horses is the palpable sense of what has been lost. Haukaas, whose works are featured in many museum collections and have been part of numerous exhibitions, does not have formal training in

art, and he credits his family and friends for teaching him traditional skills and practices. Known for his talents as a ledger, beadwork, and doll artist, he trained as a psychiatrist.

Through this image, Haukaas reconnects with the traditional ledger art form and uses it as a platform to engender thought and discussion about the ongoing medical and social effects of HIV within reservation communities, throughout other marginalized racial and ethnic communities around the world, and in those regions most affected by this ongoing pandemic. As De Cock, Jaffe, and Curran state in their EID article *Reflections on 40 Years of AIDS*, "Although initially slow, the HIV/AIDS response over the years has been a beacon in global health for respect for individuals and their rights and for health equity. More reflection is required with regard to what the responses to HIV and Ebola have taught us and how they might be relevant to COVID-19 and other future epidemics."

Bibliography

1. Bronx Museum of Art. *Art AIDS America* [cited 2021 Apr 14]. <http://www.bronxmuseum.org/exhibitions/art-aids-america>
2. Centers for Disease Control (CDC). *Pneumocystis pneumonia*—Los Angeles. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep.* 1981;30:250-2.
3. Crimp D. Introduction. *AIDS: cultural analysis/cultural activism.* *JSTOR.* 1987;43:3-16. <https://doi.org/10.2307/3397562>
4. De Cock KM, Jaffe HW, Curran JW. Reflections on 40 years of AIDS. *Emerg Infect Dis.* 2021;27:1553-60. https://www.cdc.gov/eid/article/27/6/21-0284_article
5. Department of Ethnic Studies, University of California San Diego. Plains Indian ledger art: ledger art history [cited 2021 Apr 23]. <https://plainsledgerart.org/history>
6. Milwaukee Public Museum. The ledger art collection [cited 2021 Apr 23]. <https://www.mpm.edu/research-collections/anthropology/online-collections-research/ledger-art-collection>
7. Reynolds M. Object of the Week—"More Time Expected" [cited 2021 Apr 14]. <https://www.tacomaartmuseum.org/tamblog-object-of-the-week-more-time-expected>
8. Smithsonian Institution, National Museum of American History, Albert H. Small Documents Gallery. Keeping history: Plains Indian ledger drawings [cited 2021 May 11]. https://americanhistory.si.edu/documentgallery/exhibitions/ledger_drawing_2.html
9. The Joint United Nations Programme on HIV/AIDS. UNAIDS data. 2020 [cited 2021 Apr 20]. https://www.unaids.org/sites/default/files/media_asset/2020_aids-data-book_en.pdf
10. Withnall E. Dance of the monarch [cited 2021 Apr 20]. <https://www.elpalacio.org/2018/09/dance-of-the-monarch>

Address for correspondence: Byron Breedlove, EID Journal, Centers for Disease Control and Prevention, 1600 Clifton Rd NE, Mailstop H16-2, Atlanta, GA 30329-4027, USA; email: wbb1@cdc.gov

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.raccefyn.co) allows free and open access to full-text articles with the purpose of contributing to the visibility, access and dissemination of Colombian scientific production.

The first issue was published in December 1936, year of the official creation of the National Academy, led by Jorge Álvarez Lleras. The journal has been edited 41 volumes since then.

Peer Review Process

Manuscripts that meet the author guidelines are welcomed. Manuscripts will be assessed by the editor in chief and associate editors' expert in the topic of the manuscript.

If the editors see fit, the manuscript will be sent to, at least, two peers knowledgeable in the topic of the manuscript. It is estimated the peer reviewing process will take around 90 days.

The reviewers can decide to a) accept the article without any modification, b) accept it if some recommendations are addressed, or c) reject the manuscript. If peers exhibit contradicting assessments, an extra reviewer will be approached to settle disparities and reach a final decision.

The corresponding author will be notified of the results of the peer review process. The author should return an amended version, along with a documenting reporting the response to the reviewers, four weeks after receiving the results of the reviewers.

If the author does not send these documents past the suggested time, the journal will assume the manuscript has been withdrawn. If the author send these documents past the suggested time, the journal takes the manuscript as a new submission and the reviewing process starts anew.

Accepted manuscripts are considered property of the journal. Thus, the journal is free to reproduce an entire manuscript or parts of it.

The journal is not responsible of the contents of the published manuscripts and related legal implications.

Publication Ethics and Publication Malpractice Statement

The journal abides by the *Committee on Publication Ethics* (COPE) standards. These guidelines can be consulted in the following links:

COPE guidelines on good publication practice: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct: <https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

See document pdf (annex)

Open access policy

The journal enables open access to published articles via its website (www.raccefyn.co) to contribute to the dissemination, accessibility, and visibility of scientific work.

Author Guidelines

Research articles. A manuscript documenting the results of at least one experiment/study by following the following structure: introductions, methodology, results, discussion, conclusions, and references. Extra material can be reported as an appendix.

Brief articles. Manuscripts reporting the results of novel experiments/study in a succinct manner and that require prompt diffusion.

Inaugural articles or Review articles. Manuscripts reporting literature reviews on a topic. It is one requirement for the Academics to be admitted to the Academy

Letters to the editor. Manuscripts proposing critical comments, novel analysis or re-interpretations of published work.

Book reviews. Short manuscripts reporting a review of a book recently published within an area of interest to the journal.

Authors correction

Errata

Information for Authors

Authors should bear in mind the following

1. Submitted manuscripts must be original and of outstanding quality. They can be written in Spanish or English in an area related to the **Exact, Physical or Natural Sciences**. All works accepted will remain permanent property of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences so that such work can be published in hard copy or in electronic format, including web posting. (See transference of authors' rights).
2. The corresponding author will be required to state that the work is original, has not been published elsewhere, is not under review elsewhere and that co-authors agree as to the version submitted. Equally important, the corresponding author will be asked to state whether copyrights have been passed on to other parties. (See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
3. It is assumed all listed authors have contributed substantially to the manuscript. Their order in the manuscript should be reached by agreement. Finally, each author's contribution should be explicitly stated. Collaborators whose contribution was not substantial (see above) should be mentioned in the 'acknowledgments' section (see <http://www.icmje.org/> for a reference). Financial supports and grants should also be mentioned in this section.
4. The terminology used in the manuscript should follow that used in specific areas (we therefore recommend authors to consult specialised references in this regards as to their own fields of research). Scientific names should follow recommendations such as those stated, for example, by the International Code of Botanical Nomenclature and the International Committee on Systematics of Prokaryotes.

Submission and Presentation of manuscript

The manuscripts should be submitted using the website of the Academy: <http://www.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.



