



ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

Estamos en **Scopus**[®]

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

Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 43 • Número 166 • Págs. 1-156 • Enero-Marzo de 2019 • Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editora

- Elizabeth Castañeda, Ph. D.
Instituto Nacional de Salud,
Bogotá, Colombia

Editores asociados

Ciencias Biomédicas

- Luis Fernando García, M.D., M.Sc.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- Gustavo Adolfo Vallejo, Ph. D.
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia
- Luis Caraballo, Ph. D.
Universidad de Cartagena, Cartagena, 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, B.Sc., Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Ciencias del Comportamiento

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

- Fernando Marmolejo-Ramos, Ph. D.
Universidad de Adelaide, Adelaide, Australia

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

Ciencias Naturales

- 10 José Luis Fernández Alonso, Doctor
Real Jardín Botánico, Consejo Superior de
Investigaciones Científicas, Madrid, España
- 10 Jaime Cantera, Doctorat d'Etat
Universidad del Valle, Cali, Colombia
- 10 Gabriel Roldán, Dr. rer. nat.
Universidad Católica de Oriente,
Rionegro, Antioquia, Colombia
- 10 Sandra Baena Garzón, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia
- 10 Néstor Hernando Campos Campos, Dr. rer. nat.
Universidad Nacional de Colombia,
Sede Caribe, Colombia
- 10 Martha Patricia Ramírez Pinilla, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia
- 10 Jairo Castaño-Zapata, Ph. D.
Universidad de Caldas, Manizales, Colombia
- Juan Manuel Díaz Merlano, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia
- 10 Gerardo A. Aymard C, Ph. D.
Universidad Nacional de los Llanos Ezequiel
Zamora, Venezuela
- 10 Néstor Julio García, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia
- Jorge Jácome, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia
- 10 Arturo Acero, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Santa Marta, Colombia

Ciencias Químicas

- 10 Sonia Moreno Guaqueta, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Moisés Wasserman Lerner, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

- 10 Myriam Sánchez de Gómez, M.Sc.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

- 10 Fernando Martínez, Docteur en Chimie
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia

- 10 Luis Fernando Echeverry, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Ciencias de la tierra

- 10 Germán Poveda Jaramillo, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Medellín, Colombia

- 10 Carlos Alberto Vargas, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

- 10 Carlos Alberto Jaramillo Muñoz, Ph. D.
Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá

- 10 José Daniel Pabón, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Matemáticas

Jorge Ivan Cossio Betancur, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Medellín, Colombia

- 10 Luis Español González, Doctor
Universidad de la Rioja, España

Jaime Ignacio Lesmes Camacho, Dr. phil. nat.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

- 10 Luis Carlos Arboleda, Doctor
Universidad del Valle, Cali, Colombia

- 10 Alf Onshuus, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Comité científico internacional

10 Ángela María Guzmán, Ph. D.
University of Central Florida,
Orlando, Estados Unidos

10 Antoine M. Cleef, Ph. D.
University of Amsterdam,
The Netherlands

Rodolfo Castillo, Ph. D.
Fort Lauderdale, Florida, USA

10 Carlos Jiménez, Ph. D.
Universidad de La Coruña, España

Gioconda San Blas, Ph. D.
Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas
y Naturales, Caracas, Venezuela

10 Alfonso Castro, Ph. D.
Harvey Mudd College, Claremont, CA,
USA

10 José Rubens Pirani, Ph. D.
Universidade de São Paulo, Brasil

10 Wolfgang Gieren, Ph. D.
Universidad de Concepción, Chile

10 Pedro Joseph Natham, Ph. D.
Centro de Investigación y de
Estudios Avanzados, Instituto
Politécnico Nacional, México

Asistencia y coordinación editorial
Carolina Acosta

Corrección de estilo y ortografía
Marta Renza

Diseño y diagramación
Johanna Morales

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 2016), categoría B

Periodicidad: trimestral
Fecha de inicio: 1936
Tamaño: 21,5 x 28 cm
Papel: propalmate de 90 gr.
Solicitud de canje

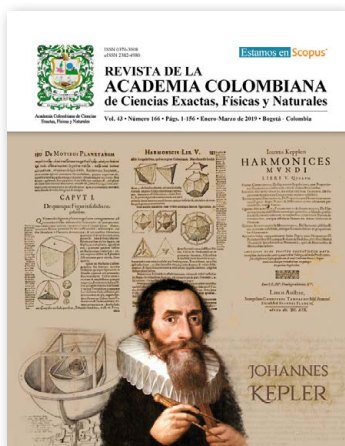
Esta publicación se ha financiado mediante la transferencia de recursos del Gobierno Nacional a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

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.

Impreso en Colombia



Portada

Los 400 años del *Harmonices Mvndi*

Las tres imágenes de la parte superior son originales de la obra de los 400 años *Harmonices Mvndi* de M.DC.XIX: las figuras geométricas de las que parte Kepler para su modelo del universo y la portada del *Harmonices Mvndi*.

Las imágenes de la parte inferior muestran el retrato de Kepler de 1610 y el modelo del universo ensamblado con esferas entre las cuales se insertan los sólidos de Platón, la idea de Dios para crear el Universo según Kepler, es el modelo de la obra *Misterio Cosmográfico* de 1596. Ya para 1619 es algo antiguo, porque Kepler descubrió en 1609 que las órbitas de los planetas no son circulares, sino elípticas. Pero mantiene hasta el final de su vida la idea de los sólidos que aparecen en la página justo en el centro de la serie de arriba, de 1619.



ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

Estamos en **Scopus**

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

Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 43 • Número 166 • Págs. 1-156 • Enero-Marzo de 2019 • Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Editorial	400 años del <i>Harmonices Mvndi</i> de Johannes Kepler 400 years of <i>Harmonices Mvndi</i> by Johannes Kepler <i>Bernardo Gómez Moreno</i> 6
Nota de la editora	“Estamos en Scopus” “Now in Scopus” <i>Elizabeth Castañeda</i> 9
Ciencias del Comportamiento Behavioral Sciences	Etnografía del productor araucano de la sabana inundable, Colombia AO Ethnography of the Araucanian producer of the flooded savannah, Colombia <i>Luis Ernesto Rodríguez-Qüenza, Alonso Correa-Toro, Milena Hernández-Rodríguez, Arcesio Salamanca C.</i> 10
Ciencias Físicas Physical Sciences	Fabrication of solar cells based on Cu_2ZnSnS_4 films grown with optimized chemical composition homogeneity OA Fabricación de celdas solares basadas en películas de Cu_2ZnSnS_4 crecidas con homogeneidad de composición química optimizada <i>Gerardo Gordillo, Clara Calderón, Robinson Moreno</i> 17
	Orbital dynamics in realistic galaxy models: NGC 3726, NGC 3877 and NGC 4010 OA Dinámica orbital en modelos realistas de galáxias: NGC 3726, NGC 3877 y NGC 4010 <i>Fredy L. Dubeibe, Sandra M. Martínez-Sicachá, Guillermo A. González</i> 24
	Determinación de la velocidad de traslación del vórtice anular mediante expansión multipolar AO Determination of translational velocity of the ring vortex using multipolar expansion <i>Jeasson F. González</i> 31
Ciencias Naturales Natural Sciences	Patrón de actividad diaria y de temperaturas ambientales y microambientales en una población de la lagartija endémica colombiana <i>Anolis huilae</i> (Squamata, Dactyloidae) AO Daily activity pattern and environmental and microenvironmental temperatures in a population of the Colombian endemic lizard <i>Anolis huilae</i> (Squamata, Dactyloidae) <i>David Alfonso Bejarano-Bonilla, Manuel Hernando Bernal-Bautista</i> 38
	Aspectos reproductivos y pesqueros de <i>Prochilodus magdalenae</i> Steindachner, 1879 (Characiformes: Prochilodontidae) en la ciénaga de Marriaga, río Atrato, Colombia AO Reproductive aspects and fishery of <i>Prochilodus magdalenae</i> Steindachner, 1879 (Characiformes: Prochilodontidae) in the Marriaga swamp, Atrato River system, Colombia <i>Margarita María Roa-Cubillos, Francisco Antonio Villa-Navarro</i> 44

Valores objeto de conservación del subsistema de áreas protegidas de los Andes occidentales, Colombia AO	
Values of conservation objects in the West Andean protected areas subsystem	
<i>Néstor Javier Roncancio-Duque, Laura Alejandra Vélez Vanegas</i>	52
Aislamientos endofíticos de <i>Colletotrichum</i> spp. a partir de hojas y ramas de mango (<i>Mangifera indica</i> L.) cultivar Azúcar en el municipio de Ciénaga, Magdalena, Colombia AO	
Endophytic isolation of <i>Colletotrichum</i> spp. from the leaves and branches of mango (<i>Mangifera indica</i> L.) cultivar Azúcar in the municipality of Ciénaga, Magdalena, Colombia	
<i>Andrés Quintero-Mercado, Fabio Dangon-Bernier, Alberto Páez-Redondo</i>	65
Determinación de la diversidad genética de la paloma doméstica <i>Columba livia</i> (Columbidae) a partir de genes polimórficos asociados con el color del plumaje en San Antero, Córdoba, Colombia AO	
Determination of the genetic diversity of the domestic pigeon <i>Columba livia</i> (Columbidae) employing polymorphic genes associated with the color of the plumage in San Antero, Córdoba, Colombia	
<i>Adrián Enrique Rodríguez-De La Barrera, Luis Alfonso Causil-Vargas, Orlando Causil-Vargas</i>	78
Mangroves of Colombia revisited in an era of open data, global changes, and socio-political transition: Homage to Heliodoro Sánchez-Páez OA	
Regreso a los manglares de Colombia en una era de datos abiertos, cambios globales y transiciones sociopolíticas: homenaje a Heliodoro Sánchez-Páez	
<i>Juan F. Blanco-Libreros, Ricardo Álvarez-León</i>	84
Aspectos ecológicos de la comunidad fitoperifítica en el río Anchique, cuenca andina colombiana AO	
Ecological aspects of the phytoperiphytic community in the Anchique River, Colombian Andean basin	
<i>Kelly Huertas-Farías, Yessica Tatiana-Parra, Gladys Reinoso</i>	98
Distribución espacial y temporal de Elmidae (Insecta: Coleoptera) y su relación con los parámetros fisicoquímicos en el río Ocoa, Meta, Colombia AO	
Spatial and temporal distribution of Elmidae (Insecta: Coleoptera) and its relationship with physicochemical parameters in the Ocoa river, Meta, Colombia	
<i>Ivonne Alexandra Aguilera-Giraldo, Jesús Manuel Vásquez-Ramos</i>	108
El Niño-Oscilación del Sur, fase Modoki, y sus efectos en la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia AO	
El Niño/Southern Oscillation Modoki and its effects on the spatiotemporal variability of precipitation in Colombia	
<i>Estefanía Navarro-Monterroza, Paola A. Arias, Sara C. Vieira</i>	120
Caracterización de la turbulencia atmosférica en una gran zona verde de una megaciudad andina tropical AO	
Characterization of the atmospheric turbulence in a tropical Andes megacity large urban park	
<i>Edison Y. Ortiz, Rodrigo Jimenez, Gilberto J. Fochesatto, Luis A. Morales-Rincon</i>	133
Enfoque y alcance	
Focus and Scope	146

400 años del *Harmonices Mvndi* de Johannes Kepler

Conmemoramos con la portada de este número de la **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** el cuarto centenario de la publicación de la obra de Johannes Kepler *Harmonices Mvndi*, aparecida en la ciudad austriaca de Linz en 1619. Contiene esta obra la tercera Ley de Kepler, que relaciona el período orbital del planeta en su movimiento en torno al Sol con el tamaño de la órbita y, más detalladamente, presenta que el cuadrado del período orbital dividido por el cubo de la distancia media entre el Sol y el planeta es una constante, igual para todos los planetas del sistema solar, lo que constituye para Kepler una de las armonías del universo, armonía de los mundos.

Con esta tercera ley de Kepler se completan las leyes del movimiento planetario postuladas por él, las cuales dan nacimiento a la física clásica, la física celeste, en el siglo XVII, como ciencia del movimiento. Las dos primeras leyes del movimiento planetario fueron publicadas por Kepler en la *Astronomia Nova* de 1609, obra elaborada en Praga, que presenta el estudio detallado del movimiento de Marte a partir de las tablas astronómicas de Tycho Brahe.

Para Johannes Kepler el *Harmonices Mvndi* es la continuación de su *Mysterivm Cosmographicvm*, publicado en Tubinga en 1596. Estas dos obras constituyen para él una unidad que resume su concepción del universo e integra todos los aspectos fundamentales de la existencia, la unidad de espíritu y el universo físico como creación del Dios matemático, geómetra, puesto que para él la geometría es anterior a la creación, es Dios mismo. Johannes Kepler es un místico que busca conocer la mente de Dios, saber qué idea tuvo Dios como fundamento para crear y dar forma al universo. En sus obras de 1596 y 1619 compendia su imaginario universal.

Kepler es un talento universal extraordinario, que reúne filosofía natural, matemáticas, astronomía, óptica, astrología y teología; es un genio comparable con otros grandes genios descendientes de los suavios, antiguos germanos que habitaban la región de la Selva Negra en el suroeste de Alemania. Allí, muy cerca de Stuttgart, está la pequeña población de Weil der Stadt, donde en 1571 nace Kepler, prematuro, muy débil físicamente, con el aspecto poco agraciado que lo caracterizará toda su vida y un estado de salud que supondrá un permanente sufrimiento y lo convertirá en un ser hipocondríaco, aquejado por múltiples enfermedades y víctima de epidemias como la de viruela, que le afectaría la vista y limitaría progresivamente sus observaciones astronómicas. Kepler vive así, siempre enfermo, 58 años y, finalmente, fallece en Ratisbona, Baviera, en 1630. Al igual que su salud, también su vida familiar estuvo abocada al sufrimiento, en un mundo sacudido por las confrontaciones religiosas de la reforma y la contrarreforma y por las guerras que ello provocó y que afectaron su infancia ante las ausencias de un padre siempre alejado en el frente de batalla de alguna de esas guerras, hasta que los dejó definitivamente cuando Kepler tiene 18 años. Posteriormente, Kepler tuvo que enfrentar otros momentos dolorosos: su madre fue víctima de persecuciones, acusada de brujería en varias ocasiones, por lo que pasó un largo periodo confinada en prisión y murió poco después de ser liberada. Kepler se casó dos veces; su primera esposa y tres de sus cinco hijos de ese primer matrimonio mueren, en tanto que tres de los siete hijos de su segundo matrimonio también fallecen tempranamente. A pesar de todos estos acontecimientos penosos, el desarrollo intelectual de Johannes Kepler es extraordinario, y sus estudios abarcan las artes, las lenguas clásicas, las ciencias sociales, la teología, las matemáticas, la astronomía y la astrología. Su formación universitaria la realiza en la Universidad de Tubinga y, asimismo, en su región natal, en la Selva Negra, cerca de Stuttgart.

A sus 23 años Kepler ya era profesor de matemáticas en la ciudad de Graz, en Austria. Corría el año de 1594 y, según cuentan los autores expertos en Kepler y en su leyenda, en plena clase de matemáticas en esa ciudad, cuando presentaba el problema geométrico de demostrar que las tres alturas de un triángulo equilátero se cruzan en un punto que es el centro del triángulo y en relación de 2 a 1 para cada altura, dibujó en este punto dos círculos, uno de ellos circunscrito al triángulo, de manera que sus tres vértices lo tocaban, en tanto que el segundo quedaba inscrito de forma que cada lado del triángulo era tangencial al círculo, siendo los radios de estos dos círculos los segmentos mayor y menor resultantes del cruce de las alturas del triángulo, razón por la cual quedaban en relación de 2 a 1. Ya dibujados el triángulo y los círculos en el tablero, repentinamente Kepler quedó absorto. En su mente surgió una idea que lo impactaría de por vida: reconoce que los dos círculos presentan un gran parecido con las órbitas de Júpiter y Saturno, órbitas circulares con un radio de 9,5 UA para Saturno y de 5,2 UA para Júpiter, así que la relación es de 10 a 5 UA, aproximadamente, donde UA es una unidad astronómica igual a la distancia del Sol a la Tierra. ¿Sería esta la idea que tuvo Dios cuando creó el universo? ¿La de poner los seis planetas (los conocidos en esa época) en órbita en torno al Sol a distancias dadas por figuras geométricas regulares (de caras iguales), insertadas entre órbita y órbita? Y no figuras planas, como el triángulo equilátero, sino tridimensionales, como los sólidos platónicos, que son solo cinco, justo lo requerido para los cinco espacios que surgen cuando son seis los planetas del universo: un hexaedro

entre Saturno y Júpiter, un tetraedro entre Júpiter y Marte, un dodecaedro entre Marte y la Tierra, un icosaedro entre la Tierra y Venus, y un octaedro entre Venus y Mercurio. Así, Kepler construye el modelo del universo que publica en el *Misterio Cosmográfico* de 1596, modelo que mantiene a lo largo de toda su vida, desde 1595, incluso después de descubrir, en 1609, que las órbitas no son circulares sino elípticas, utilizando la distancia media para cada órbita planetaria a falta del radio de la órbita circular, como lo deja consignado en su obra de 1619, *La armonía de los mundos*.

Para Johannes Kepler conocer la mente de Dios pasaba por entender por qué los planetas eran seis, por qué las distancias de los planetas al Sol eran las que se observaban astronómicamente, y por qué en el movimiento de los planetas en su órbita la distancia del planeta al Sol va cambiando, así como también cambia la velocidad del planeta, más lenta cuando está más distante del Sol y más veloz cuando está más cerca. En Kepler se mezclan misticismo y ciencia: sabe que su modelo del universo debe ser comprobado por la observación directa de la naturaleza y que solo la medición puede validar su modelo. Por esto recurre a los datos de mayor precisión disponibles en su época: las tablas astronómicas de Tycho Brahe, quien durante más de 20 años había registrado las posiciones de los astros, noche a noche, con la ayuda de un gran equipo de colaboradores en los observatorios astronómicos de la isla de Hven en Dinamarca. Es el año de 1600 cuando Kepler contacta a Tycho Brahe, quien se ha trasladado con todo su enorme equipo humano e instrumental de Hven a Praga, donde recibe el apoyo de Rodolfo II, káiser del Sacro Imperio Romano Germánico. Para 1601 Kepler tiene ya los datos de Tycho Brahe, quien le recomienda estudiar con especial atención los de Marte, en los que son más notables pequeños detalles peculiares del movimiento planetario. Es de este análisis de datos, del estudio del movimiento de Marte, que resultan las dos primeras leyes de Kepler: la primera, que el movimiento planetario ocurre en órbitas elípticas en torno al Sol, ubicado en uno de los focos de la elipse, y la segunda, que el radio vector del Sol al planeta barre áreas iguales en tiempos iguales. En 1609, desde Praga, Kepler publica sus resultados en la *Nueva Astronomía*. Y sí que es nueva esta astronomía, porque nunca se había pensado en órbitas elípticas. Hasta ese momento, el movimiento celeste se había concebido como circular, el “movimiento natural en los cielos”, que para un místico como Kepler sería lo obvio, acorde con la perfección de Dios. Por ello resulta paradójico que haya sido precisamente Kepler quien descartara el círculo y, llevado por su rigurosidad científica, matemática, haya visto la necesidad de introducir la elipse, menos divina, como trayectoria planetaria. ¿Acaso la órbita circular es de mejor familia que la trayectoria elíptica? La respuesta resulta grandiosa, porque son de igual familia, la familia de las cónicas, de los cortes cónicos estudiados alrededor del año 200 a.C. por Apolonio de Perge y por Hipatia de Alejandría en el 400 a.C.: el círculo, la elipse, la parábola y la hipérbola. Y son éstas cónicas las posibles trayectorias de los objetos en todo campo gravitacional, cuál de ellas, depende de las condiciones iniciales del movimiento.

Los resultados del estudio del movimiento de Marte reportados en la *Nueva Astronomía* aplican también para los demás planetas. Kepler logra los descubrimientos con el movimiento de Marte, pero reconoce las mismas leyes para los demás planetas, donde los efectos de excentricidad de la elipse son menores, lo que la hacen muy cercana al círculo. Este estudio detallado aplicado a todos los seis planetas le permite a Kepler comparar las características del movimiento de todos ellos y las relaciones de la distancia mínima y la distancia máxima del planeta a Sol, para encontrar así relaciones que concuerdan con las armonías concebidas a partir de la geometría y estudiar las figuras geométricas regulares en dos y tres dimensiones, lo cual constituye el tema central que desarrolla en la *Armonía de los Mundos*.

En la portada de este número de la **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, se reproduce la página de presentación del *Harmonices Mvndi* del año M.DC.XIX. Allí reza que la obra constaba de cinco libros: *Primus Geometricvs; Secundus Architectonicvs; Tertius Harmonicvs; Quartus Metaphysicvs, Psychologicvs & Astrologicvs; Quintus Astronomicvs & Metaphysicvs*. Johannes Kepler, luego de tratar en el primer libro la geometría de las figuras regulares en dos dimensiones, pasa en el segundo libro a la arquitectura, la geometría de los cuerpos sólidos regulares tridimensionales. En estos dos libros enfatiza las relaciones armónicas en las figuras geométricas, y las transfiere a los sonidos musicales, tema que desarrolla en el tercer libro, en el que se revela el fundamento geométrico de las armonías musicales, con lo que se enriquecen los conceptos de armonía iniciados por los antiguos pitagóricos alrededor del año 500 a.C. Luego en el cuarto libro Kepler aplica también estos conceptos de relaciones armoniosas geométricas a las cartas astrales, al movimiento de los planetas con respecto a las constelaciones de las estrellas fijas distantes, introduciendo así las armonías en la astrología. Culmina este desarrollo con el libro quinto, donde descubre las mismas armonías en las relaciones geométricas de las trayectorias de los planetas, relaciones resultantes de las excentricidades de las elipses, las cuales se observan en las distancias mínimas y máximas entre cada planeta y el Sol, así como en el movimiento de cada planeta y la variación de su velocidad a lo largo de la órbita elíptica. Asocia entonces las armonías geométricas del movimiento planetario a las armonías de los sonidos musicales que ha tratado en el tercer libro, para llegar finalmente a la “música de las esferas”, las armonías musicales del movimiento planetario que se nutren de la idea de Dios para la creación universal. Este es Johannes Kepler en todo su esplendor místico, buscando integrar arte, filosofía, ciencia, universo físico y existencia espiritual. Estos aspectos están integrados a lo largo de toda su obra, que por esto resulta difícil de seguir, y exige del lector un gran esfuerzo para descubrir allí dónde están inmersas las tres famosas leyes de Kepler, que tan fácilmente encontramos en los libros de física actuales.

La trascendencia de la obra de Kepler para la ciencia, que adopta las leyes del movimiento planetario despojándolas del misticismo, reside en que contribuyeron de manera esencial a la formulación de la ley de la gravitación universal de Isaac Newton y, así, a la unificación de cielos y tierra, la unificación de las leyes del movimiento en la Tierra de Galileo Galilei con las leyes del movimiento planetario, lo que Newton llama las reglas de Kepler. En la segunda ley de Kepler, Newton reconoce que la fuerza que ejerce el Sol sobre los planetas es central, dirigida a lo largo de la línea de unión entre el Sol y el planeta, y en la tercera ley reconoce que la fuerza gravitacional es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Newton aplica sus tres leyes, entre ellas, por fuerza, la ley de la gravitación universal, y obtiene las órbitas elípticas que siguen los planetas, la ley de las áreas y la relación correcta entre periodo y tamaño de las órbitas, es decir, lo que se concreta en las tres leyes de Kepler. Es así como, observando desde la Tierra el movimiento celeste, nació la física como ciencia del movimiento... *PEDES IN TERRA AD SIDERA VISUM*.

Bernardo Gómez Moreno (Dr.rer.nat.)

Académico de Número, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Profesor Emérito, Universidad de los Andes, Colombia

Referencias

- Kepler J.** (1619). *Harmonices Mvndi*, Linz, Austria. Smithsonian Libraries, Internet Archive. <https://archive.org/details/ioanniskeplerih00kepl/page/n10>
- Kepler J.** (1621). *Mysterivm cosmographicvm*, Frankfurt am Main, Alemania. University of Toronto, Internet Archives. <https://archive.org/details/prodromusdissert00rhti/page/n6>
- Kepler J.** (1621). *Astronomia Nova*, Praga. University of Toronto. <https://archive.org/details/astronomianovaai00kepl/page/n4>
- Caspar M.** (1993). *Kepler*, Internet Archive. Internet Archive <https://archive.org/details/kepler00casp>
- Dreyer J.L.E.** (1953). *A History of Astronomy from Thales to Kepler*, Dover Publications Inc. Internet Archive. <https://archive.org/details/AHistoryOfAstronomyFromThalesToKepler>
- Koestler A.** (1968). *The sleepwalkers: A history of man's changing vision of the universe*, Ed. Penguin. Internet Archive. <https://archive.org/details/org/details/sleepwalkerhisto00koes>

“*Estamos en Scopus*”

En enero de 2019 recibimos la noticia de la inclusión de la **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** en *Scopus* a partir de los números del 2019. *Scopus* es la mayor base de datos internacional de literatura con revisión por pares: revistas científicas, libros y resúmenes de conferencias (<https://www.elsevier.com/solutions/scopus/how-scopus-works>).

Iniciamos el proceso de preparación de la solicitud en el 2014, cuando acepté la honrosa responsabilidad de ser la editora de la **Revista de la Academia**. La solicitud se envió en mayo del 2017. Fueron tres años de un gran trabajo en equipo, para lo cual contamos con el apoyo incondicional del presidente de la Academia, de los miembros de la Junta Directiva, de los académicos y del comité científico internacional, pero, especialmente, del Comité Editorial de lujo con el que hoy cuenta la **Revista**, conformado por 48 editores asociados en las siete disciplinas en las que publicamos: ciencias biomédicas, del comportamiento, físicas, naturales, químicas, de la tierra y matemáticas. Por supuesto, todo lo que hemos construido en estos cinco años contaba con el respaldo de la sólida trayectoria de 78 años de publicación de la **Revista**, testimonio de la labor realizada por sus anteriores editores, entre quienes debo destacar y agradecer al doctor Santiago Díaz Piedrahita, pilar de la publicación durante 17 años de labor ininterrumpida.

La calidad de los artículos publicados, la periodicidad en la publicación de los números y la introducción de nuevos elementos tecnológicos para asegurar y facilitar la publicación han sido producto del esfuerzo de todos: autores, evaluadores, editores y del excelente equipo editorial de apoyo. A todos ellos debo mi reconocimiento y profundo agradecimiento.

En el 2019 se conmemoran una serie de eventos científicos que han tenido un gran impacto en la historia de la ciencia. Por ello, el Comité Editorial decidió celebrar algunos de ellos dedicándoles las cuatro portadas del volumen 43: los 400 años del *Harmonices Mvndi* de Kepler, los 150 años de la tabla periódica de Mendeléyev, los 250 años del nacimiento de Alexander von Humboldt y los 500 años del fallecimiento del universal Leonardo Da Vinci.

También en este 2019 deberemos cumplir con el compromiso de lograr posicionar la **Revista** en uno de los cuartiles superiores de *Scopus*, lo cual exigirá mantener y elevar la calidad de los artículos publicados para garantizar que sean leídos y citados. Dicho compromiso, entonces, incluye el envío de manuscritos de calidad, la continuación de una labor editorial estricta que asegure, entre otros parámetros, la ética de la publicación, la escogencia de pares evaluadores idóneos y el cumplimiento de las fechas fijadas para la publicación. Un nuevo reto será el de aumentar la visibilidad de la **Revista** con campañas de promoción.

En resumen, iniciamos hoy una nueva etapa en el gratificante camino de lograr el reconocimiento de excelencia de la **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**. Agradezco de antemano a todos por el acompañamiento con el que estoy segura contaré.

Elizabeth Castañeda. Ph.D.
Editora

“We are in Scopus”

In January 2019 we were notified that the *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* had been included in Scopus as of this year. *Scopus* is the largest international database of literature subject to pair review: scientific journals, books and conference abstracts (<https://www.elsevier.com/solutions/scopus/how-scopus-works>).

We started the process of requesting our inclusion in 2014 when I accepted the honorable responsibility of being the editor of the Academy's journal. We sent the official request in May 2017. During those three years we displayed an intense teamwork with the unconditional support of the president of the Academy, the members of the Board, the academics, and the international scientific committee but, especially, of the exceptional Editorial Committee of our journal, which is comprised by 48 associated editors in the seven academic fields covered by our publication: biomedical, behavioral, physical, natural, chemical, Earth and mathematical sciences. Naturally, everything we have built in these five years rested on the solid heritage of the journal's 78 uninterrupted years of trajectory, veritable testimony of the work undertaken by its previous editors among whom I must highlight and thank Dr. Santiago Díaz Piedrahita, who was a pillar of the journal during 17 years of dedicated endeavor.

The quality of the articles published, the periodicity of the issues and the introduction of new technological elements to ensure and facilitate our publishing efforts have been the result of the work of all those involved: authors, reviewers, editors, and an excellent editorial team. I owe my sincere thanks and my acknowledgment to all of them.

In 2019, we will commemorate a series of scientific events of great impact on the history of science. In this context, the Editorial Committee of the journal decided to celebrate these anniversaries dedicating the covers of the issues of volume 43 to four of them: the 400 years of Kepler's *Harmonice Mvndo*, the 150 years of Mendeléyev's periodic table, the 250 years of Alexander von Humboldt's birth and the 500 years of the death of the universal Leonardo Da Vinci.

Along this year we will also have to honor our commitment of positioning our journal in one of the top quartiles of *Scopus*, which will demand from us keeping and increasing the quality of the articles we publish to guarantee they are read and cited. Such commitment includes receiving quality manuscripts, continuing with a very strict editorial work to ensure compliance with, among other parameters, publishing ethics, the selection of suitable reviewers and publishing dates. And there is the new challenge of increasing our journal's visibility through promotion campaigns.

In brief, we start today a new stage in the gratifying path of achieving the acknowledgment of the excellence of the *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. I would like to thank in advance all those whose help I will surely count with.

Elizabeth Castañeda. Ph.D.
Editora

Etnografía del productor araucano de la sabana inundable, Colombia

✉ Luis Ernesto Rodríguez-Qüenza¹, Alonso Correa-Toro¹, ✉ Milena Hernández-Rodríguez², ✉ Arcesio Salamanca C.^{2,*}

¹ Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Bogotá, D.C., Colombia

² Grupo de Investigación Los Araucos, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Cooperativa de Colombia, Arauca, Colombia

Resumen

El objetivo del presente artículo fue describir la etnografía del llanero habitante de los municipios de Arauca, Cravo Norte y Puerto Rondón, localizados en las sabanas inundables del departamento de Arauca, Colombia, a partir del enfoque sistémico de los diversos agroecosistemas presentes en ellos, de las formas de vida y la relación con la naturaleza, recurriendo a los conceptos de subjetividad e intersubjetividad de la investigación cualitativa, en un “diálogo de saberes” respaldado por entrevistas semiestructuradas con final abierto hechas a 30 productores, diez por municipio. Se seleccionaron 11 temas que ocupan gran parte de la cotidianidad llanera y que posibilitan la existencia de estos productores, para escucharlos de viva voz con la esperanza de construir propuestas concretas surgidas del sentir “llanero anfibio”. Los entrevistados se clasificaron según el tamaño de sus predios y del inventario ganadero así: grandes productores (más de 1.000 bovinos), productores medianos (500 a 1.000 bovinos) y pequeños productores (menos de 500 bovinos). La información obtenida se interpretó desde las perspectivas subjetiva e intersubjetiva y a partir de allí se construyeron los resultados. El 70 % de los entrevistados eran herederos directos de sus predios, muchos de ellos, fundadores, y solo el 30 % del área total era “banqueada” (nivelada), el resto, baja. Predominaba el ganado cebuino, pero las razas y las sabanas nativas eran también visibles; el 53,3 % de los productores ordeñaban y producían queso artesanal o vendían leche. La economía natural de las explotaciones tradicionales de Arauca y Cravo contrastó con las transformaciones sufridas por los agroecosistemas de los predios de Rondón, más cercanos al dinámico piedemonte. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Sabanas inundables; Sistemas; Conucos; Llaneros; Recursos nativos.

Ethnography of the Araucanian producer of the flooded savannah, Colombia

Abstract

The objective of this article was to describe the ethnography of the inhabitants of Arauca, Cravo Norte, and Puerto Rondón municipalities, located in the flooded savannahs of the Department of Arauca, Colombia, from a systemic approach of the different ecosystems present in them, the prevalent ways of life and the relationship with nature using qualitative research subjectivity and intersubjectivity criteria and open-end semi-structured interviews through a “dialogue of knowledges” with 30 producers, ten per municipality. We selected 11 subjects that are a central part of the “llanero” everyday life and allow for the existence of these producers in an attempt to listen to their voices and in the hope to build concrete proposals arising from the feelings of this “amphibious llanero”. The interviewees were categorized according to the size of their land and their livestock inventory as follows: big producers (more than 1,000 heads of cattle), medium producers (500 to 1,000 heads of cattle), and small producers (less than 500 heads of cattle). We analyzed the information obtained using subjectivity and intersubjectivity criteria and from there, we established the results: 70 % of the interviewees were direct heirs of their lands, many of them, founders. Only 30% of the total area corresponded to leveled land and the rest to low lands. The predominates cattle breed is zebu, but the native creole breeds are now more visible; 53.3% of the interviewees milked cows and produced artisanal cheese. The natural economy of the traditional farms in Arauca and Cravo Norte contrasted with the transformations occurred in the agro-ecosystems of Puerto Rondón municipality, which is closer to the dynamic piedmont areas. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Seasonally flooded savannahs; Systems; *Conucos*; *Llaneros*; Native resources.

*Correspondencia:

Arcesio Salamanca Carreño, asaca_65@yahoo.es; **Recibido:** 30 de agosto de 2018; **Aceptado:** 27 de marzo de 2019; **Editor:** Rubén Airdila

Introducción

El enfoque integral de sistemas de producción contribuye a los fines conservacionistas de salvaguarda del medio ambiente, pues las actividades productivas, por ejemplo la ganadería, en ecosistemas frágiles como los de las sabanas inundables pueden tener impactos insospechados. El enfoque integral es un método de reflexión y análisis que requiere de una observación analítica para conocer la forma en que se desarrollan dichas actividades productivas, así como las particularidades de las explotaciones tradicionales que, como la ganadería de cría, han estado estrechamente vinculadas al uso de la oferta natural, a la comprensión de la dinámica de los ciclos hidrológicos y a la movilidad de los animales en el territorio. Asimismo, este enfoque exige una aproximación integral y la comprensión de los factores determinantes de la producción, incluidos los aspectos culturales y sociales, aspectos que arrojan luz sobre la sostenibilidad de la actividad mediante el análisis de su impacto en la transformación de los territorios por el probable cambio en los usos del suelo. En este sentido, se recurrió a la revisión del enfoque sistémico y de sus aportes para entender mejor la realidad actual de la ganadería araucana y de las oportunidades que brinda para lograr un desarrollo más sustentable que conserve la funcionalidad ecosistémica de este paisaje orinoquense (Peñuela, *et al.*, 2014).

Por otra parte, la teoría general de sistemas se ha convertido en una herramienta útil al propiciar la construcción de modelos útiles en diferentes campos y para evitar el uso de vagas analogías que han afectado el avance en los campos del conocimiento pertinentes. El sistema, o modelo, constituye una herramienta de análisis cuyo valor se aprecia incluso en casos en que no puede alcanzarse una formulación matemática, pues sigue siendo una “idea guía” que orienta el análisis. En el campo de la sociología, por ejemplo, la simple consideración de que las comunidades y organizaciones sociales son sistemas, no sumas de individuos, que se denominan civilizaciones y obedecen a los principios generales de los sistemas, implica una reorientación en sus estudios. Todo organismo vivo es, ante todo, un sistema abierto que incorpora y elimina continuamente materia, constituyendo y demoliendo componentes sin alcanzar, mientras dura la vida, un estado de equilibrio químico y termodinámico que se mantenga uniforme. La esencia del fenómeno fundamental de la vida, el metabolismo, está constituida por los procesos químicos que se verifican dentro de las células vivas. En el mundo real los sistemas son abiertos, es decir, tienen interacción con el ambiente (Hart, 1985). En el estudio de la producción agropecuaria, el enfoque de sistemas permite la integración de diversas disciplinas que, en el análisis de una situación productiva en particular, considere los aspectos biofísicos y socioculturales que configuran el escenario real donde operan los sistemas de producción agrícola (Malagón & Prager, 2001).

Desde la perspectiva de la teoría general de sistemas, se entiende la finca ganadera como un proceso de transformación de energía solar que abarca desde el pasto hasta la carne, la lana o la leche para el consumo humano (Aguilera, 1989; Machado & Campos, 2008; Ospina, 2016), y en el marco del imaginario multidimensional, en la naturaleza todo está interconectado tanto socioeconómica como socioculturalmente. (Jara, 2009). El enfoque integral conecta diferentes elementos, atendiendo a las jerarquías y enfocándose en los procesos (Ospina, 2016). La razón de adoptar esta herramienta es muy simple: hay poca esperanza de entender los procesos agrícolas si se siguen estudiando solamente los detalles. Muchos cultivos se utilizan para la alimentación humana y también para la animal. El sistema tiene una corriente de entrada que importa energía e insumos desde el entorno, los cuales se someten a un proceso de conversión en el que, por el efecto de la sinergia y la recursividad, se transforman y salen como insumos o productos exportados al entorno (Hart, 1985; Johansen, 2004). Por último, desde la perspectiva sistémica, la ganadería en la sabana inundable no puede ser un proceso aislado y, como tal, sus componentes básicos y objetivos productivos deberían entenderse en estrecha dependencia con otros componentes si se quiere alcanzar su éxito y sostenibilidad (Peñuela, *et al.*, 2014). Las transformaciones derivadas de la ocupación humana en la región tienden a restringirse al uso pecuario extensivo de los colonos antiguos en los hatos ganaderos, lo que se combina con la horticultura de conuco (pequeña parcela de tierra), o con la extracción o recolección, actividades más propias de los pueblos indígenas, pero que también se han adaptado a las nuevas condiciones de la cultura de los colonos en el territorio (Baptiste & Ariza, 2008; Baptiste, 2015).

La sabana inundable está ligada a la cultura y la ganadería, constituye un depósito de actitudes, de conocimiento, de comprensión de la región y de valoración y disfrute escénico de los paisajes, con los contrastes propios del invierno y el verano. La cultura llanera resulta de un cúmulo de experiencias y vivencias de gentes que han convivido con el ecosistema durante siglos, encontrando formas de apropiarse del territorio y de vivir en función de su comprensión. La ignorancia en torno a esta cultura llanera y su menosprecio pueden repercutir en la destrucción de muchas comunidades y constituir un obstáculo para mejorar la ganadería (Ocampo & Peñuela, 2014).

Retomando la propuesta antropológica más clásica, la etnografía recurre a un procedimiento metodológico orientado a comprender los “imponderables de la vida real”, esto es, el sentido de la acción y lo que los sujetos realmente hacen en su vida cotidiana. Se fundamenta, como toda metodología cualitativa, en dos paradigmas científicos: el constructivismo y el ‘interpretacionismo’. En los estudios etnográficos los protocolos de investigación suelen ser flexibles, pues no hay planteamientos predefinidos y se espera hasta el momento de contar con los hallazgos del trabajo de

campo. A partir del marco teórico, se establecen “horizontes teóricos” para conocer la complejidad de los fenómenos que son objeto del análisis. Una vez realizado el trabajo de campo, los hallazgos se interpretan teniendo en cuenta sus múltiples relaciones e interpretaciones (Álvarez, 2011; Hammer & Atkinson, 1994).

La subjetividad es la forma de constitución de una realidad social en sus diferentes aspectos: sociales, culturales y políticos, e implica, a la vez, una manera de pensar, sentir, comunicar y dar sentido e intencionalidad a las formas de interactuar y convivir del sujeto en la cotidianidad en la cual se gestan los procesos de interacción cultural. Es así que la subjetividad se expresa en las vivencias propias de cada individuo, como también en las construcciones colectivas generadas en la relación con el otro y lo otro (el contexto) (Álvarez, 2016)

En el presente estudio se plantea como problemática de partida el desconocimiento de la cultura y las costumbres de una población rural que ha permanecido aislada en el tiempo y el espacio, muchas de cuyas impresiones y valoraciones se desconocen, panorama que resulta difícil de aceptar desde la perspectiva de la investigación convencional. Se postula que es improbable alcanzar resultados productivos y técnicos si previamente no se tienen de presente aspectos de la cultura llanera araucana y su entorno ecosistémico. Por ello, el objetivo del estudio fue describir la etnografía del llanero habitante de los municipios de Arauca, Cravo Norte y Puerto Rondón, localizados en las sabanas inundables de Arauca, Colombia, a partir de los planteamientos de la tesis de maestría de Rodríguez (2018)

Materiales y métodos

Área de estudio. El estudio se desarrolló en los municipios de Arauca, Cravo Norte y Puerto Rondón en el departamento de Arauca, Colombia (Gobernación de Arauca, 2012). Inicialmente se procedió a elaborar un marco teórico que permitiera tener referentes útiles para analizar e interpretar la información suministrada, y establecer la finalidad del análisis de sistemas y los conceptos de ecosistema, sistema región, sistema finca y agroecosistema. Asimismo, se hizo una revisión bibliográfica para documentar y describir el ecosistema de sabana inundable, el sistema región y los seis agroecosistemas presentes en la sabana inundable: de caza, pesca y recolección, propios del indígena, conuqueros y de troja, mestizos (cruces del indígena y el blanco), y los pecuarios (porcinos, equinos y bovinos). Por último, se fue acopiando el material etnográfico mediante visitas a los municipios y entrevistas con los habitantes en esos ámbitos. Para sistematizar la información previa, se jerarquizaron los siguientes ejes temáticos: sabanas y cultivos, tipología productiva, pie de cría, manejos del rebaño, nutricional y sanitario, comercialización, uso de mano de obra, abigeato, presencia institucional, infraestructura vial y equipos, y cambio climático y arroz. Una vez transcrita la información recopilada, se procuró hilvanar las interpretaciones

del investigador con las percepciones y puntos de vista de los entrevistados. Los fragmentos de sus intervenciones se resaltan con letra cursiva en el texto del manuscrito; sin embargo, dado que el análisis etnográfico sugiere el diálogo y la posibilidad de múltiples interpretaciones, en el anexo los interesados podrán encontrar el conjunto de las entrevistas y algún material filmico.

Selección de las unidades de análisis y obtención de la información. Las personas entrevistadas se seleccionaron, en su mayoría, de la lista de ganaderos integrantes del Proyecto Bovino Arauca (PBA, 2015), aunque no se contempló exclusivamente esa condición. Se procuró hacer una selección según la disponibilidad de los productores y apelando a un conocimiento previo de sus nociones de la región. Se seleccionaron 30 productores, diez por cada municipio, y se los invitó a “un diálogo de saberes”, en el ánimo de construir conocimiento con la participación de las comunidades y el aporte de sus vivencias y experiencias en torno a aspectos inherentes a su realidad cotidiana y a sus percepciones de lo que viven en el llano. A cada productor se le hizo una entrevista semiestructurada con final abierto (Hammer & Wildavsky, 1990; Álvarez, 2011), que contenía 11 temas, para escuchar de viva voz sus propuestas concretas, surgidas del sentir “llanero anfibio”, sobre los 11 ejes temáticos seleccionados.

La información se recolectó con la ayuda de video grabadora, cámara fotográfica y libreta de apuntes, describiendo y explicando detalladamente todos los posibles pormenores y fenómenos que arrojaran luz sobre las problemáticas del llanero. Los entrevistadores emplearon un lenguaje sencillo que respetaba la semántica llanera, buscando interesar al entrevistado. Los entrevistados se clasificaron según el tamaño del predio y el inventario ganadero en grandes productores (más de 1.000 bovinos), medianos productores (500 a 1.000 bovinos) y pequeños productores (menos de 500 bovinos) (Fedegán, 2014, 2016).

A cada ganadero se le asignó un número de entrevistado, con el nombre y el área del predio, la vereda, y el censo ganadero expresado en número de cabezas de ganado, y otras variables. A partir de esta información, y buscando dar cuenta de la subjetividad y la intersubjetividad del llanero de las sabanas inundables de Arauca, se interpretaron los datos y las observaciones provenientes de las entrevistas, y con ello se hizo la construcción de los resultados del presente estudio etnográfico del llanero araucano. Ante la necesidad de fundamentar el concepto del “otro sujeto”, superando la oposición de los términos objetivo y subjetivo, se hizo preciso el empleo de la intersubjetividad, de manera que el estudio cumpliera con la condición de ser un producto social inseparable de la cultura llanera.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos a partir de los diálogos y encuentros con los 30 productores entrevistados, los cuales se registraron, como ya se mencionó, con videograbadora,

material fotográfico y libreta de apuntes, arrojaron luces sobre el origen de los hatos y fundos araucanos. Se encontró que el 70 % eran herederos directos de sus predios, y muchos de ellos, fundadores. Los antecesores, ya fallecidos, habían sido, en su mayoría, “fundadores de hato” que encontraron tierras sin títulos, sin habilitación y sin ganados, o, en su defecto, herederos de personas que transmitieron sucesivamente bienes, ganados marcados y “derechos” a sus hijos y nietos, hasta alcanzar recientemente la legitimidad jurídica. Hasta hace muy poco, se legaba y “transfería” de palabra. La cultura y las costumbres de la tierra también eran derechos que se transmitían en el intento de ser llanero. Esto denota la reciente y aun incompleta conformación regional, resultado del mestizaje logrado de generación en generación, que, en ocasiones, alcanza un tercer o un cuarto grado. La evocación frecuente de “*cuando los ancestros se fundaron*”, es algo recurrente en la memoria regional, lo que permite calcular la edad del llanero araucano, con cerca de 230 años de convivencia con el territorio.

Desde esos orígenes, la bicentenaria cultura llanera convive con un ecosistema natural, el cual sus exponentes han intentado domar paulatinamente o al que se adaptan y someten en la medida en que la naturaleza lo permite, cediendo hasta contar con las condiciones mínimas necesarias para la subsistencia y la seguridad alimentaria; en ocasiones, intentan aprovechar el excedente de alguno de los agroecosistemas que logran posicionar, como sucedió en el siglo antepasado con la ganadería bovina y la ternera a la llanera (o mamona llanera), la cual se vio realzada por la impronta de la gesta patriótica que también reclamó del hombre sabanero lo que el entorno exigía: el caballo y el ser llanero. La alianza entre el hombre y el caballo permitió dominar a las reses y convertirlas en el pilar fundamental de su economía.

Las entrevistas evidenciaron aspectos muy particulares, por ejemplo, la persistencia de una ganadería extensiva tradicional que, a diferencia de lo que sucede en otras regiones, no es provista o renovada a partir de las fincas y hatos: los predios no son ocupados y desocupados, como ocurre siempre. Por el contrario, los hatos son heredados con la tierra, van en las sucesiones, pasando de generación en generación, y por ello permanecen intactos muchos aspectos de las especies involucradas, conservando sus particularidades ancestrales, lo que las hace únicas. Una verdadera cultura del ganado que se hereda con todo lo que hay dentro.

El escaso conocimiento que se tiene sobre la producción pecuaria en la sabana inundable, principalmente en la academia, conduce a juicios exageradamente críticos y sesgados, pues sin conocerla, ni siquiera someramente, se califica a buena parte de los llaneros de latifundistas, hecho que no corresponde a la realidad, al ignorar que solo 30 de cada 100 hectáreas de terreno pertenecen a la unidad fisiográfica de bancos y banquetas, o áreas bien drenadas, correspondientes al terreno apto para el establecimiento de

cultivos, como no sean los de arroz intensivo que ocupan toda el área, con las características típicas del monocultivo: destructivo, extractivo y voraz con la sabana. Esto no significa que este 30 % de área “banqueada” se emplee en su totalidad para los cultivos, pues el conuco sabanero, que es el agroecosistema de cultivo sabanero por excelencia, ocupa apenas un pequeño porcentaje de ese banco, y su finalidad es la subsistencia. Al acopiar toda la información suministrada, se encontró que los 30 productores reunían un área total de unas 66.899 hectáreas, cuya legalización no ha sido del todo formalizada pese a haber tenido dominio sobre ellas durante más de cien años en algunos casos, lo cual confirma lo dicho sobre el manejo tradicional y la cultura llanera. En general, podría decirse que apenas 20.000 de las cerca de 67.000 hectáreas consideradas eran bancos, es decir, cerca del 30 %, tal y como lo afirmaron los productores. Guardando las mismas proporciones, se diría que en las 1.500.000 hectáreas que conforman la sabana inundable del departamento de Arauca, hay solamente 500.000 hectáreas en bancos, aproximadamente. “*El resto es puro bajo*”, se oye repetir a los productores describiendo las características fisiográficas de sus predios.

En cuanto al inventario ganadero de los 30 entrevistados, que alcanzaba un total de 20.717 cabezas, si estas se distribuyeran en las 67.000 hectáreas, se encontraría una carga animal promedio de 0,3 cabezas por hectárea o, a la inversa, de 3,22 hectáreas por cabeza, lo que en el sistema convencional de producción bovina resulta extremadamente bajo e ineficiente. Por supuesto, dicha aseveración ignora que en la sabana nativa interactúan, por lo menos, seis agroecosistemas completamente interrelacionados e interdependientes en sistemas de pastoreo extensivo tradicional, además de la rica y abundante fauna nativa, que también ocupa el mismo espacio territorial.

La carga animal es una medida inconveniente para evaluar la productividad en la sabana inundable, pues no tiene en cuenta consideraciones muy particulares más valiosas que el criterio exclusivo de la producción bovina. En este sentido, uno de los entrevistados hizo el siguiente comentario: “*Las cargas animales cambiaron. Ahorita queremos meterle a la sabana 1,5 y hasta 2 UGG por hectárea, y quién sabe cuántos animales por hectárea, y realmente la sabana produce, pero no se puede en cualquier pastura. Lo que hay que manejar en las pasturas son las cargas. Uno no puede apretar en carga, y menos la sabana porque ella es frágil. La sabana no se puede estrechar tanto con animales y con carga. La sabana hay que trabajarla al flujo que ella misma va dando*” (Rodríguez, 2018). Esta observación hace referencia a la complejidad y la transversalidad del ecosistema anfibio llanero. Por lo tanto, el manejo en estos casos debe ir acompañado de una gran dosis de prudencia y comprensión, sobre todo de la cultura llanera ancestral, que, muchas veces, es la mejor opción, a pesar del bajo nivel tecnológico de la producción tradicional, el cual se ha clasificado como bajo y muy bajo para los hatos y fundos

caracterizados por ser extensos y distantes de las cabeceras municipales y de las principales vías de acceso, lo que imposibilita la introducción de la tecnología, los equipos y la infraestructura necesarias para transformar la producción, y los animales de razas mejoradas o especializadas. Por ello, se ha optado por lo nativo, elección que ayuda a esclarecer el porqué de la vigencia de estos sistemas tradicionales que, no obstante, ya se enfrentan a la modernización y al riesgo de extinguirse.

Los niveles tecnológicos medio, alto, muy alto y óptimo se registran en situaciones particulares en las que las fincas y fundos tienen una cercanía relativa a los centros urbanos o a las vías principales y, por ende, acceso a mejores posibilidades tecnológicas, instalaciones y equipos, y al manejo de herramientas más sofisticadas, con lo cual las prácticas tradicionales desaparecen o son reemplazadas, al igual que las especies y razas autóctonas, sustituidas por las especializadas modernas y más eficientes. En cuanto a los ingresos económicos y otras entradas adicionales de los productores, el análisis comprende desde el hato primitivo como único sustento, desde sus albores hasta hoy, cuando se impone paulatinamente la tercerización de la economía. En este sentido, se pudo establecer que solo cinco productores dependían de la ganadería como única fuente de ingresos: tres de Cravo Norte, uno de Arauca y uno de Rondón, en tanto que las actividades complementarias de comercio y empleo fueron reportadas por 24 de los 30 productores, lo que significa que su presencia en el predio es temporal y el desplazamiento a los sitios de trabajo es una constante determinada por la necesidad de conseguir ingresos adicionales. La actividad política es también complementaria y, de hecho, se enmarca dentro de la economía terciaria. Dos de los entrevistados han incursionado en la política y por esa razón merecerían un análisis más detallado.

Por último, actividades como el arriendo parcial del predio para el cultivo del arroz son una realidad que puede ir en aumento en la medida en que se deterioren las condiciones económicas de los ganaderos, lo que debería ser objeto de estudio para buscar los mecanismos que consigan mantenerlos en su trabajo pecuario sin la presión de tener que arrendar su tierra a cualquier precio para un cultivo tan agresivo como el del arroz industrial, que sucede por la falta de oportunidades para el productor. Según el ingreso percibido por los productores, se analizaron las obligaciones que debe atender, entre ellas, la manutención y el sustento de casas y familias. En este sentido, la filosofía del hato se resumiría en la máxima de que cuanto más se gana más se gasta, ya que 11 fundos atendían las demandas de un pie de cría cercano a las 10.000 reses, en tanto que los nueve pequeños productores de Cravo Norte y Puerto Rondón, de economía familiar, solo atendían su predio. Entre estos dos extremos se sitúan los demás productores, que respondían por dos o tres casas, incluidas las casas de habitación urbana.

En cuanto a la tipología productiva, se encontró que las actividades más frecuentes eran la cría, el levante y el ordeño ya fuera para la elaboración de queso o para la leche; 16

de los 30 productores hacían el ordeño de manera artesanal para la producción de queso o la venta ocasional de leche, cuya comercialización se hacía también de forma artesanal, enfrentando a diario la competencia multinacional y los bajos precios característicos de la producción industrial. A pesar de tanta adversidad, los productores podrían acomodarse al mercado que prefiere el consumo de estos productos naturales. Se concluyó, asimismo, que las razas especializadas han estado desplazando a la nativa, lo que obliga al productor a ser más eficiente y a dedicarse a otras actividades además de la cría y el levante. La ceba en la sabana es una actividad complementaria que paulatinamente se ha ido posicionando, como en el caso de Rondón, en donde los productores se han visto obligados a utilizar pastos introducidos, a mecanizar la explotación del suelo, a utilizar sistemas de cerca eléctrica y rotación, elementos que en Cravo Norte no se conocen y en Arauca están ya comenzando a masificarse para contrarrestar la distancia del gran mercado, es decir, Bogotá y las grandes ciudades, transformaciones introducidas por la presión que ejerce Tame, el municipio del piedemonte más cercano a Puerto Rondón. A medida en que uno se adentra en la sabana, se hace menos frecuente el uso de estas ayudas tecnológicas y es menor el desarrollo económico. Asimismo, como parte de la visión sistémica propuesta para el análisis de la sabana inundable, se constató el uso de especies introducidas, cuyo comportamiento se mencionó en párrafos anteriores para explicar las razones de la desaparición de los recursos genéticos autóctonos y el predominio del ganado cebú que se ha extendido progresivamente en la sabana.

En cuanto a la venta de ganado en pie, se suele llevar a cabo la venta “al ojo”, pues 17 de los 30 productores entrevistados dijeron que hasta hacía muy poco así vendían sus animales. Esto implica la renuncia al cálculo matemático de pesos y medidas, muchas veces por no contar con equipo adecuado como romanas y básculas, relativamente fáciles de conseguir en el mercado actual. El total de los productores de Cravo Norte vendían sus animales al ojo, mientras que en Arauca, lo habían hecho cinco de los 11 entrevistados, y en Puerto Rondón solo uno. Sin lugar a dudas, esto significa un gran atraso tecnológico y una muy limitada comercialización, pero, además, la existencia una cultura arraigada a las costumbres en donde campea la informalidad y el desconocimiento de los recursos con que se cuenta en los predios, estimulada también por la falta de precios favorables, lo que no estimula el mejoramiento ni una mayor eficiencia de la producción.

La distancia del predio al poblado más cercano, última variable de análisis, permite referirse al nivel de desarrollo de los fundos, hatos o fincas, entendiéndose este como la evolución progresiva de la economía hacia mejores niveles de vida. En este contexto, la relación entre el predio y la distancia es inversamente proporcional: a mayor distancia, menor nivel de desarrollo del predio. En este mismo sentido debe considerarse el comportamiento centrífugo del

desarrollo, cuyo epicentro es la gran ciudad, es decir, Bogotá, con su mercado y su dinámica económica, que se desplazan organizadamente por el espacio territorial hacia el extremo oriental del país, atravesando Tunja y Sogamoso (Boyacá), luego Yopal y Corozal (Casanare), para cubrir después Tame y Puerto Rondón y seguir de forma paralela al río Casanare hacia el oriente (departamento de Arauca) y, en esa misma dirección, desde Saravena y Arauquita, al occidente del departamento, en sentido paralelo al río Arauca, hasta arribar finalmente a la capital Arauca y, por último, a Cravo Norte, al suroriente, y nuevamente hacia Casanare, aumentando la distancia y disminuyendo la dinámica económica y el desarrollo, el tamaño y la cantidad de las vías de acceso, lo que aleja el mercado, y las posibilidades que este brinda.

Conclusiones

La cultura llanera es una cultura primitiva que dificulta los procesos de mejoras en la producción. Cualquier intento por transformar la producción debe iniciarse con la implantación de registros y del control de pesos. El llanero anfibio ha tenido que cohabitar con el ecosistema de las sabanas inundables durante siglos, encontrando formas de apropiarse del territorio y de vivir en función de su comprensión.

El acceso de los productos de origen a los mercados podría ser una alternativa sostenible, ya que en las entrevistas se evidenció la capacidad que brinda la sabana de desarrollar el ciclo completo de producción bovina con un tipo de ganado, el “tameño”, que está alcanzando reconocimiento, pero es preciso elaborar estrategias de comercialización para conquistar nuevos mercados para lo que puede ser un auténtico producto orgánico.

El potencial real de la sabana inundable está en el manejo complementario e integrado de todas estas especies y de la diversidad agroecosistémica, con lo que se lograría una mayor producción de biomasa y sería posible que cada especie aprovechara los diferentes nichos ecosistémicos, atendiendo así la seguridad alimentaria y fomentando la singularidad y la diversidad del ecosistema mediante iniciativas como el ecoturismo y la preservación de la cultura productiva generada en la relación del hombre con su medio. Probablemente el aprovechamiento de las especies equina, porcina y bovina, especialmente adaptadas al ecosistema, orgánicamente producidas, pueda generar “productos diferenciados y de origen”, que, hasta el momento, no han recibido la atención debida en el marco de las estrategias de “fomento” del desarrollo regional.

Contribución de los autores

Luis Ernesto Rodríguez-Qüenza: participación en el análisis e interpretación de datos, en la redacción del artículo, en la recolección de resultados, y el aporte de material de estudio; Alonso Correa-Toro, Milena Hernández-Rodríguez: participación en la concepción y diseño del artículo, análisis e interpretación de datos; Arcesio Salamanca C.: revisión crítica del artículo, aprobación de la versión y corrección de estilo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Aguilera, J.** (1989). Presente y futuro de la producción animal en el mundo con limitaciones y recursos alimenticios. *Anales de la Academia de Ciencias veterinarias de Andalucía Oriental*. **1**: 52-63.
- Álvarez, R. M.** (2011). La investigación etnográfica: una propuesta metodológica para Trabajo Social. *Revista Trabajo Social UNAM*. **20**: 73-97.
- Álvarez, O.M.E.** (2016). La subjetividad e intersubjetividad: un camino en la comprensión de lo cultural. *Revista Linhas*. **17** (34): 323-336.
- Baptiste, B.** (2015). *Ambientes Radicales*. Columna de Brigitte Baptiste, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Fecha de consulta: marzo de 2019. Disponible en: <http://www.humboldt.org.co/es/actualidad/item/752-ambientes-radicales>
- Baptiste, B. & Ariza, A.** (2008). *Ecología de las sabanas inundables de Casanare*. 1º Congreso de Sabanas Inundables, Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de MVZ Arauca.
- Fedegán** (2014). *Estadísticas, Inventario ganadero*. Fecha de consulta: agosto de 2018. Disponible en: <http://www.fedegan.org.co/estadisticas/inventario-ganadero>
- Fedegán** (2016). *Estadísticas, Inventario ganadero*. Fecha de consulta: agosto de 2018. Disponible en: <http://www.fedegan.org.co/estadisticas/inventario-ganadero>
- Gobernación de Arauca**. *Plan de Desarrollo Departamental de Arauca 2012-2015-PBOT*. (2012). *Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Cravo Norte*. p. 12,13.
- Hammer, D. & Wildavsky, A.** (1990). La entrevista semi-estructurada de final abierto. *Aproximación a una guía operativa*. *Historia y Fuente Oral*. **4**: 23-61.
- Hammer, M. & Atkinson, P.** (1994). *Etnografía; Métodos de Investigación*. Ed. Paidós, Barcelona. p. 17-19.
- Hart, D. R.** (1985). *Conceptos básicos sobre agroecosistemas*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica, p. 1-10.
- Jara, C.** (2009). Reflexiones sobre la teoría de los campos mór-ficos y el desarrollo rural sostenible. *Revista Desarrollo Territorial y Desarrollo Rural*, CIDES UMSA, 2009.
- Johansen, O.** (2004). *Introducción a la Teoría General de Sistemas/ Introduction to The General Theory of Systems*. México: Limusa. p. 53-66.
- Machado, H. & Campos, M.** (2008). Reflexiones acerca de los ecosistemas agrícolas y la necesidad de su conservación. *Revista Pastos y Forrajes*. **31** (4): 307-320.
- Malagón, R. & Prager, M.** (2001). *El enfoque de sistemas: una opción para el análisis de las unidades de producción agrícola*. Sede Palmira: Universidad Nacional de Colombia. p. 23-24.
- Ospina, O.** (2016). *Diseño, implementación y evaluación del efecto de un sistema de gestión del conocimiento sobre las fuentes, nivel y uso del conocimiento en productores ovino-caprinos en Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Postgrado, Colombia.

Proyecto Bovino Arauca - PBA. (2015). Desarrollo de un programa de gestión tecnológica para la innovación social y productiva de la carne y la leche en sistemas de producción bovina de la región de los llanos en Colombia. Departamento de Producción Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

Peñuela, L., Solano, C., Ardila, V., Galán, S. (2014). Sabana inundable y ganadería, opción productiva de conservación en la Orinoquia. Proyecto: “Fortalecimiento institucional

y de política para incrementar la conservación de la biodiversidad en predios privados en Colombia”. Conservación de la biodiversidad en predios productivos. Serie N° 3. **3:** 230.

Rodríguez, Q.L.E. (2018). Etnografía de la población rural del ecosistema de sabanas inundables en el departamento de Arauca. Tesis MSc. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Fabrication of solar cells based on $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ films grown with optimized chemical composition homogeneity

Gerardo Gordillo, Clara Calderón*, Robinson Moreno

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

Abstract

Solar cells with Mo/CZTS/ZnS/ZnO structure were fabricated using $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) films as the absorber layer. These films were grown by simultaneous evaporation of its precursors with a coaxial evaporation source whose advanced design allowed to improve significantly the homogeneity of the chemical composition in the entire volume. Through X-ray diffraction (XRD) measurements we were able to verify that under optimized growing conditions, it is possible to get single phase $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ films; through X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) depth profile analysis we confirmed that the chemical composition of the samples prepared from a coaxial source had a better homogeneity throughout the volume than the samples deposited from three separated evaporation sources. We also found that the conversion efficiencies of solar cells fabricated using a CZTS absorber layer grown from a coaxial evaporation source was significantly greater than that of cells fabricated using CZTS layers prepared from separate evaporation sources. We obtained conversion efficiencies of 5.6%, short circuit current of 18.3 mA/cm² and open-circuit voltage of 0.52 V. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films; Solar cells; Co-evaporation; XRD; XPS analysis.

Fabricación de celdas solares basadas en películas de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ crecidas con homogeneidad de composición química optimizada

Resumen

Se fabricaron celdas solares con estructura Mo/CZTS/ZnS/ZnO usando como capa absorbente películas de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) crecidas por evaporación simultánea de sus precursores desde una fuente de evaporación coaxial construida con un diseño avanzado que permitió mejorar significativamente la homogeneidad en la composición química en todo el volumen. Mediante mediciones con difracción de rayos X (XRD) se verificó que bajo condiciones de crecimiento optimizado era posible obtener películas en la sola fase $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$; los análisis de perfiles de profundidad con espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS) permitieron confirmar que las muestras preparadas desde una fuente coaxial crecieron solamente en la fase CZTS y que su composición química presentaba una mejor homogeneidad en todo el volumen que aquellas depositadas desde tres fuentes de evaporación separadas. Asimismo, se encontró que las celdas solares fabricadas con una capa absorbente CZTS crecidas desde una fuente de evaporación coaxial presentaban eficiencias de conversión significativamente mayores que las celdas fabricadas con capas CZTS preparadas desde fuentes de evaporación separadas. Se obtuvieron eficiencias de conversión de 5,6%, una corriente de cortocircuito de 18,3 mA/cm² y un voltaje de circuito abierto de 0,52 V. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Películas delgadas de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$; Celdas solares; Co-evaporación; XRD; Análisis XPS.

Introduction

The use of the solar cells technology based on thin films of CdTe and $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) has achieved a successful transit to industrial production. However, cadmium is toxic and it requires an effective recycling program, while indium is both sparse and expensive, characteristics which have been considered a great limitation for the large-scale production of modules based on these two technologies in the future (Feltrin & Freundlich, 2008). $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ is emerging as a potential material with several promising properties for inexpensive solar cells made from abundant and non-toxic elements (Khalate, *et al.*, 2018; Yan, *et al.*, 2017).

In 1997, Katagiri, *et al.* (1997) reported for the first time a solar cell based on CZTS, which had an efficiency of 0.66% and in 2008, they reported conversion efficiencies of 6.7% (Katagiri, *et al.*, 2008). Significant advances were obtained later with solar cells manufactured using CZTS films grown in solution via a hydrazine slurry approach (Winkler, *et al.*, 2014) and other vacuum-based growth techniques have also been successful in fabricating CZTSSe

*Corresponding autor:

Clara Calderón; clcalderont@unal.edu.co

Received: October 24, 2018

Accepted: January 21, 2019

Editor: Gabriel Téllez Acosta

solar cells (Repins, *et al.*, 2012; Yang, *et al.*, 2012). In 2013, a world record for CZTS cell efficiency reaching 12.6% was announced. This achievement was the result of a joint research project of IBM and Tokyo Ohka Kogyo (Wang, *et al.*, 2013) using a device fabricated with a Cu-poor and Zn-rich hydrazine pure solution (Todorov, *et al.*, 2013).

In the present study, we describe a route to grow $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ films free of secondary phases characterized by a high chemical composition homogeneity in the entire volume. To achieve this we built a coaxial evaporation source with an advanced design which allowed growing CZTS films with a chemical composition homogeneity significantly better than those grown by simultaneous evaporation of precursors from separate evaporation sources. These results were verified by XRD and depth profile XPS measurements. We also found that this improved chemical composition homogeneity led to a significant increase of CZTS-based solar cells conversion efficiency.

Materials and methods

The $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ films were deposited using a vacuum-based route including simultaneous evaporation of precursors (Cu, Sn, ZnS) from a cylindrical graphite crucible constituted by two coaxial chambers from where Cu, Sn and ZnS were simultaneously evaporated. Figure 1 shows a diagram of the coaxial evaporation source which was implemented to grow the CZTS films.

The purpose of using a coaxial source was to improve CZTS films chemical composition homogeneity both laterally and in depth which is not possible using laterally

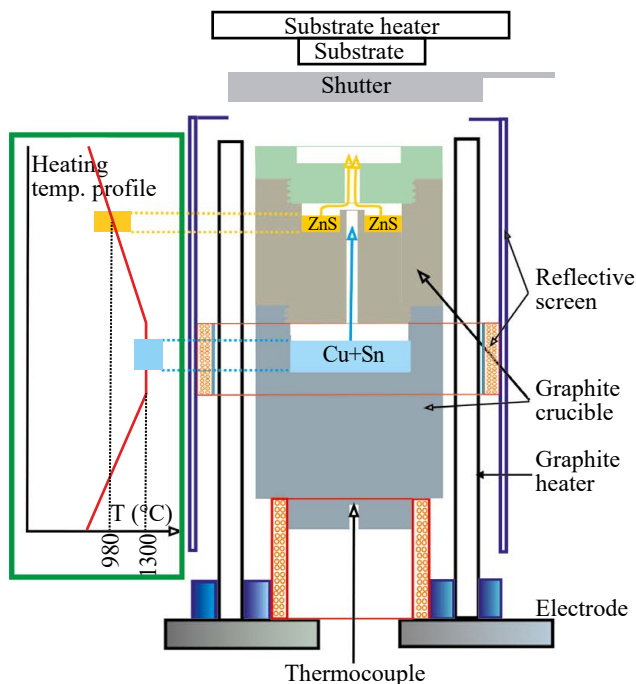


Figure 1. Coaxial evaporation source used to deposit CZTS films by simultaneous evaporation of precursors

separated crucibles to evaporate the precursors. Cu and Sn were evaporated from the same chamber considering that both have similar evaporation temperature while ZnS was evaporated in a separate chamber because it evaporates at a lower temperature. To achieve simultaneous evaporation of Cu, Sn and ZnS, the coaxial evaporation system was built with a special design that allowed to generate a temperature profile such that the temperature of the chamber containing the Cu and Sn precursors was around 1300°C and that of the chamber containing ZnS at around 980°C. The coaxial source was heated by radiation coming from a cylindrical graphite heater and the precursors were co-evaporated in an atmosphere of elemental sulfur evaporated from a Knudsen cell. The CZTS films were deposited on glass substrates or on others coated with a Mo layer using the system as shown in Figure 2a.

The system was constituted by the following units:

- i) A high-vacuum system constituted by a set of mechanical and turbomolecular pumps that allowed obtaining an operation pressure of the order of 2×10^{-5} mbar.
- ii) An evaporation chamber which included a coaxial evaporation source to simultaneously evaporate Cu, Sn and ZnS, a Knudsen cell to evaporate sulfur, a substrate heating system and a quartz crystal used as a transducer to monitor the flow of the evaporated metallic precursors.
- iii) PID controllers to control the temperature of the substrate, the coaxial source, and the Knudsen cell.
- iv) A thickness monitor that allowed measuring the thickness and deposition rate of the CZTS sample.

Single phase $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ films were grown using the deposition routine shown in Figure 2b which included simultaneous evaporation of precursors (Cu, Sn, ZnS, S) on a substrate heated to 250°C followed by annealing at 550°C during 40 min. CZTS films with good properties were obtained under the following deposition parameters: ZnS and (Cu+Sn) evaporation rates of 12 Å/s and 15 Å/s, respectively, an evaporated mass ratio ($M_{\text{Cu}}/M_{\text{Sn}}$) of 0.9, and an evaporated mass ratio for $M_{\text{ZnS}}/(M_{\text{Cu}}+M_{\text{Sn}})$ of 4.

The $n^+\text{-ZnO}$ layer used as the superior contact of solar cells fabricated with Mo/CZTS/ZnS/ $n^+\text{-ZnO}$ structure were deposited using a route based on the plasma-assisted reactive evaporation method which consists of evaporating Zn in the presence of oxygen to elicit a chemical reaction that gives place to the formation of the ZnO. The system we implemented to grow ZnO thin films by plasma-assisted reactive evaporation and the routine to get ZnO films with adequate optoelectrical properties to be used as window layer of photovoltaic devices are described in Gordillo, *et al.* (2016). The ZnS film used as a buffer layer was deposited by the chemical bath deposition (CBD) method using a solution containing thiourea (CSN_2H_4) as the source of HS^- ions, zinc acetate ($\text{ZnC}_4\text{H}_6\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) as the source of Zn^{2+} ions, sodium citrate ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) as the complexing agent and ammonia (NH_3) for pH adjustment. The following chemical bath composition led to good results: [zinc

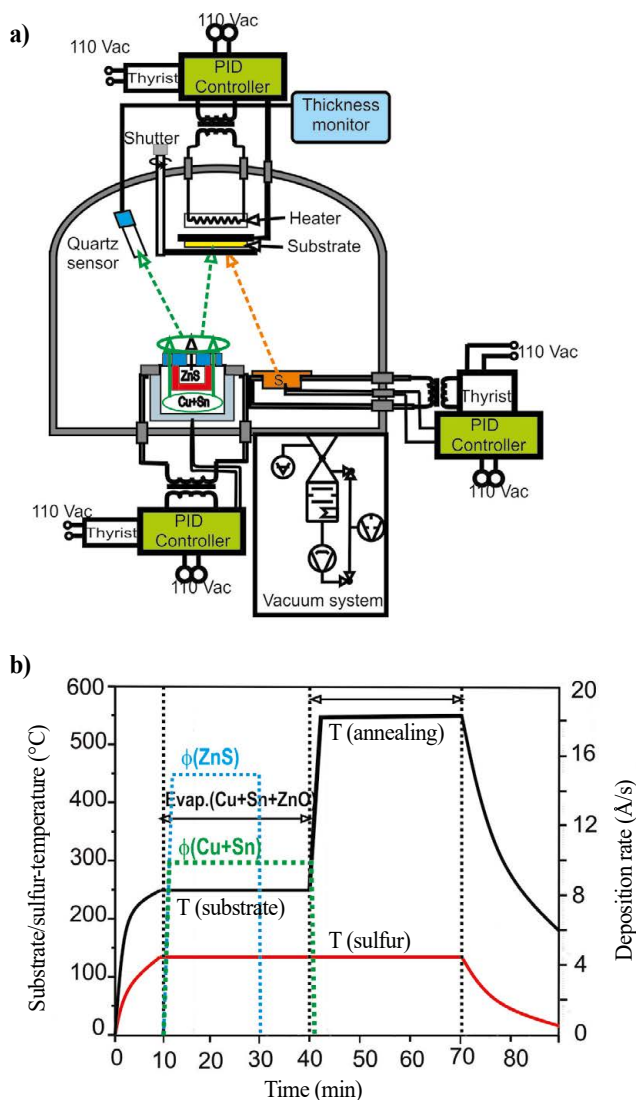


Figure 2. a) Diagram of the system used to deposit $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ films by co-evaporation of Cu, Sn and ZnS in sulfur atmosphere. b) Routine used to grow single phase $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ films

acetate]=150 mM; [thiourea]=150 mM; [sodium citrate]=30 mM. During the deposition, the bath temperature was kept at 80°C and the solution pH around 10.

The XPS analysis of the CZTS thin films was performed with an X-ray photoelectron spectrometer K-Alpha Thermo Scientific™ using the $\text{AlK}\alpha$ radiation (1486.6 eV) for sample excitation. Transmittance measurements were done using a Varian – Cary 5000 spectrophotometer and the film thickness was determined using a Veeco Dektak® 150 surface profiler. The XRD measurements were taken in a Shimadzu-6000 diffractometer.

Results and discussion

Optical and structural characterization of the CZTS films.

The optical properties of the CZTS films were evaluated by determining the absorption coefficient (α) and the energy

band gap (E_g) from measurements of the spectral transmittance. Both the absorption coefficient and the energy gap were determined using a procedure developed by Swanepoel (1983) to get the optical constants of thin films of amorphous semiconductor materials from theoretical calculations using models that take into account the interference phenomena observed in the transmittance spectrum. The model allows to calculate the refractive index (n) and then the absorption coefficient can be determined by making a curve fitting between a theoretically calculated transmittance curve and the one obtained experimentally. The theoretical transmittance (T_{th}) as a function of the wavelength λ and the parameters n , α , and the thickness d can be obtained by using the following expression (Swanepoel, 1983):

$$T_{th}(\lambda) = \frac{Ax}{\lambda B - Cx + Dx^2} \quad (1)$$

where

$$A = 16s(n^2 + k^2)$$

$$B = \{(n+1)^2 + k^2\} \{16s(n+s^2) + k^2\}$$

$$C = 2\{(n^2 - 1 + k^2)(n^2 - s^2 + k^2) - 2k^2(s^2 + 1)\} \cos\phi - 2k^2\{2(n^2 - s^2 + k^2) + (s^2 + 1)(n^2 - 1 + k^2)\} \sin\phi$$

$$D = \{(n-1)^2 + k^2\} \{(n-1)(n-s^2) + k^2\}$$

$$\phi = 4\pi d/\lambda$$

$$x = \exp(-\alpha d)$$

$$k = \alpha\lambda/4\pi$$

Solving numerically the equation $T_{Exp} - T_{th} = 0$, the values of $\alpha = f(\lambda)$ can be obtained.

On the other hand, the optical gap E_g can be determined using the following equation (Pankove, 1971):

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^n \quad (2)$$

where α is the absorption coefficient, A is a constant, E_g is the optical band gap and $n=1/2$ for the direct transition. The optical gap can be determined by extrapolating the linear region of the $(\alpha h\nu)^2$ vs the $h\nu$ curve.

Figure 3 shows the spectral transmittance curve of a typical single phase CZTS film prepared under optimized conditions by co-evaporation and the corresponding curves of α vs λ and $(\alpha h\nu)^2$ vs $h\nu$.

The estimated optical band gap of the CZTS thin films was 1.45 eV, which is in agreement with E_g values reported elsewhere (Ennaoui, et al., 2009; Lin, et al., 2011; Tanaka, et al., 2011).

The phase and the crystalline structure in which the CZTS films grew were also studied through XRD measurements. Figure 4 shows the comparison between the XRD pattern of a typical CZTS thin film prepared by co-evaporation from a coaxial source with that of a CZTS film prepared by co-evaporation but using separate crucibles to evaporate the precursors. We observed that the CZTS films prepared with the two methods showed reflections corresponding only to the tetragonal kesterite type $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ phase (AMC cart

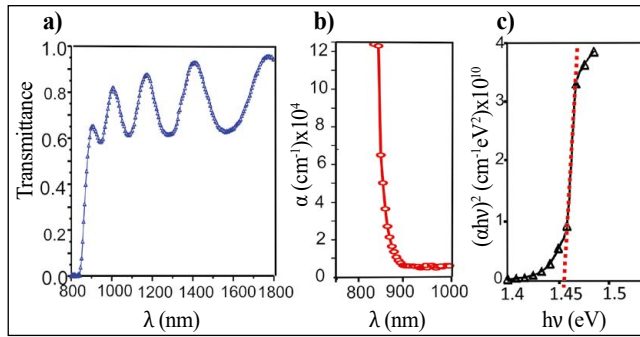


Figure 3. Curves of a) spectral transmittance, b) α vs λ , and c) $(\alpha hv)^2$ vs hv corresponding to a typical single phase CZTS film prepared under optimized conditions

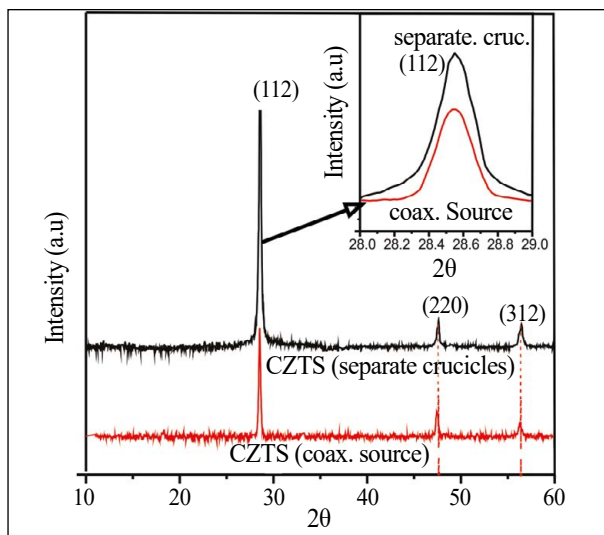


Figure 4. Comparison of the XRD pattern of a typical CZTS film prepared by co-evaporation from a coaxial source with that of a CZTS film deposited using separate crucibles. Inset shows a scan around the (112) reflection.

#99-100-5143). The next section shows the results of the XPS analysis carried out on the CZTS films with which we also verified that the samples grew in the $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ phase.

The scans around the (112) reflection displayed in the inset of Figure 4 show that the full width at the half maximum (FWHM) value corresponding to the CZTS films under study was different indicating that the crystallite size and the microstructure of the CZTS films were affected by the deposition route. Taking into account that the X-ray diffraction peak broadening is due to the instrumental effect as well as to the effect of both the crystallite size (D) and the lattice strain (ϵ) present in the material, the values of D and ϵ were estimated using the Williamson-Hall (W-H) equations, which assume that, in addition to the instrumental effect on the X-ray peak broadening, the lattice strain and the crystallite size are the other two independent factors that contribute to the total peak broadening. The contribution

of each of these effects was convoluted causing an overall broadening of the diffraction peaks. Before estimating the crystallite size and the lattice strain, the instrumental effect on the broadening β_{hkl} was determined using the following equation (Srinivasan, *et al.*, 2009):

$$\beta_{hkl} = [(\beta_{hkl})_{measured}^2 - (\beta)_{instrumental}^2]^{1/2} \quad (3).$$

The strain-induced line broadening β_s is given by the relation $\beta_s = 4\epsilon \tan \theta_{hkl}$ and the total peak broadening is represented by the sum of the contributions of crystallite size and strain present in the material. Assuming that the strain present in the material is uniform, the W-H equation for the total peak broadening is given by (Williamson & Hall, 1953):

$$\beta_{hkl} \cos \theta_{hkl} = \frac{K\lambda}{D} + 4\epsilon \sin \theta_{hkl} \quad (4),$$

where D is the crystallite size, K is the shape factor ($K=0.9$), λ is the wavelength of the X-rays (for $\text{CuK}\alpha$ radiation), θ_{hkl} is the Bragg diffraction angle ($^\circ$) and β_{hkl} is the broadening of the hkl diffraction peak measured at half of its maximum intensity (in radians).

A plot taking $4\sin \theta_{hkl}$ along X-axis and $\beta_{hkl} \cos \theta_{hkl}$ along Y-axis allow to get both the strain present in the material and the crystallite size from the slope and the intercept of the linear fit made to the plot, respectively.

The comparison of the values of the crystallite size and the lattice strain obtained for typical CZTS films prepared by the two mentioned routes is shown in Table 1.

It was observed that the lattice strain ϵ of CZTS films deposited from the coaxial source was significantly less than that of CZTS films grown by using separate crucibles, which indicates that the CZTS films prepared using a coaxial source grew with improved crystallinity. The results also revealed that the crystallite size of the CZTS samples deposited using the coaxial source were much larger than those deposited from separate crucibles, which favors the electric transport.

XPS analysis. The elemental composition homogeneity in the volume of CZTS film grown by co-evaporation was studied through XPS measurements made at three different depths (sputter time of 1, 6, and 9 minutes, respectively). Figures 5 and 6 show the plots of the high-resolution scans of the $\text{Cu}2p$, $\text{Zn}2p$, $\text{Sn}3d$, and $\text{S}2p$ peaks of CZTS thin films deposited from a coaxial source and from separate evaporation crucibles.

It was noted that the XPS scans around the $\text{Cu}2p$, $\text{Zn}2p$, $\text{Sn}3d$, and $\text{S}2p$ peaks corresponding to measurements made at the three different depths of the CZTS samples prepared

Table 1. Values of crystallite size and lattice strain calculated from the W-H equation

Deposition route	D (nm)	Lattice strain ($\epsilon \times 10^{-3}$)
Coaxial source	132±10	1.25±0.4
Separate crucible	78±30	1.65±0.6

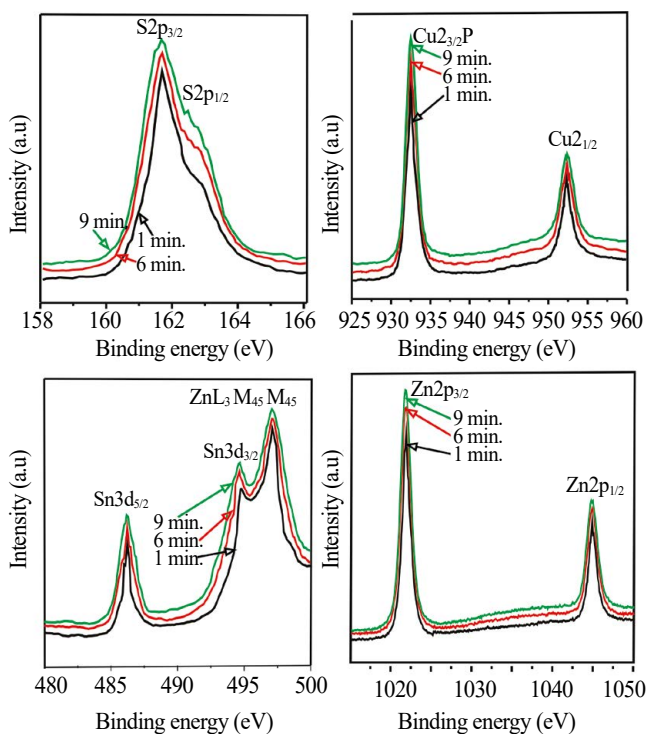


Figure 5. XPS high resolution core level spectra of the Cu2p, Zn2p, Sn3d, and S2p peaks measured at three different depths of typical CZTS thin films prepared by co-evaporation from a coaxial source

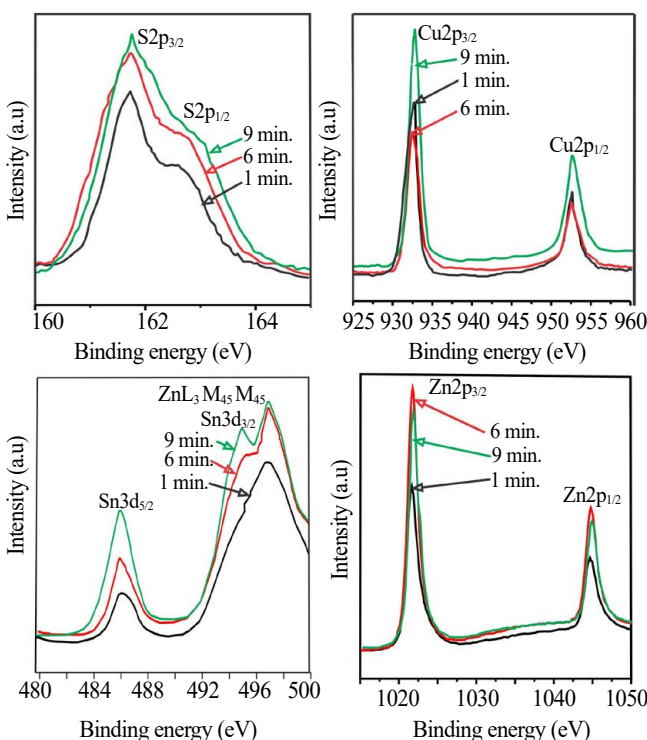


Figure 6. XPS high resolution core level spectra of the Cu2p, Zn2p, Sn3d, and S2p peaks measured at three different depths of typical CZTS thin films prepared by co-evaporation from separate crucibles

by co-evaporation from a coaxial source (Figure 5), as well as those prepared from separated crucibles (Figure 6), arose at the same binding energies indicating that both types of samples had the same phase and that it did not change throughout the volume. It was also observed that the S2p core level spectrum exhibited two peaks, $2p_{3/2}$ and $2p_{1/2}$, with binding energies at 161.9 and 162.8 eV and a peak splitting of 0.9 eV, while the Sn3d core level spectrum showed two peaks, $\text{Sn}3d_{5/2}$ and $\text{Sn}3d_{3/2}$, at 486.4 and 495 eV with a separation of 8.6 eV, while the Cu2p core level spectrum exhibited binding energies for the $\text{Cu}2p_{3/2}$ and $\text{Cu}2p_{1/2}$ peaks at 932.7 and 952.3 eV and a peak splitting of 19.6 eV while the Zn2p core level spectrum peaks $\text{Zn}2p_{3/2}$ and $\text{Zn}2p_{1/2}$ were visible at the binding energies of 1021.8 and 1044.6 eV with a peak separation of 22.8 eV. These results allowed us to conclude that in both types of samples copper was in the +1 oxidation state, Zn in the +2 oxidation state, and S in the -2 oxidation state, which also confirmed the valence (IV) for Sn. Similar results have been reported in other studies (Riha, *et al.*, 2009; Xu, *et al.*, 2012).

Results in Figures 5 and 6 also show that the peak area of the core level spectra for elements Cu, Zn, Sn, and S, measured at different depths of the CZTS films co-evaporated from a coaxial source differed very little from each other indicating that the chemical composition of this type of samples was homogeneous; on the contrary, the samples prepared by co-evaporation from separate evaporation crucibles exhibited inhomogeneity in their chemical composition throughout the entire volume.

$\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ -based solar cells. Solar cells with the structure $\text{Mo}/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4/\text{ZnS}/\text{n}^+\text{-ZnO}$ were fabricated using typically a 0.6 μm thick Mo layer, a 3.0 μm thick CZTS film, a 50 nm thick ZnS buffer layer deposited by CBD, and a 0.8 μm thick $\text{n}^+\text{-ZnO}$ layer and its J-V characteristic was measured under AM 1.5 irradiance (100 mW/cm^2). In Figure 7 we compared the J-V curve of the best solar cell fabricated using a CZTS layer deposited from a coaxial source with that of a cell fabricated using a CZTS layer deposited using separate evaporation crucibles and in Table 2 we listed the corresponding performance parameters (open-circuit voltage (V_{OC}), short-circuit current density (J_{sc}), fill factor (FF) and conversion efficiency (η)).

From the data in Table 2, it is observed that the low efficiency of CZTS-based cells was mainly caused by poor FF and low short circuit current. Taking into account that the FF depends on the diode quality factor β , as well as on its series resistance, the low values of FF could be partly attributed to the high values of the series resistance of the cells. On the other hand, considering that the diode quality factor is affected by the recombination through the trap centers inside the depletion region (Mialhe, *et al.*, 1986), it can be assumed that an additional loss of FF may be related to the presence of recombination centers in the depletion layer of the device, probably induced by structural and intrinsic defects (vacancies, anti-site defects, etc.).

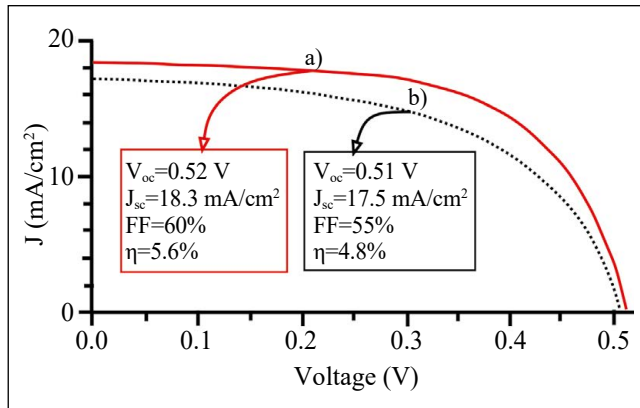


Figure 7. J-V curves of the best solar cells fabricated using a CZTS absorber layer a) deposited from a coaxial source and b) from separate evaporation crucibles

Table 2. Comparison of the performance parameters of solar cells fabricated using CZTS layers deposited by co-evaporation from a coaxial source with that of devices fabricated using a CZTS layer deposited by co-evaporation from separate evaporation crucibles

Deposition route of CZTS sample	η (%)	FF (%)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)
Coaxial source	5.0±0.6	58±2	500±20	16.3±2.3
Separate sources	4.4±0.8	51±4	485±25	15±2.5

The low values of short circuit current exhibited by the studied solar cells suggest a low collection of the photo-generated carriers, which could be attributed to factors such as, small minority carrier diffusion length associated with small grain size values of the CZTS layer and also with high densities of trap states. The high interface state recombination may be another factor contributing to losses of the short circuit current.

The best efficiency obtained in this work was 5.6%; however, bearing in mind that these are just preliminary results, the performance of the device could be improved by optimizing the growth parameters of the different layers that constitute the device and improving the grain size of the CZTS films through the optimization of the post-deposition annealing.

Conclusions

Single phase CZTS thin films with improved chemical composition homogeneity were grown by co-evaporation of precursors from a coaxial evaporation source built with an advanced design. XRD and XPS analyses revealed that the oxidation states of the constituent elements of the CZTS films corresponded to the $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ phase. On the other hand, we found that the CZTS films presented a high absorption coefficient and an optical gap of 1.45 eV indicating that they are suitable to be used as absorber layer in solar cells.

The applicability of the CZTS films grown by co-evaporation of precursor for solar cells was demonstrated and its performance was significantly enhanced by improving the homogeneity of the chemical composition of the CZTS layer. Efficiencies of 5.6% were achieved with solar cells fabricated with the structure $\text{Mo/Cu}_2\text{ZnSnS}_4/\text{ZnS/n}^+\text{-ZnO}$.

Acknowledgements

This work received the support of *Colciencias* (Contract #038/2013) and of *Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Facultad de Ciencias, Grupo GMS&ES*, Bogotá DC, Colombia (Proy. 20287 supported by División de Investigación sede Bogotá (DIB)).

Conflict of interest

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

References

- Ennaoui, A., Lux-Steiner, M., Weber, A., Abou-Ras, D., Kötschau I., Schock, H.W., Schurr, R., Hölzling A., Jost, S., Hock, R. (2009). $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin film solar cells from electroplated precursors: Novel low-cost perspective. *Thin Solid Films*. **517**: 2511-2514.
- Feltrin, A., Freundlich, A. (2008). Material considerations for terawatt level deployment of photovoltaics. *Renew Energy*. **33**: 180-185.
- Gordillo, G., Ramírez, A.A., Ramírez, E.A. (2016). Development of novel control system to grow ZnO thin films by reactive evaporation. *J. Mater. Res. Technol.* **5** (3): 219-225.
- Katagiri, H., Jimbo, K., Yamada, S., Kamimura, T., Shwe, M. W., Fukano, T., Ito, T., Motohiro, T. (2008). Enhanced conversion efficiencies of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ -based thin film solar cells by using preferential etching technique. *Appl. Phys. Express*. **1**: 041201-041202.
- Katagiri, H., Sasaguchi, N., Hando, S., Hosino, S., Ohashi, J., Yokota, T. (1997). Preparation and evaluation of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films by sulfurization of E-B evaporated precursors. *Sol. Energy Mater. & Sol. Cells*. **49**: 407-414.
- Khalate, S. A., Kate, R. S., Deokate, R. J. (2018). A review on energy economics and the recent research and development in energy and the $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) solar cells: A focus towards efficiency. *Solar Energy*. **169**: 616-633.
- Lin, X. Z., Kavalakkatt, J., Lux-Steiner, M., Ennaoui, A. (2011). Thin Film Solar Cells Absorber $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) by annealing of Monodisperse Kesterite Nanoparticle precursors, Hamburg, Proc. 26th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf. p. 2896.
- Mialhe, P., Charles, J. P., Khoury, A., Bordure, G. (1986). The diode quality factor of solar cells under illumination. *J. Phys. D*. **19**: 483-492.
- Pankove, J. I. (1971). Optical processes in semiconductors. New York, USA: Dover Publications, Inc. p. 57.
- Repins, I., Beall, C., Vora, N., DeHart, C., Kuciauskas, D., Dippo, P., To, B., Mann, J., Hsu, W. C., Goodrich, A., Noufi, R. (2012). Co-evaporated $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ films and devices. *Sol. Energy Mater. & Sol. Cells*. **101**: 154-159.

- Riha, S.C., Parkinson, B.A., Prieto, A.L.** (2009). Solution based synthesis and characterization of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ nanocrystals, *J. Am. Chem. Soc.* **131** (34): 12054-12055.
- Srinivasan, R., Yogamalar, R., Josephus, R. J., Bose, A.C.** (2009). Estimation of lattice strain, stress, energy density and crystallite size of the spherical yttrium oxide nanoparticles. *Funct. Mater. Lett.* **2**: 1.
- Swanepoel, R.** (1983) Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon. *Journal of Physics E.* **12**: 1214-1222.
- Tanaka, K., Fukui, Y., Moritake, N., Uchiki, H.** (2011). Chemical composition dependence of morphological and optical properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films deposited by sol-gel sulfurization and $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin film solar cell efficiency. *Sol. Energy Mater. & Sol. Cells.* **95**: 838-842.
- Todorov, T. K., Tang, J., Bag, S., Gunawan, O., Gokmen, T., Zhu, Y., Mitzi, D. B.** (2013). Beyond 11% Efficiency: Characteristics of State-of-the-Art $\text{Cu}_2\text{ZnSn(S,Se)}_4$ Solar Cells. *Adv. Energy Mater.* **3**: 34-38.
- Wang, W., Winkler, M. T., Gunawan, O., Gokmen, T., Todorov, T. K., Zhu, Y., Mitzi, D. B.** (2013). Device Characteristics of CZTSSe Thin-Film Solar Cells with 12.6% Efficiency. *Advanced Energy Materials.* **4** (7): 1301465-1301465.
- Williamson, G. K., Hall, W. H.** (1953) X-ray line broadening from filed Aluminium and Wolframium. *Acta Metall.* **1**: 22-31.
- Winkler, M. T., Wang, W., Hovel, H. J., Gunawan, O., Todorov, T. K., Mitzi, D. B.** (2014). Optical designs that improve the efficiency of $\text{Cu}_2\text{ZnSn(S,Se)}_4$ solar cells. *Energy Environ Sci.* **7**: 1029-1036.
- Xu, J., Yang, X., Yang, Q. D., Wong, T. L., Lee, C.S.** (2012). $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ hierarchical microspheres as an effective counter electrode material for quantum dot sensitized solar cells. *J. Phys. Chem. C.* **116** (37): 19718-19723.
- Yan, C., Sun, K., Liu, F., Huang, J., Zhou, F., Hao, X.** (2017) Boost Voc of pure sulfide kesterite solar cell via a double CZTS layer stacks. *Sol. Energy Mater. & Sol. Cells.* **160**: 7-11.
- Yang, W., Duan, H. S., Bob, B., Zhou, H., Lei, B., Chung, C. H., Li, S. H., Hou, W. W., Yang, Y.** (2012). Novel solution processing of high-efficiency Earth-abundant $\text{Cu}_2\text{ZnSn(S,Se)}_4$ solar cells. *Adv. Mater.* **24** (47): 6323-6329.

Orbital dynamics in realistic galaxy models: NGC 3726, NGC 3877 and NGC 4010

✉ Fredy L. Dubeibe¹, ✉ Sandra M. Martínez-Sicachá², ✉ Guillermo A. González^{2,*}

¹Grupo de Investigación Cavendish, Facultad de Ciencias Humanas y de la Educación, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia.

²Grupo de Investigación en Relatividad y Gravitación, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Abstract

In the present paper, using a generalization of the Miyamoto and Nagai potential we adjusted the observed rotation curves of three specific spiral galaxies to the analytical circular velocities. The observational data have been taken from a 21 cm-line synthesis imaging survey using the Westerbork Synthesis Radio Telescope, for three particular galaxies in the Ursa Major cluster: NGC 3726, NGC 3877 and NGC 4010. Accordingly, the dynamics of the system is analyzed in terms of the Poincaré sections method, finding that for larger values of the angular momentum of the test particle or lower values its total energy the dynamics is mainly regular, while on the opposite cases, the dynamics is mainly chaotic. Our toy model opens the possibility to find chaotic bounded orbits for stars in those particular galaxies. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Stellar dynamics; Galaxies: kinematics and dynamics; Nonlinear dynamics and chaos.

Dinámica orbital en modelos realistas de galaxias: NGC 3726, NGC 3877 y NGC 4010

Resumen

En el presente trabajo, utilizando una generalización del potencial de Miyamoto-Nagai, se ajustan las curvas de rotación observadas de tres galaxias espirales a las velocidades circulares analíticas. Los datos observacionales se tomaron de un conjunto de imágenes de línea de 21 centímetros (o línea HI) obtenidos con el Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT), para tres galaxias particulares en el grupo de la Ursa Major: NGC 3726, NGC 3877 y NGC 4010. Seguidamente, se analiza la dinámica del sistema en términos del método de secciones de Poincaré, encontrando que para valores grandes del momento angular de la partícula de prueba o valores bajos su energía total, la dinámica es principalmente regular, mientras que en los casos opuestos, la dinámica es principalmente caótica. Nuestro modelo abre la posibilidad de encontrar órbitas caóticas acotadas para estrellas presentes en esas galaxias particulares. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Dinámica estelar, Galaxias: cinemática y dinámica, Dinámica no lineal y caos.

Introduction

Since the seminal paper by Miyamoto & Nagai (1975), the literature on three-dimensional analytical models for the gravitational field of different types of galaxies has grown considerably. In this respect, particular attention deserve the models proposed by Jaffe (1983) and Hernquist (1990), who derived analytical models which closely approximate the light distribution for spherical and elliptical galaxies, respectively. A few years later, Long & Murali (1992) presented an analytical potential for barred galaxies that reduces to the Miyamoto-Nagai disk by an appropriate setting of the free parameters, while Dehnen (1993) generalized the Jaffe and Hernquist models by means of a family of density profiles with different central slopes. More recently, Vogt & Letelier (2005) derived an analytical expression for the gravitational field of galaxies, based on the multipolar expansion up to the quadrupole term. Using a different approach, González *et al.* (2010) obtained a family

of finite thin-discs models for four galaxies in the Ursa major cluster in which the circular velocities were adjusted to fit the observed rotation curves.

One advantage of an analytical galaxy model is the possibility to study the dynamics (regular or chaotic) of orbits. This can be considered one of the standing problems in galactic dynamics because it could allow us to understand the formation and evolution of galaxies (Contopoulos, 1979), as shown by the pioneer simulations of Lindblad (1960). Despite the fact that early papers on this topic studied only regular orbits in the meridional plane (Martinet & Mayer, 1975, Manabe, 1979, Greiner, 1987, Lees & Schwarzschild, 1992), soon after, the existence of chaos on the orbital motion started to be

*Corresponding autor:

G. A. González; guillermo.gonzalez@saber.uis.edu.co

Received: October 5, 2018

Accepted: February 14, 2019

Editor: Román Castañeda Sepulveda

considered by **Caranicolas** (1996) and **Caranicolas & Papadopoulos** (2003). In the majority of cases all these studies focused on the distinction between regular and chaotic orbits (**Manos & Athanassoula**, 2011, **Bountis et al.**, 2012, **Manos et al.**, 2013) or the influence of the galaxy components (nucleus, bulge, disk, halo) on the character of orbits, see e.g. (**Zotos**, 2012, **Zotos & Caranicolas**, 2013, **Zotos**, 2014). Notwithstanding the evidence that both chaotic and regular motions are possible in many axisymmetric potentials, recent studies on generalized axisymmetric potentials suggest that a third integral of motion seems to exist for energy values closer to the escape energy (**Dubeibe et al.**, 2018, **Zotos et al.**, 2018). Hence, such apparent ambiguity might only be solved by performing systematic studies of each particular model.

In this paper, we are interested in meridional motions of free test particles (stars) in presence of analytical realistic galaxy models. Our models possess axial symmetry, which is a good approximation given the morphology of galaxies that are mainly approximate figures of revolution. Additionally, the galaxy components were not added one by one, instead of this, we derived a generalized Miyamoto-Nagai model that can be adjusted very accurately to fit the observed rotation curve and hence it is assumed that all (or most of) the components are taken into account. The determination of the specific values of the coefficients of the series expansion let us calculate the corresponding surface densities and all the kinematic quantities characterizing the particular galaxy models. Unlike the models derived by **González et al.** (2010), which exhibit instabilities to small vertical perturbations (see e.g. the cases of NGC 3877 and NGC 4010), our models satisfy the stability conditions for radial and vertical perturbations. On the other hand, the dynamics of the orbits is studied through the Poincaré surfaces of section, showing that the orbital motion exhibits a strong dependence on the angular momentum and energy of the test particles (stars).

The paper is organized as follows: in the first section, we derive the generalized Miyamoto-Nagai model. Next, from the new potential the explicit expressions for the physical quantities of interest are determined. In the second section we adjust the observed rotation curves of three specific spiral galaxies (NGC 3726, NGC 3877 and NGC 4010) to the analytical circular velocities derived with our model. Then, the mass-density profiles are calculated, along with the vertical and epicyclic frequencies, showing that our model not only is well-behaved but also satisfy the stability conditions. A dynamical analysis in terms of the Poincaré surfaces of section is performed in the third section. Finally, in the fourth section, we summarize our main conclusions.

Generalized Miyamoto-Nagai model

Let us start considering the axially symmetric Laplace's equation in spherical coordinates

$$\nabla^2 \Phi(r, \theta) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right) = 0, \quad (1)$$

whose general solution reads as

$$\Phi(r, \theta) = \sum_{l=0}^{\infty} \left(A_l r^l - B_l r^{-(l+1)} \right) P_l(\cos \theta), \quad (2)$$

where A_l and B_l are constants to be determined, P_l are the Legendre polynomials, and the notation (r, θ, ϕ) means (radial, polar, azimuthal) coordinates, respectively.

Since $\Phi(r, \theta)$ denotes the gravitational potential of an axisymmetric finite distribution of mass, the boundary condition $\lim_{r \rightarrow \infty} \Phi(r, \theta) = 0$ must be satisfied, thus the solution (2) takes the form

$$\Phi(r, \theta) = - \sum_{l=0}^{\infty} \frac{B_l P_l(\cos \theta)}{r^{l+1}}. \quad (3)$$

Following **Vogt & Letelier** (2005), in order to obtain a generalized Miyamoto-Nagai model and for the sake of simplicity, we shall consider terms up to $l = 3$ in (3), therefore, transforming to cylindrical coordinates (R, z) by means of the relations

$$\cos \theta = z/r \quad \text{and} \quad r = \sqrt{R^2 + z^2}, \quad (4)$$

and applying the additional transformation (**Satoh**, 1980),

$$z \rightarrow z^* = a + \sqrt{z^2 + b^2}, \quad (5)$$

with a and b two arbitrary parameters, the generalized potential takes the form*

$$\begin{aligned} \Phi(R, z) = & - \frac{B_0}{\sqrt{R^2 + z^{*2}}} - \frac{B_1 z^*}{(R^2 + z^{*2})^{3/2}} \\ & + \frac{B_2 (R^2 - 2z^{*2})}{2(R^2 + z^{*2})^{5/2}} + \frac{B_3 (3R^2 z^* - 2z^{*3})}{2(R^2 + z^{*2})^{7/2}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Once the potential has been specified, the mass-density distribution Σ can be calculated directly from Poisson equation,

$$\Sigma = \frac{1}{4\pi G} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Phi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right), \quad (7)$$

while the circular velocity v of particles in the galactic plane, the epicyclic frequency k , and the vertical frequency ν of small oscillations about the equilibrium circular orbit, can be obtained from the following expressions evaluated at $z = 0$ (**Binney & Tremaine**, 2011)

$$v^2 = R \frac{\partial \Phi}{\partial R}, \quad (8)$$

$$k^2 = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial R^2} + \frac{3}{R} \frac{\partial \Phi}{\partial R}, \quad (9)$$

$$\nu^2 = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2}. \quad (10)$$

From (8-10), it is important to emphasize that a feasible model must satisfy the constraints set by the conditions $v^2 \geq 0$, $k^2 \geq 0$, and $\nu^2 \geq 0$, where the last two inequalities are understood as stability conditions (**Vogt & Letelier**, 2005).

As is evident from the preceding paragraphs, the galactic models and its associated physical quantities are uniquely determined by the set of constants a, b, B_0, B_1, B_2 , and B_3 , which (taking a pragmatic approach) can be estimated from the observational data of the corresponding rotation curves, as we will discuss in detail in the next section.

Rotation curves fitting

The observational data were taken from **Verheijen & Sancisi (2001)** for three specific galaxies in the Ursa Major cluster: NGC 3726, NGC 3877 and NGC 4010. Following the procedure outlined in **González *et al.* (2010)**, we take the galaxy radius R_d as the given by the largest tabulated value of the data. Thus, introducing dimensionless variables $\tilde{R} = R/R_d, \tilde{z} = z/R_d, \tilde{a} = a/R_d, \tilde{b} = b/R_d$ and setting $\tilde{B}_0 = B_0/R_d, \tilde{B}_1 = B_1/R_d^2, \tilde{B}_2 = B_2/R_d^3$, and $\tilde{B}_3 = B_3/R_d^4$, the nonlinear least square curve fitting method allows us to calculate the numerical values of the parameters for each particular galaxy. The resulting values of $\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{B}_0, \tilde{B}_1, \tilde{B}_2$, and \tilde{B}_3 , for the three galaxies under consideration, are given in Table 1.

	NGC 3726	NGC 3877	NGC 4010
\tilde{a}	0.6773	0.8491	1.143
\tilde{b}	-1.045×10^{-6}	-2.929×10^{-7}	-9.568×10^{-6}
\tilde{B}_0	-7.183×10^4	-9.859×10^4	-3.146×10^4
\tilde{B}_1	1.342×10^5	1.820×10^5	4.735×10^4
\tilde{B}_2	-8.337×10^4	-1.098×10^5	1.464×10^4
\tilde{B}_3	2.616×10^4	3.674×10^4	-7.815×10^3

Table 1. Parameters for each particular galaxy model.

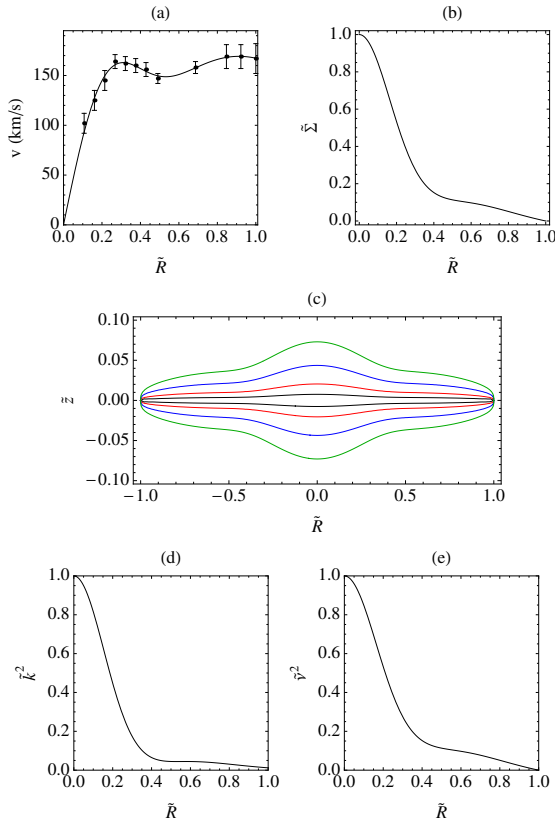


Figure 1. Model fitted to the rotation curve of NGC 3726 using the parameters given in the first column of Table 1. (a) The solid curve indicates the rotation velocity calculated from

*It should be noted that setting $B_0 = GM, B_1 = B_2 = B_3 = 0$ in (6), we get the well-known Miyamoto-Nagai Potential (**Miyamoto & Nagai, 1975**).

(8) while the error bars denote the velocity dispersions of the observational data. (b) Normalized mass-density distribution $\tilde{\Sigma}$ at $z = 0$, calculated from (7). (c) Constant-density curves of equation (7) in the meridional plane. (d) Epicyclic frequency (9) evaluated on $z = 0$. (e) Vertical frequency (10) evaluated on $z = 0$.

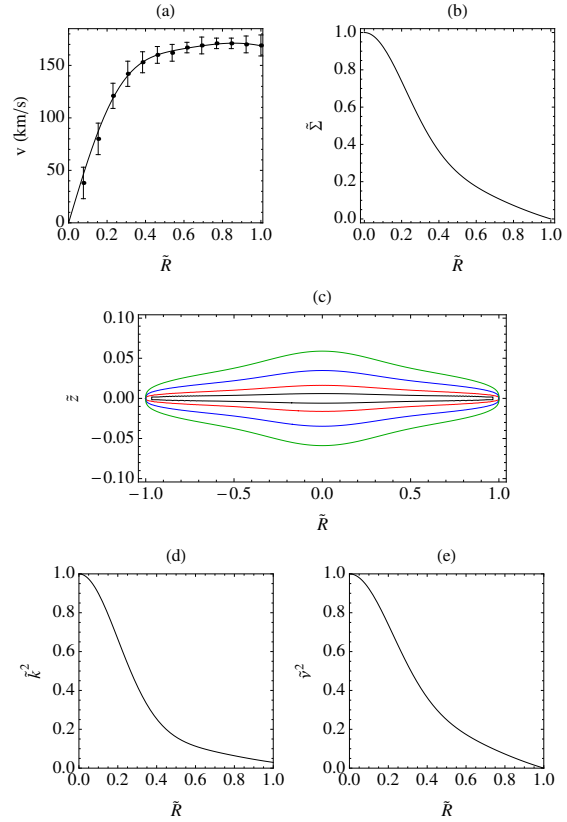


Figure 2. Model fitted to the rotation curve of NGC 3877 using the parameters given in the second column of Table 1. (a) The solid curve indicates the rotation velocity calculated from (8) while the error bars denote the velocity dispersions of the observational data. (b) Normalized mass-density distribution $\tilde{\Sigma}$ at $z = 0$, calculated from (7). (c) Constant-density curves of equation (7) in the meridional plane. (d) Epicyclic frequency (9) evaluated on $z = 0$. (e) Vertical frequency (10) evaluated on $z = 0$.

In panels (a) of Figures 1, 2, and 3, we show the observational data (points) of the rotation curve with the corresponding velocity dispersions (error bars) as reported by **Verheijen & Sancisi (2001)** for NGC 3726, NGC 3877 and NGC 4010. The solid lines correspond to the analytical expressions (8) fitted to the rotation curves. As can be seen, in each case the model fits the observed data with good accuracy. Additionally, in panels (b) of Figures 1, 2, and 3, we plot the normalized mass-density distribution (7) at $z = 0$ for the three galaxies, as a function of the dimensionless radial coordinate \tilde{R} . Here, we obtain a well-behaved mass-density function, showing a maximum value at the center that decreases to zero at the edge of the disk. On the other hand, in panels (c) of Figures 1, 2, and 3, we present four

isodensity curves of the mass-density distribution (7) in the meridional plane (\tilde{R}, \tilde{z}) , showing that each model corresponds to a very different mass distribution. Finally, from panels (d) and (e) of the same figures, it is noteworthy that in the three cases the stability conditions are fully satisfied.

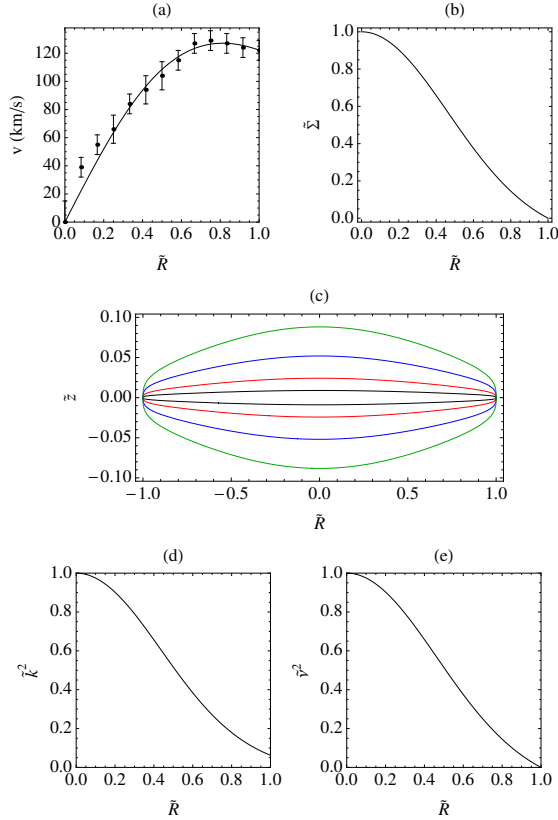


Figure 3. Model fitted to the rotation curve of NGC 4010 using the parameters given in the third column of Table 1. (a) The solid curve indicates the rotation velocity calculated from (8) while the error bars denote the velocity dispersions of the observational data. (b) Normalized mass-density distribution $\tilde{\Sigma}$ at $z = 0$, calculated from (7). (c) Constant-density curves of equation (7) in the meridional plane. (d) Epicyclic frequency (9) evaluated on $z = 0$. (e) Vertical frequency (10) evaluated on $z = 0$.

Stellar Dynamics

It is a well-known fact that using rough estimates of the dimensions of typical stars and galaxies, the collision interval between stars is about 10^8 times longer than the average age for most galaxies (Binney & Tremaine, 2011). This implies that the star's motion can be determined solely by the gravitational attraction of the galaxy and that collisions between stars are so rare that are irrelevant (Maoz, 2016). Therefore, as a first approximation, the orbital dynamics of a star in a given galaxy can be studied following the usual Lagrangian and Hamiltonian approaches for the motion of a test particle in the presence of an estimated gravitational potential.

The orbital motion of a test particle in an axisymmetric potential is governed by the Lagrangian

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \left[\dot{R}^2 + (R\dot{\phi})^2 + \dot{z}^2 \right] - \Phi(R, z), \quad (11)$$

with (R, ϕ, z) the usual cylindrical coordinates. The generalized canonical momenta read as

$$p_R = \dot{R}, \quad p_\phi = R^2 \dot{\phi}, \quad p_z = \dot{z}, \quad (12)$$

and the Hamiltonian takes the form

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2} (p_R^2 + p_z^2) + \Phi_{\text{eff}}(R, z), \quad (13)$$

with

$$\Phi_{\text{eff}}(R, z) = \frac{L_z^2}{2R^2} + \Phi(R, z). \quad (14)$$

Here, $L_z = p_\phi = \text{constant}$, denotes the conserved component of angular momentum about the z -axis.

From (13), the resulting Hamilton's equations of motion can be expressed as

$$\dot{R} = p_R, \quad (15)$$

$$\dot{z} = p_z, \quad (16)$$

$$\dot{p}_R = \frac{L_z^2}{R^3} - \frac{\partial \Phi(R, z)}{\partial R}, \quad (17)$$

$$\dot{p}_z = -\frac{\partial \Phi(R, z)}{\partial z}, \quad (18)$$

where $\Phi(R, z)$ is given by Eq. (6) and its respective parameters should be taken from Table 1.

Since the Hamiltonian is autonomous, \mathcal{H} is an integral of motion

$$\mathcal{H}(R, z, p_R, p_z) = \mathcal{H}(R_0, z_0, p_{R_0}, p_{z_0}) = h, \quad (19)$$

with h the energy of an orbit.

The existence of an analytic integral of motion reduces the phase space dimensionality, and hence the Poincaré surface of section is an appropriate and well-established method to analyze the dynamics of the system. Taking into account the axial symmetry associated to the system, it is customary to choose the equatorial plane $z = 0$ as the Poincaré plane in order to represent the surface of sections in the $(\tilde{R}, \dot{\tilde{R}})$ -plane. The orbits were numerically integrated forward in time for 1000 units of time by using a Runge-Kutta-Fehlberg Method (RKF45), with this setting the numerical error related to the conservation of the energy is at most 10^{-14} . In all cases we set $z_0 = p_{R_0} = 0$ and we scan the phase space with a large number of initial conditions for the radii R_0 , these three values allow us to determine the values of p_{z_0} through the relation (19).

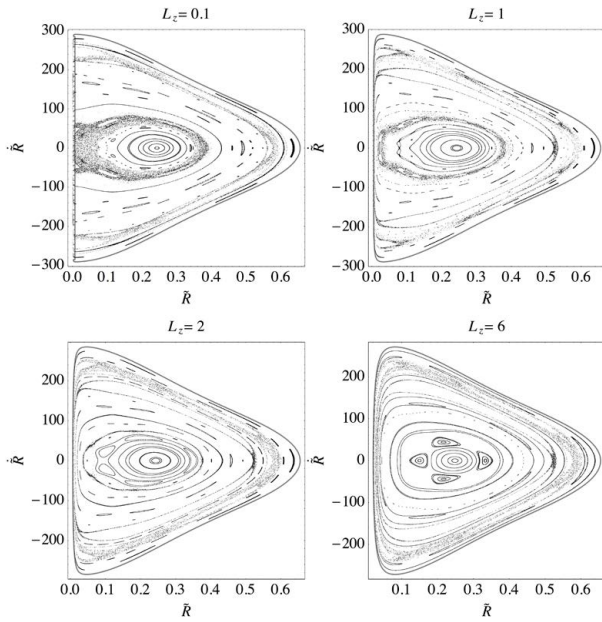


Figure 4. Poincaré surfaces of section of NGC 3726 for different values of angular momentum L_z with $h = -1$.

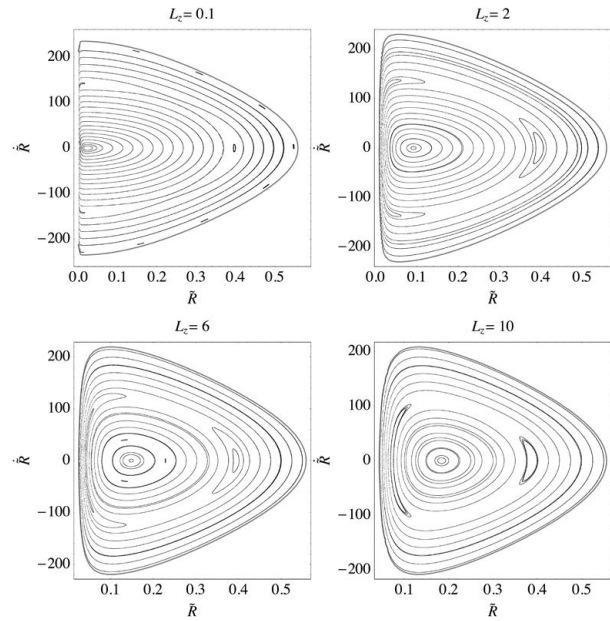


Figure 6. Poincaré surfaces of section of NGC 3877 for different values of angular momentum L_z with $h = -1$.

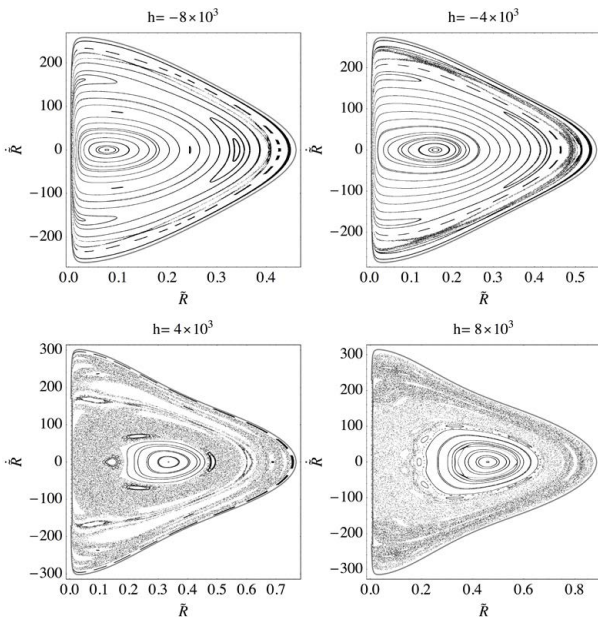


Figure 5. Poincaré surfaces of section of NGC 3726 for different values of total energy h with $L_z = 1$.

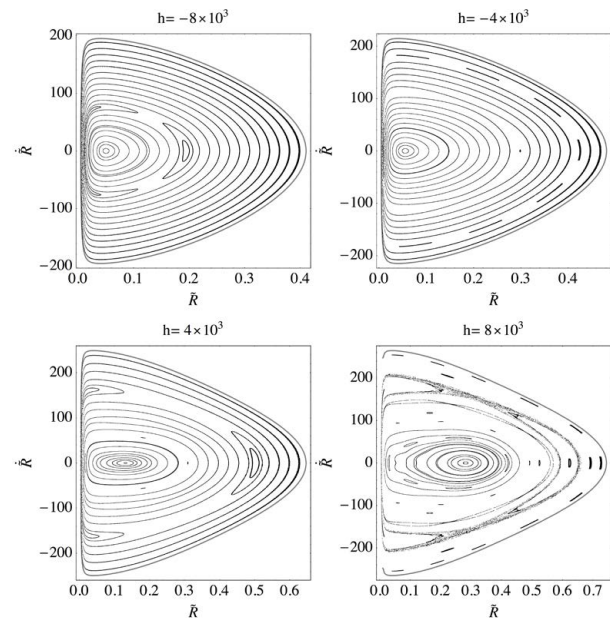


Figure 7. Poincaré surfaces of section of NGC 3877 for different values of total energy h with $L_z = 1$.

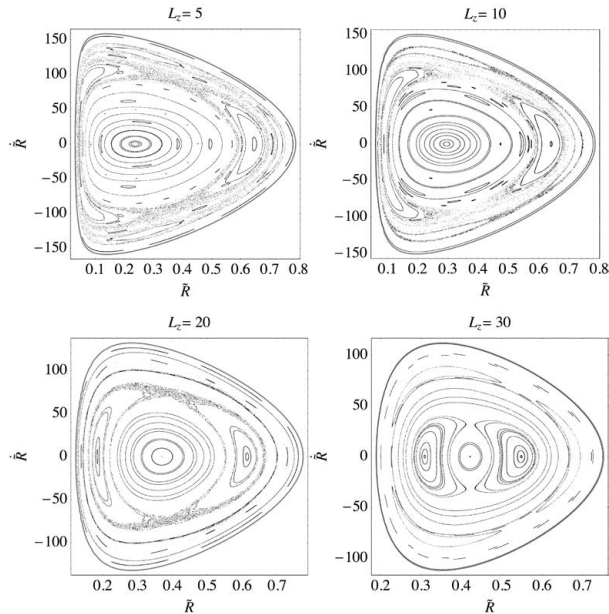


Figure 8. Poincaré surfaces of section of NGC 4010 for different values of angular momentum L_z with $h = -10$.

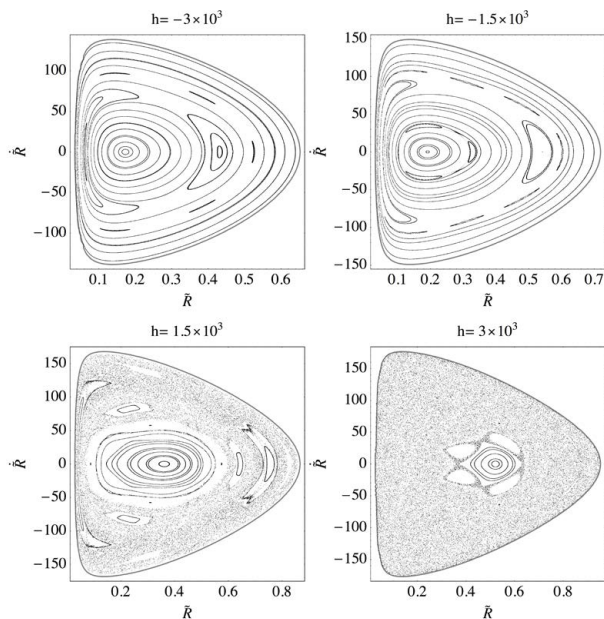


Figure 9. Poincaré surfaces of section of NGC 4010 for different values of total energy h with $L_z = 5$.

The transition from regularity to chaos (or viceversa) that takes place for the three considered galaxy models was inspected through the Poincaré sections in Figs. 4-9, by using different values of L_z (Figs. 4, 6 and 8) and h (Figs. 5, 7 and 9). It can be observed that the orbital motion exhibits a strong dependence on the angular momentum L_z and energy h of the test particle. In particular, from the surfaces of section presented in Figs. 4, 6, and 8, we may infer that there exists an increase in the regularity of the system for larger values of the angular momentum L_z , i.e. if there exists a chaotic sea the increase

of L_z will fill the phase with KAM islands, while the opposite effect is observed for larger values of energy h (see Figs. 5, 7, and 9), where the KAM islands deform and shrink giving place to larger regions of chaos.

Concluding remarks

In the present paper, using the general solution to the Laplace equation, we have derived a generalized Miyamoto-Nagai potential. By means of the nonlinear least square fitting, the analytical velocity curves were adjusted to the observed ones of three specific spiral galaxies: NGC 3726, NGC 3877 and NGC 4010. The resulting analytical models were used to determine the mass-density distributions and the vertical and epicyclic frequencies, showing that unlike the results presented in **González et al.** (2010) for NGC 3877 and NGC 4010, our models satisfy the stability conditions for radial and vertical perturbations. Even though the set of models presented here should be considered as a rough approximation, the circular velocities were shown to fit very accurately to the observed rotation curves and in the three cases the stability conditions were fully satisfied. Here, it is important to note that contrary to the observed tendency in the Miyamoto-Nagai model, where the limit $a \rightarrow 0$ reduces to the Plummer sphere, our models exhibit a tendency to an spherical mass distribution with increasing of the parameter a .

On the other hand, by using the Poincaré section method we have also studied the dynamics of the meridional orbits of stars in presence of the gravitational field of the galaxy models. From our results it may be inferred that there exists an increase in the regularity of the orbits for larger values of the angular momentum, while for larger values of energy the orbits tend to be more chaotic. Our toy models suggest that in the three galaxy models chaotic orbits are possible, however the chaotic behavior is very weak for the NGC 3877 model in comparison to NGC 3726 and NGC 4010. It should be noted that none of the studied models showed a fully chaotic phase space. Our results could have significant implications for the study of the dynamics and kinematics of these three specific galaxies, since the regular or chaotic behaviors could shed lights into the evolution and structure of these galaxies, i.e., in phase space, regular orbits are trapped in the vicinity of neighbor orbits, while chaotic orbits, by its own nature, will diverge exponentially in time from its neighbors by filling the phase space in an erratic manner.

Acknowledgments

We would like to thank the anonymous referees for their useful comments and remarks, which improved the clarity and quality of the manuscript. FLD, SMM and GAG gratefully acknowledges the financial support provided by COLCIENCIAS (Colombia) under Grants No. 8840 and 8863.

Authors' contributions

All authors make substantial contributions to conception, design, analysis and interpretation of data. All authors participate in drafting the article and reviewed the final manuscript.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

- Binney, J. and Tremaine, S.** (2011). Galactic dynamics. Princeton university press.
- Bountis, T., Manos, T. and Antonopoulos, C.** (2012). Complex statistics in Hamiltonian barred galaxy models. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 113(1), 63-80.
- Caranicolas, N. D.** (1996). The structure of motion in a 4-component galaxy mass model. *Astrophysics and Space Science*, 246(1), 15-28.
- Caranicolas, N. D. and Papadopoulos, N. J.** (2003). Chaotic orbits in a galaxy model with a massive nucleus. *Astronomy & Astrophysics*, 399(3), 957-960.
- Contopoulos, G.** (1979). Stochastic behavior in classical and quantum Hamiltonian systems, G. Casati and J. Ford Eds., p. 1-17.
- Dehnen, W.** (1993). A family of potential-density pairs for spherical galaxies and bulges. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 265(1), 250-256.
- Dubeibe, F. L. and Bermúdez-Almanza, L. D.** (2014). Optimal conditions for the numerical calculation of the largest Lyapunov exponent for systems of ordinary differential equations. *International Journal of Modern Physics C*, 25(07), 1450024.
- Dubeibe, F. L., Riaño-Doncel, A., and Zotos, E. E.** (2018). Dynamical analysis of bounded and unbounded orbits in a generalized Hénon-Heiles system. *Physics Letters A*, 382(13), 904-910.
- González, G. A., Plata-Plata, S. M. and Ramos-Caro J.** (2010). Finite thin disc models of four galaxies in the Ursa Major cluster: NGC 3877, NGC 3917, NGC 3949 and NGC 4010. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 404(1), 468-474.
- Greiner, J.** (1987). A new kind of stellar orbit in a galactic potential. *Cel. Mech.* 40, 171.
- Hernquist, L.** (1990). An analytical model for spherical galaxies and bulges. *The Astrophysical Journal*, 356, 359-364.
- Jaffe, W.** (1983). A simple model for the distribution of light in spherical galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 202(4), 995-999.
- Lees, J. F. and Schwarzschild, M.** (1992). The orbital structure of galactic halos. *The Astrophysical Journal*, 384, 491-501.
- Lindblad, P. O.** (1960). *Stockholm Obs. Ann.* 21, No. 3-4.
- Long, K., Murali, C.** (1992). Analytical potentials for barred galaxies. *The Astrophysical Journal*, 397, 44-48.
- Manabe, S.** (1979). Applicability of approximate third integral of motion for stellar orbits in the galaxy. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 31, 369-394.
- Manos, T. and Athanassoula, E.** (2011). Regular and chaotic orbits in barred galaxies-I. Applying the SALI/GALI method to explore their distribution in several models. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 415(1), 629-642.
- Manos, T., Bountis, T. and Skokos, C.** (2013). Interplay between chaotic and regular motion in a time-dependent barred galaxy model. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 46(25), 254017.
- Maoz, D.** (2016). *Astrophysics in a Nutshell: Second Edition.* Princeton university press.
- Martinet, L. and Mayer, F.** (1975). Galactic orbits and integrals of motion for stars of old galactic populations. III-Conclusions and applications. *Astronomy and Astrophysics*, 44, 45-57.
- Miyamoto, M. and Nagai, R.** (1975). Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 27, 533-543.
- Satoh, C.** (1980). Dynamical models of axisymmetric galaxies and their applications to the elliptical galaxy NGC4697. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 32, 41.
- Verheijen, M. A. W. and Sancisi, R.** (2001). The Ursa Major cluster of galaxies-IV. HI synthesis observations. *Astronomy & Astrophysics*, 370(3), 765-867.
- Vogt, D. and Letelier, P. S.** (2005). On multipolar analytical potentials for galaxies. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 57(6), 871-875.
- Zotos, E. E.** (2012). Exploring the nature of orbits in a galactic model with a massive nucleus. *New Astronomy*, 17(6), 576-588.
- Zotos, E. E. and Caranicolas, N. D.** (2013). Revealing the influence of dark matter on the nature of motion and the families of orbits in axisymmetric galaxy models. *Astronomy & Astrophysics*, 560, A110.
- Zotos, E. E.** (2014). Classifying orbits in galaxy models with a prolate or an oblate dark matter halo component. *Astronomy & Astrophysics*, 563, A19.
- Zotos, E. E., Riaño-Doncel, A., and Dubeibe, F. L.** (2018). Basins of convergence of equilibrium points in the generalized Hénon-Heiles system. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 99, 218-228.

Determinación de la velocidad de traslación del vórtice anular mediante expansión multipolar

Jeasson F. González

Facultad de Ciencias y Educación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

Resumen

Se estableció analíticamente el campo de velocidad inducido por un vórtice anular de relación de aspecto pequeña (r_1/r_0 donde r_0 es el radio de la línea central del vórtice y r_1 el radio de su sección transversal), con el objeto de establecer la velocidad de traslación, $\Gamma/4\pi r_0[\log(8r_0/r_1) - 1/4]$, de un vórtice anular con circulación Γ . El campo inducido fue obtenido por la ley de Biot-Savart mediante el método de expansión multipolar, y la traslación fue determinada por la comparación entre los campos obtenidos y la condición material que se satisface sobre la superficie del vórtice. La formulación presentada resulta alternativa respecto a otros métodos ya utilizados para este propósito; sin embargo su ventaja radica en la posibilidad de implementarlo a estructuras vorticales más complejas. La solución encontrada muestra que la velocidad de traslación clásicamente reportada corresponde a una solución de primer orden en el método de expansión multipolar, orden correspondiente a los efectos que la curvatura del vórtice tiene sobre la distribución de vorticidad en su sección transversal. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Velocidad de traslación; Vórtice anular; Expansión multipolar.

Determination of translational velocity of the ring vortex using multipolar expansion

Abstract

The velocity field of a vortex ring is established considering a small aspect ratio (r_1/r_0 , where r_0 is the radius of the vortex central line and r_1 is the radius of cross section), for the purpose of finding the translation velocity, $\Gamma/4\pi r_0[\log(8r_0/r_1) - 1/4]$, of the ring vortex with circulation Γ . The induced field is calculated through the Biot-Savart law using a multipole expansion; thus the translation velocity is determined by means of the comparison between the derived field and the substantial condition on the vortex surface. The formulation presented in this work is an alternative to the conventional methods in vortex dynamics. However, it offers an advantage related to the study of more complex vortical structures. The achieved results show that the translation velocity corresponds to the first order solution of the multipole expansion; which concerns curvature effects on the vorticity distribution of the cross section. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

key words: Translational velocity; Ring vortex; Multipolar expansion.

Introducción

El estudio de los flujos vorticales obtuvo algunas de sus principales contribuciones con las investigaciones de Helmholtz (1858), donde se establece la existencia de estos flujos al plantear la imposibilidad que tiene un fluido acotado bajo la condición de impenetrabilidad del contorno de ser un flujo potencial. En su trabajo, Helmholtz, además de establecer los principales teoremas que satisfacen las regiones con vorticidad, caracteriza el movimiento de un filamento anular. Las conclusiones de Helmholtz se desarrollan basadas en la constancia de la energía; empero, ninguna expresión analítica fue suministrada.

El interés por las estructuras vorticales se intensificó, tras la sugerencia de **W. Thomson (Lord Kelvin)** (1867) de suponer que los vórtices anulares en el éter correspondían con los verdaderos átomos. Sugerencia que fue des-

estimada tras el posterior éxito de los modelos atómicos de J.J. Thomson, E. Rutherford y N. Bohr. No obstante, aún la teoría de vórtices es parte fundamental, no solo de la teoría hidrodinámica, sino del estudio de la generación del sonido como indica **Muller** (1988), y los fenómenos de transporte y mezcla como indica **Mungal** (1984).

Tras las conclusiones de Helmholtz sobre el movimiento de filamentos anulares, **W. Thomson** (1867) establece, sin demostración, a partir de primeros principios, la primera expresión analítica de la velocidad de traslación, $\Gamma/4\pi r_0[\log(8r_0/r_1) - 1/4]$, para un vórtice anular de radio de línea central r_0 , radio de sección transversal r_1 y con circulación Γ , suponiendo en la sección

Correspondencia:

Jeasson F. González; jeassongonzalez@hotmail.com

Recibido: 11 de diciembre de 2018

Aceptado: 18 de febrero de 2019

Editor: Gabriel Téllez Acosta

transversal una distribución lineal de vorticidad, debido a la curvatura del vórtice. Para el mismo vórtice anular estudiado por W. Thomson, **J.J. Thomson** (1883) establece un método analítico, - importante en el estudio aquí presentado- con el cual determina la velocidad de traslación, $\Gamma/4\pi r_0[\log(8r_0/r_1) - 1]$, para el vórtice anular. La diferencia entre ambos resultados radica en que el método desarrollado por J.J. Thomson considera, en primer lugar, un vórtice delgado con una distribución de vorticidad uniforme en su sección transversal; omitiendo así los efectos que la curvatura tiene sobre dicha distribución y, en segundo lugar, establece la velocidad de traslación resolviendo explícitamente la ley de Biot-Savart, para su evaluación posterior en la autoinducción presente. Otras investigaciones clásicas que calculan la velocidad de traslación bajo la consideración de distribución de vorticidad uniforme en la sección transversal del vórtice se encuentran en los trabajos de **Lewis** (1879) y **Joukovskii** (1907).

El primer método analítico para calcular la velocidad de traslación de vórtices anulares que considera una distribución lineal en la sección transversal del vórtice, fue desarrollado por Hicks (1885); en el método se emplea la función de corriente de Stokes, expresada en términos de armónicos toroidales (soluciones de las ecuaciones de Laplace para un dominio toroidal). Otros métodos reportados para la misma distribución se encuentran en los trabajos de **Dyson** (1893), **Gray** (1914) y **Basset** (1961).

La teoría de los vórtices anulares ha dado origen a un gran número de investigaciones, no solamente referidas al problema de la traslación. Por ejemplo, en términos observacionales y experimentales los vórtices anulares han concentrado los esfuerzos de muchos hombres de ciencia. **Velasco Fuentes** (2014) relata las primeras observaciones y experimentos sobre la interacción, formación y reconexión asociadas a vórtices anulares; temas que han sido áreas activas de investigación durante las últimas dos décadas. Otras propiedades de los vórtices anulares también han sido estudiadas teórica y experimentalmente por **Lamb** (1932), **Norbury** (1973), **Kambe & Oshima** (1975), **Saffman** (1992) y **Shariff & Leonard** (1992) donde se discuten propiedades del vórtice anular como su circulación, impulso, energía cinética e incluso su evolución, desde su generación hasta decaimiento bajo efectos de la viscosidad. Numéricamente, importantes desarrollos han sido reportados con el fin de visualizar y ratificar las propiedades teóricamente obtenidas y encontrar unas nuevas como puede verse en las investigaciones de **Stanaway** (1988), **Mohseni & Ghatib** (1998), **Kaplanskii & Rudi** (1999), **Fukumoto & Moffat** (2000) y **Fukumoto & Kaplanskii** (2008). La extensión y el estado del arte asociado al problema general de los vórtices anulares son tan amplias, que para un esquema más detallado sería necesario remitirnos a **V.V. Meleshko** (2012). En esta sección solo se pretende mostrar el estado del arte acerca de las distribuciones de vorticidad más relevantes -a juicio del autor-

que han sido consideradas históricamente en el cálculo de la velocidad de traslación de vórtices anulares.

Es de notar cómo el problema de la traslación de vórtices anulares y sus métodos, ha sido investigado por más de un siglo. Sin embargo, la extensión de estos métodos a estructuras vorticales más complejas en general se encuentra limitada por la especial simetría que presentan los vórtices anulares.

En este estudio se presenta un método para determinar la velocidad de traslación de vórtices anulares, aplicable a estructuras más complejas. Así, en la sección II se formulará el modelo matemático, el campo de velocidad inducido y la velocidad de traslación del vórtice anular, en la sección III se realizará la discusión de los resultados encontrados y en la sección IV se concluirán las ventajas que presenta el modelo teórico empleado.

Traslación de un vórtice anular

La traslación de un vórtice anular se da como consecuencia de los efectos de autoinducción que tiene la distribución de vorticidad del vórtice sobre sí mismo. Dicho efecto puede ser determinado a partir del campo de velocidad asociado al vórtice, el cual se calcula desde el potencial vectorial asociado a la ley de Biot-Savart, bajo la condición de que todas las variables físicas sean continuas en todo el espacio. Así, los campos de velocidad no solo dependerán de la distribución interna de vorticidad sino también de su geometría.

En la Figura 1 se presentan los parámetros que caracterizan la configuración investigada, correspondientes al vórtice anular; en lo que sigue se presenta el método de expansión multipolar utilizado para conocer el campo de velocidad de la configuración en cualquier punto circundante al vórtice anular.

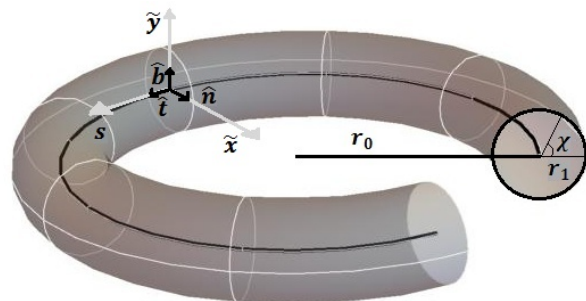


Figura 1: Representación geométrica de un vórtice anular con radio de la línea central r_0 , radio de sección transversal del vórtice respecto a la línea central r_1 y χ el ángulo en la sección transversal del vórtice. Adicionalmente, se ilustra el sistema coordenado local de Frenet-Serret $(\tilde{x}, \tilde{y}, s)$ con sus correspondientes vectores unitarios \hat{t} (tangente), \hat{n} (normal) y \hat{b} (binormal).

Método de expansión multipolar

El método de expansión multipolar es entendido como el desarrollo en serie de potencias del potencial vectorial, $\mathbf{A}(\mathbf{x})$, asociado a la ley de Biot-Savart en términos del parámetro de relación de aspecto, que determina el grosor transversal del vórtice. En este método el vórtice se encuentra descrito en términos de un sistema coordenado local, como indica **Callegari** (1978), que permite conocer los efectos del vórtice, independientemente de su movimiento, en el medio.

El cálculo del campo de velocidad inducido por la región con vorticidad se determina indirectamente, calculando el rotacional del potencial vectorial. Para esto, primero se realiza la expansión multipolar del potencial vectorial asociado, $\mathbf{A}(\mathbf{x})$, el cual se define como

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \int \frac{\boldsymbol{\omega}(\mathbf{x}')}{|\mathbf{x}-\mathbf{x}'|} dV'(\mathbf{x}'). \quad (1)$$

sujeito a la condición de normalización, $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$, relacionada con el flujo nulo de vorticidad en la superficie del vórtice. Donde $\boldsymbol{\omega}$ es la vorticidad, \mathbf{x}' es la posición sobre la cual se distribuye la vorticidad en el espacio, y \mathbf{x} la posición exterior al vórtice donde se manifiestan los efectos inductivos del vórtice.

Para la expansión asintótica del potencial, **Y. Fukumoto & V. L. Okulov** (2005) expresan la posición de un punto dentro del vórtice en un sistema coordenado de Frenet-Serret (entiéndase como un sistema que se mueve con el vórtice y cuyos ejes coordenados son \tilde{x} a lo largo del vector normal, \tilde{y} a lo largo del vector binormal, $\hat{\mathbf{b}}$, y s la longitud de arco a lo largo del vector tangente, $\hat{\mathbf{t}}$, asociados a la línea central del vórtice y desde el cual es posible definir el sistema cilíndrico (r, θ, s) , y con ello re-escribir parte del potencial mediante el operador de desplazamiento de **Dyson** (1893)

$$\exp \left[-\tilde{x}(\hat{\mathbf{n}} \cdot \nabla) - \tilde{y}(\hat{\mathbf{b}} \cdot \nabla) \right] \frac{1}{|\mathbf{x}-\mathbf{X}|} = \frac{1}{|\mathbf{x}-\mathbf{X}(s) - \tilde{x}\hat{\mathbf{n}} - \tilde{y}\hat{\mathbf{b}}|}$$

Donde el vector posición de un punto del vórtice se expresa como $\mathbf{x}' = \mathbf{X}(s) + \tilde{x}\hat{\mathbf{n}} + \tilde{y}\hat{\mathbf{b}}$, con $\mathbf{X}(s)$ la posición de la línea central del vórtice respecto a un sistema fijo. Luego, una expansión en Taylor del operador desplazamiento es posible, donde cada orden retenido en esta expansión representa los diferentes efectos del grosor del vórtice que pueden ser retenidos en el cálculo de la velocidad de traslación del vórtice anular, en este estudio los términos retenidos en la expansión son de hasta primer orden.

Adicionalmente, en la expansión asintótica del potencial vectorial la vorticidad se desarrolla como una serie de Fourier, como indica **Fukumoto** (2000, 2005); donde la componente de vorticidad longitudinal, $\zeta(\tilde{x}, \tilde{y}, s) = \zeta_0 + \zeta_{11}\text{Cos}(\theta) + \zeta_{12}\text{Sin}(\theta) + \zeta_{21}\text{Cos}(2\theta) + \dots$, se consi-

dera dominante por el hecho de que los vórtices anulares no presentan giro. Los coeficientes de la serie de Fourier se determinan mediante la solución de la componente longitudinal (a lo largo de la línea central) de la ecuación de vorticidad de Helmholtz, Ec. (2), para una expansión asintótica en el parámetro $\epsilon = \frac{r_0}{r_1}$ (ver Figura 1), donde resultan los coeficientes dependientes del perfil inicial de velocidad. La expansión asintótica de la ecuación de vorticidad consiste en encontrar los coeficientes de la expansión de Fourier de la componente longitudinal de la vorticidad, $\zeta = \zeta^{(0)} + \epsilon\zeta^{(1)} + \dots$, lo cual se logra solucionando la ecuación de Helmholtz para un fluido incompresible y sin viscosidad,

$$\frac{D\boldsymbol{\omega}}{Dt} = (\boldsymbol{\omega} \cdot \nabla)\mathbf{u}, \quad (2)$$

sin perder de vista que el orden conocido de los coeficientes en la expansión asintótica representa el grado de precisión con el que se deseen modelar los efectos de la distribución de vorticidad, presentes por la existencia del grosor del vórtice y, en general por la geometría del mismo.

Para la componente de vorticidad longitudinal a orden cero se encuentra que; $\zeta^{(0)} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} [rv^{(0)}]$. Donde $v^{(0)}$ corresponde a la componente angular de la velocidad a orden cero, es decir el perfil inicial de la velocidad con el que empieza la traslación el vórtice anular. Para la ecuación de Helmholtz a primer orden, la solución se obtiene a partir de los campos de velocidad dados en términos del potencial vectorial (encontrándose la componente tangencial de la vorticidad expresada en términos de una función de corriente que se obtiene a partir de la ecuación para la componente longitudinal de vorticidad) -el desarrollo de estas soluciones no se hace explícito ya que su extensión y detalle desviarían el artículo de su propósito- para más detalle ver **Fukumoto** (2005) y **Gonzalez** (2013). Así, el coeficiente a primer orden se expresa como $\zeta_{11}^{(1)} = -[\alpha\psi_{11}^{(1)} + r\zeta^{(0)}]$, con $\alpha = \frac{1}{v^{(0)}} \frac{d\zeta^{(0)}}{dr}$ y $\psi_{11}^{(1)} = \Psi_{11}^{(1)} + c_{11}^{(1)}v^{(0)}$, donde $\Psi_{11}^{(1)} = v^{(0)}[\frac{r^2}{2} + \int_0^r \frac{dr'}{r'[v^{(0)}(r')]^2} \int_0^{r'} r'' [v^{(0)}(r'')]^2]$ y $c_{11}^{(1)} = -\frac{5}{8}r_1^2$ valor asignado para el caso en que el origen se encuentre en un punto a lo largo de la dirección normal al vórtice y donde su sección transversal sea simétrica como indica **Fukumoto** (2000). Establecidas las expansiones anteriores y, reteniendo los efectos a primer orden correspondientes a la distribución de vorticidad debido a la curvatura del vórtice, la expresión para el potencial (1) toma la forma:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \mathbf{A}_m(\mathbf{x}) + \mathbf{A}_d(\mathbf{x}) \quad (3)$$

Donde

$$\mathbf{A}_m(\mathbf{x}) = \frac{\Gamma}{4\pi} \int \frac{\hat{\mathbf{t}}(s)}{|\mathbf{x}-\mathbf{X}(s)|} ds \quad (4a)$$

$$\mathbf{A}_d(\mathbf{x}) = \int \left(\frac{\Gamma^{(3)}}{8\pi} [\kappa_s \hat{\mathbf{n}} + \kappa_T \hat{\mathbf{t}}] \right)$$

$$+\kappa d^{(1)} \hat{\mathbf{i}}[\kappa + \hat{\mathbf{n}} \cdot \nabla] \times \frac{1}{|\mathbf{x}-\mathbf{X}(s)|} ds \quad (4b)$$

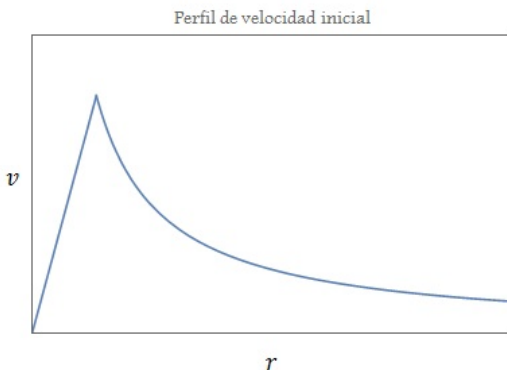
Donde κ y τ son la curvatura y la torsión a lo largo de la línea central, κ_s la derivada de la curvatura del vórtice respecto a la longitud de arco, Γ es la circulación y $d^{(1)} = \frac{1}{4\pi}(Z_{11}^{(1)} - \frac{1}{2}\Gamma^{(3)})$. Siendo, $\Gamma^{(3)} = 2\pi \int_0^\infty r^3 \zeta^{(0)} dr$ y $Z_{11}^{(1)} = 2\pi \int_0^\infty r^2 \zeta_{11}^{(1)} dr$, los momentos de vorticidad en términos de $\zeta^{(0)}$ y $\zeta_{11}^{(1)}$, los coeficientes de vorticidad de orden 0 y 1, respectivamente.

Las ecuaciones anteriores expresan el potencial vectorial \mathbf{A} mediante dos contribuciones principales; \mathbf{A}_m (monopolar) y \mathbf{A}_d (dipolar), para vórtices con relación de aspecto pequeña. La contribución monopolar está referida a los efectos de inducción de un vórtice infinitamente delgado, cuyos efectos por grosor son ausentes, mas los de forma no. De otra parte, la contribución dipolar hace referencia a los efectos de inducción debidos a la reorganización de la vorticidad en el interior del vórtice como consecuencia del estiramiento y doblamiento del mismo, por la presencia de la curvatura y la torsión en la Ec.(4b), reconociéndose como efectos propios del grosor del vórtice.

Campos de velocidad

El campo de velocidad asociado a la distribución de vorticidad del vórtice anular es, por definición, como indica **Bachelort** (2000) $\mathbf{u} = \nabla \times \mathbf{A}$. El cálculo del campo de velocidades se obtiene explícitamente una vez que se establece el perfil inicial de vorticidad, $\zeta^{(0)}$, el cual se toma constante, correspondiente al perfil inicial de velocidad (ver Figura 2)

$$v^{(0)} = \begin{cases} \frac{\Gamma}{2\pi r_1^2} r & \text{if } r \leq r_1 \\ \frac{\Gamma}{2\pi r} & \text{if } r > r_1, \end{cases}$$



con esto, el coeficiente de vorticidad a orden uno es

$$\zeta_{11}^{(1)} = \begin{cases} \frac{-\Gamma}{\pi r_1^2} r & \text{if } r \leq r_1 \\ 0 & \text{if } r > r_1 \end{cases}$$

y por tanto, los momentos de vorticidad quedan expresarlos como

$$\Gamma^{(3)} = \frac{\Gamma}{2} r_1^2 ; d^{(1)} = -\frac{3}{16\pi} \Gamma r_1^2. \quad (5)$$

Además de la distribución de vorticidad, también la geometría es fundamental en la determinación de las contribuciones monopolar, \mathbf{A}_m , y dipolar, \mathbf{A}_d , como se deduce de las Ecs. (4a) y (4b). Para el caso del vórtice anular la geometría es caracterizada por

$$\hat{\mathbf{t}} = -\sin \theta \hat{\mathbf{i}} + \cos \theta \hat{\mathbf{j}} \quad \text{tangente unitario} \quad (6a)$$

$$\hat{\mathbf{n}} = -\cos \theta \hat{\mathbf{i}} - \sin \theta \hat{\mathbf{j}} \quad \text{normal unitario} \quad (6b)$$

$$\hat{\mathbf{b}} = \hat{\mathbf{k}} \quad \text{binormal unitario} \quad (6c)$$

$$\kappa = \frac{1}{r_0} \quad \text{curvatura} \quad (6d)$$

$$\tau = 0 \quad \text{torsión} \quad (6e)$$

La traslación de un vórtice anular es establecida respecto a la componente de velocidad vertical al plano de la configuración, w . Esta componente, propia de la inducción, se calcula reteniendo los efectos que la forma (en la contribución monopolar) y el grosor (en la contribución dipolar) tienen en la evolución del vórtice. A partir de la geometría anteriormente dada, se establece $\mathbf{A}_m(\mathbf{x})$ y $\mathbf{A}_d(\mathbf{x})$, donde $w = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}$. El cálculo explícito de w como de las otras componentes del campo de velocidad son desarrolladas, para el vórtice anular, por **Jeasson F. Gonzalez**

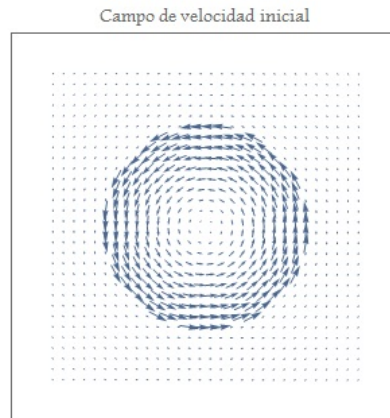


Figura 2: Perfil de velocidad inicial a orden cero (panel izquierdo). Representación vectorial del perfil de velocidad, a orden cero, de una sección transversal del vórtice anular (panel derecho).

(2013). Encontrándose para las contribuciones monopolar, w_m , y dipolar, w_d , de la componente de la velocidad w las siguientes expresiones integrales:

$$w_m = \frac{\Gamma}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r_0^2 - r_0(x \cos \theta + y \sin \theta)}{[q - 2r_0r \cos(\phi - \theta)]^{\frac{3}{2}}} d\theta \quad (7a)$$

$$w_d = \frac{3\Gamma}{32\pi} \frac{r_1^2}{r_0^2} \int_0^{2\pi} \frac{2r_0^2 - r_0(x \cos \theta + y \sin \theta)}{[q - 2r_0r \cos(\phi - \theta)]^{\frac{3}{2}}} d\theta \quad (7b)$$

Donde las cordenadas (r_0, θ, z') corresponden a un punto sobre el vórtice anular, las coordenadas (r, ϕ, z) a un punto arbitrario fuera del vórtice y $q = r^2 + r_0^2 + (z - z')^2$.

Para desarrollar las integrales (7a) y (7b) se realizará la siguiente expansión en Fourier,

$$\frac{1}{[q' - \cos \beta]^{\frac{3}{2}}} = c_0 + c_1 \cos \beta + c_2 \cos 2\beta + \dots + c_n \cos n\beta \quad (8)$$

con

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{(rr_0)^{\frac{3}{2}}} \left[\frac{2}{x} - (n^2 - \frac{1}{4}) \log 16 \frac{2+x}{x} - 4f(n) - (n^2 + \frac{3}{4}) \right].$$

Donde $q' = \frac{q}{2rr_0}$, $\beta = \phi - \theta$, $x = \frac{(r-r_0)^2 + (z-z')^2}{2rr_0}$, $\frac{2+x}{x} = \frac{(r+r_0)^2 + (z-z')^2}{(r-r_0)^2 + (z-z')^2}$ y $f(n) = 1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{5} + \dots + \frac{1}{2n+1}$.

Obteniéndose para las contribuciones monopolar y dipolar las expresiones

$$w_m = \frac{\Gamma}{4(2rr_0)^{\frac{3}{2}}} (2c_0r_0^2 - rr_0c_1) \quad (10a)$$

$$w_d = \frac{3\Gamma}{32} \frac{r_1^2}{(2rr_0)^{\frac{5}{2}}} (8rr_0c_0 - 2r^2c_1) \quad (10b)$$

luego, el campo inducido total queda expresado como la superposición de las contribuciones monopolar, (10a), y dipolar, (10b), tal que

$$w = w_m + w_d. \quad (11)$$

La expresión encontrada, compuesta de dos términos, permite distinguir la naturaleza de las contribuciones a la traslación de un vórtice anular por medio de la autoinducción; primero, w_m , resalta la contribución que tiene la forma del vórtice y, segundo, w_d , la contribución que se tiene por el grosor del vórtice.

Velocidad de traslación

Para determinar la traslación del vórtice anular se sigue la consideración clásica de que la superficie del vórtice es una superficie material. Luego, los cambios en el tiempo de la superficie del vórtice coinciden con el campo de velocidad evaluada en la superficie del mismo, hecho que es de esperarse ya que la traslación del vórtice se origina por medio de un proceso de autoinducción. La determinación

de la velocidad vertical de la superficie material del vórtice se establece como sigue: primero se determina la geometría de la superficie (ver Figura 1), la cual se expresa como

$$\rho = r_0 + r_1 \cos \chi \quad (12a)$$

$$z = \varsigma + r_1 \sin \chi \quad (12b)$$

donde ς es la altura del plano sobre el cual yace el vórtice anular; segundo, se determina por diferenciación respecto del tiempo de (12b) la velocidad vertical de la superficie material. La cual queda definida como

$$w = \frac{dz}{dt} = \frac{d\varsigma}{dt} + r_1 \cos \chi \dot{\chi}. \quad (13)$$

Con lo que se hacen evidentes dos contribuciones, independientes a la velocidad vertical. La primera propia de la traslación del vórtice, evidenciada en el primer término de la Ec. (13), y la segunda, evidenciada en el segundo término, debida a los efectos de rotación internos al vórtice.

Por otra parte, la evaluación del campo inducido sobre la superficie material es establecida teniendo en cuenta las siguientes relaciones

$$r = \rho \quad ; \quad z - z' = r_1 \sin \chi \quad ; \quad x = \frac{r_1^2}{2r_0^2}$$

Así, los coeficientes de Fourier, tal como se deduce de la Ecs. (8) y (9), pueden ser escritos como

$$2c_0 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left[\frac{4r_0^2}{r_1^2} + \frac{1}{4} \log \frac{64r_0^2}{r_1^2} - \frac{3}{4} \right] \quad (14a)$$

$$c_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left[\frac{4r_0^2}{r_1^2} - \frac{3}{4} \log \frac{64r_0^2}{r_1^2} + \frac{5}{4} \right] \quad (14b)$$

Donde se ha tomado a $f(0) = 0$ y a $f(1) = 1$.

Para la velocidad de traslación del vórtice se realiza la comparación entre los resultados de la Ec. (13) y la Ec. (11) con los coeficientes de Fourier (14a) y (14b). Omitiéndose en (13) el término $\dot{\chi}$ ya que se supone que el vórtice no tiene giro como indica **Moffatt** (1988). Por todo lo anterior, se encuentra para la velocidad de traslación del vórtice la expresión

$$\frac{d\varsigma}{dt} = \frac{\Gamma}{4\pi r_0} \left(\log \frac{8r_0}{r_1} - 1 \right) + \frac{\Gamma}{4\pi r_0} \frac{3}{4}. \quad (15)$$

De este modo, la velocidad de traslación del vórtice anular se expresa como la suma de las contriuciones monopolar y dipolar en el primer y segundo término del lado derecho de la Ec. (15) respectivamente. La primera propia de la forma del vórtice y la segunda correspondiente al efecto que tiene la distribución de vorticidad por la curvatura del vórtice, con lo que se considera el efecto que tiene el grosor en el vórtice.

Discusión

La expresión (15) resalta como el primer término a la derecha resulta ser la contribución a la traslación debida al efecto puramente monopolar (equivalente al resultado de Thomson 1883). Donde se considera el promedio de la vorticidad en la sección transversal del vórtice concentrada a lo largo de su línea central.

Por otra parte, el segundo término a la derecha de (15) representa la contribución a la traslación debida al efecto dipolar. La cual tiene en cuenta la distribución de vorticidad en la sección transversal del vórtice, debido a los efectos de curvatura del mismo. Finalmente, la suma de ambas contribuciones, resulta en la expresión

$$\frac{d\zeta}{dt} = \frac{\Gamma}{4\pi r_0} \left(\log \frac{8r_0}{r_1} - \frac{1}{4} \right) \quad (16)$$

que equivale al resultado de **Kelvin** (1867), para la traslación del vórtice anular. La importancia del resultado presentado en este estudio, más que la obtención correcta de la expresión analítica (16), es la interpretación física asociada a cada término de (15). Adicionalmente, es importante notar como a partir de la consideración inicial de una distribución de vorticidad uniforme, el resultado del método de expansión multipolar concuerda con el modelo de Kelvin; para el cual la distribución de vorticidad lineal era considerada como una condición inicial estacionaria como indica **Fukumoto** (2000).

Conclusiones

Se investigó mediante un método analítico alternativo, los efectos que el grosor de un vórtice anular tiene para la traslación del mismo. Encontrándose que en la contribución del grosor, recae la redistribución de vorticidad en la sección transversal del vórtice debido a la curvatura del mismo, como se evidencia en la expresión que define al potencial dipolar, \mathbf{A}_d , en la Ec. (4b). Además, el efecto del grosor hace al vórtice anular más veloz que cuando se considera a éste con una distribución de vorticidad uniforme, propia del efecto monopolar donde se omite la contribución del grosor, lo cual se verifica desde la contribución que tiene el segundo término al lado derecho de (15).

La ventaja que recae sobre el método presentado radica en el hecho de que es igualmente válido a la hora de aplicarse sobre estructuras vorticales más complejas, como son por ejemplo los vórtices anudados o helicoidales, una vez que pueda determinarse de modo analítico la geometría de la estructura vortical.

Los campos de velocidad asociados con el vórtice se encontraron siguiendo el método de expansión multipolar para la ley de Biot-Savart y se evaluaron para efectos de traslación siguiendo el método de J.J. Thomson. La solución encontrada, Ec. (16), corresponde al resultado clásico

ya reportado por **W. Thomson** (1867); sin embargo, permite discutir de manera más profunda la interpretación del mismo mediante los efectos monopoles y dipolares. Así, el método presentado tiene como ventaja la capacidad de distinguir la naturaleza de los efectos que contribuyen a la velocidad de traslación de vórtices anulares y, mas ampliamente, de estructuras vorticales mas complejas.

Para una aproximación de primer orden en r_1/r_0 en la expansión multipolar de la ley de Biot-Savart, se obtuvo que el campo inducido asociado al vórtice de interés, se encuentra influenciado principalmente por dos aspectos; el primero, la geometría del vórtice, el segundo, la distribución de vorticidad en la sección transversal del vórtice debido a la curvatura del mismo.

Lo anterior aclara la relación entre la distribución de vorticidad -asumida en la sección transversal de los vórtices- y el grado de precisión de la descripción empleada. Ya que aunque la distribución uniforme y lineal resultan ser distribuciones independientes, correspondientes a efectos dominantes de órdenes de importancia diferentes, su superposición resulta ser solo una aproximación del perfil real de la distribución de vorticidad en la sección transversal del vórtice. Con esto la distribución de vorticidad en la sección transversal de un vórtice no es impuesta arbitrariamente según la complejidad que quiera considerarse, sino que corresponde directamente con el número de efectos que quieran tenerse en cuenta en la evolución del vórtice, debidos esencialmente, a la geometría (forma) del mismo; esto es, los efectos que tiene su curvatura, su torsión y su grosor en la evolución del vórtice.

Agradecimientos

Agradezco a mi director de tesis de maestría en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Oscar Velasco Fuentes, por sus importantes comentarios y sugerencias durante el desarrollo de este estudio. Además, se agradece a CONACyT por apoyar financieramente al autor mediante una beca para estudios de maestría.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses con respecto al contenido de este artículo original

Referencias

- Bachelort G.K.** (2000). An introduction to fluid dynamics. Cambridge. Cambridge University Press. Ed.1.
- Basset A.B.** (1961). A treatise on hydrodynamics. New York. Dover Publications. Ed. 1.
- Callegari A. J. and Ting L.** (1978). Motion of a curved vortex filament with decaying vortical core and axial velocity. *SIAM J. App. Math.* **35**: 148.

- Dyson F.W.** (1893). The potential of an anchor ring. Part II. *Phil. Trans. Roy. Soc. London A.* **184**: 1041-1106.
- Fukumoto Y. and Moffatt H.K.** (2000). Motion and expansion of a viscous vortex ring. Part I. **417**: 1-45.
- Fukumoto Y. and Kaplanskii F.** (2008). Global time evolution of an axisymmetric vortex ring at low Reynolds number. *Phys. of Fluids.* **20**: 053103.
- Fukumoto Y. and Okulov V.L.** (2005). The velocity field by a helical vortex tube. *Phys. of Fluids.* **17**: 107101 1-19.
- Gray A.** (1914). Notes on hydrodynamics. *Phil. Mag (ser 6).* **28**: 1-18.
- Helmholtz H.** (1858). *Über Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen.* *Z. Reine Angew Math.* **55**: 25-55.
- Jeasson F. Gonzalez.** (2013). Cálculo analítico de la velocidad de traslación de vórtices eslabonados. M.S. thesis. Dept. Oceanografía, Ensenada B.C. CICESE
- Joukovskii N.E.** (1907). A note on the motion of vortex ring. *Mat. Sbor.* **2**: 483-490.
- Kambe T. and Oshima Y.** (1975). Generation and decay of viscous vortex ring. *J. Phys. Soc. Jpn.* **38**: 271-280.
- Kaplanski F. and Rudi U.** (1999). Dynamics of a viscous vortex ring. *Intl. J. Fluid Mech. Res.* **26**: 618-630.
- Lamb H.** (1932). "Vortex motion", in *Hydrodynamics.* pp 226-234. London. Dover Publications. Ed. 4.
- Lewis T.C.** (1879). On the images of vortices in a spherical vessel. *Quart. J. Pure Appl. Math.* **16**: 338-347.
- Meleshko V.V., Gourjii A. and Krasnopolskaya Tatyana S.** (2012). Vortex ring: History and state of the art. *J. Math. Sci.* **187**: 772-808.
- Moffatt H.K.** (1988). Generalised vortex rings with and without swirl. *Fluid Dyn. Res.* **3**: 22-30
- Mohseni and Ghatib K. M.** (1998). A model for universal time scale of vortex ring formation. *Phys. Fluids.* **10**: 2436-2438.
- Muller E.A., and Obermeier F.** (1988). Vortex sound. *Fluid Dyn. Res.* **3**: 43-51.
- Mungal M., and Dimotakis P.E.** (1984). Mixing and combustion with low heat release in a turbulent shear layer. *J. Fluid Mech.* **148**: 349-382.
- Norbury J.** (1973). A family of steady vortex rings. *J. Fluid Mech.* **57**: 417-431.
- Saffman P.G.** (1992). *Vortex Dynamics.* London. Cambridge University Press.
- Shariff K., and Leonard A.** (1992). Vortex rings. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **24**: 235-279
- Stanaway S., Cantwel B.J. and Sparlart P.R.** (1988). A numerical study of a forming vortex ring using a spectral method. *Tech. Memo.* 101041
- Thomson W.** (1867). The translatory velocity of a circular vortex ring. *Phil. Mag. (ser 4).* **34**: 511-512.
- Thomson J.J.** (1883). "Part I", en *A Treatise on the Motion of Vortex Rings.* pp. 3-36. London. Macmillan. Ed. 1.
- Velasco Fuentes O.U.** (2014). Early observations and experiments on ring vortices. *Eurp. J. Mech. B.* **43**: 166-171

Patrón de actividad diaria y de temperaturas ambientales y microambientales en una población de la lagartija endémica colombiana *Anolis huilae* (Squamata, Dactyloidae)

David Alfonso Bejarano-Bonilla*, Manuel Hernando Bernal-Bautista

Grupo de Herpetología, Ecofisiología y Etología, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

Resumen

La determinación del patrón de actividad de una especie, especialmente si es endémica o está amenazada, es valiosa para un programa de conservación efectivo. En este estudio se reporta el patrón de actividad diaria de una población de *Anolis huilae* y su relación con las temperaturas ambientales y microambientales. El trabajo se llevó a cabo con una población del municipio de Ibagué, Colombia, durante el 2017 y en su curso se registraron el número de animales activos cada hora desde las 6:00 hasta las 18:00 horas, así como las temperaturas ambientales y microambientales. Se encontró que la actividad de *A. huilae* era mayor en las horas del mediodía, entre las 12:00 y las 14:00 horas, cuando las temperaturas ambientales y microambientales son las más altas del día. Este resultado concuerda con el comportamiento de otras especies de *Anolis*, pero contradice otros estudios en lagartos en los cuales se reporta una menor actividad en las horas del mediodía. La diferencia entre los resultados mencionados podría atribuirse al hábitat de estas especies, ya que *A. huilae* vive principalmente en lugares boscosos protegidos de la radiación directa del sol, en tanto que las otras especies habitan principalmente áreas abiertas. Por lo tanto, es posible que la relación entre la cobertura del hábitat y la exposición a la radiación solar influya en el patrón de actividad diaria de los lagartos. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: *Anolis huilae*; Comportamiento; Fisiología térmica; Lagartijas; Patrón de actividad; Temperatura.

Daily activity pattern and environmental and microenvironmental temperatures in a population of the Colombian endemic lizard *Anolis huilae* (Squamata, Dactyloidae)

Abstract

The identification of the activity pattern of a species, especially if it is endemic or threatened, is valuable information for an effective conservation program. This research reports the daily activity pattern of a population of *Anolis huilae* and its relationship with the environmental and micro-environmental temperatures. The work was performed within a population of the municipality of Ibagué, Colombia, during 2017, in which the number of active animals was recorded every hour from 6:00 to 18:00 hours together with the environmental and micro-environmental temperatures. We found that *A. huilae* is more active at midday, between 12:00 and 14:00 hours, when the environmental and micro-environmental temperatures are the highest. This finding agrees with the behavior of some *Anolis* species but disagrees with other studies in lizards that report a lower activity at midday when the highest environmental temperatures are recorded. The difference between these results may be attributed to the habitat of the species since *A. huilae* lives in forest places protected from the direct radiation of the sun, while the other species live mainly in open areas. Therefore, it is possible that the relationship between habitat coverage and exposure to solar radiation influences the daily activity pattern in lizards. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Activity pattern; *Anolis huilae*; Behavior; Lizards; Temperature; Thermal physiology.

Introducción

La actividad de un animal es un concepto amplio; sin embargo, en estudios herpetológicos está asociada a movimientos para escapar de los depredadores y buscar alimento, pareja reproductiva o sitios para regular su temperatura (Gibbons & Semlitsch, 1987). Por otra parte, el intervalo de tiempo en que los ectotermos son activos depende del clima, la intensidad de la luz solar, la duración del fotoperiodo,

la temperatura ambiental y el horario de actividad de sus presas (Díaz & Cabezas-Díaz, 2004). Específicamente, las variaciones en la actividad temporal, sea diaria o estacional, así como en el uso del microhábitat, son fundamentales para

*Correspondencia:

David Alfonso Bejarano Bonilla; trumandavid0101@gmail.com

Recibido: 3 de agosto de 2018

Aceptado: 11 de enero de 2019

Editor: Martha Patricia Ramírez Pinilla

la termorregulación en ectotermos (Carretero & Llorente, 1993; Hanato, *et al.*, 2001), que es una característica fisiológica y de comportamiento fundamental para el desempeño óptimo de este grupo de animales.

Se considera que las especies ectotérmicas de hábitats boscosos tropicales son vulnerables al cambio climático, en especial a los incrementos de las temperaturas ambientales, ya que viven en áreas con mayor cobertura vegetal, no están adaptadas a las altas temperaturas de los ambientes abiertos y presentan pocas opciones de comportamiento para evadir las temperaturas altas (Tewksbury, *et al.*, 2008). Además, el rango de temperatura para su desempeño óptimo es estrecho (Tewksbury, *et al.*, 2008; Huey, *et al.*, 2009; Sinervo, *et al.*, 2010; Huey, *et al.*, 2012), por lo que las alteraciones en la temperatura ambiental pueden conducir a la disminución de su eficacia biológica (Tewksbury, *et al.*, 2008). En este contexto, el presente trabajo tuvo el propósito de aportar al conocimiento de la biología de la lagartija *Anolis huilae* Williams, 1982, especie endémica de Colombia. Como resultado, se reporta por primera vez su patrón de actividad diaria y la relación con las temperaturas ambientales y microambientales a las que se encuentra expuesta en su hábitat. Con dichos resultados se pretende establecer si estas lagartijas son más activas en las horas de mayor temperatura debido a su condición ectotérmica, pues a mayor temperatura sus procesos fisiológicos se aceleran, o si, por el contrario, son menos activas en las horas en que las temperaturas son más altas, ya que podrían experimentar una temperatura corporal mayor a su temperatura crítica máxima, como ocurre en otros lagartos (Sinervo, *et al.*, 2010).

Metodología

Especie de estudio. *Anolis huilae* Williams, 1982 (Squamata: Dactyloidae) es una especie de lagartija endémica de la Cordillera Central de Colombia, localizada en los departamentos de Tolima y Huila, entre los 1.500 y los 1.750 m.s.n.m. (Williams, 1982), aunque en Ibagué se ha observado hasta a los 2.000 m.s.n.m. (obs. pers.). En la región del Tolima es conocida con el nombre común de “camaleoncito verde” y generalmente se encuentra perchada cabeza abajo en árboles o arbustos de matorrales entre los 1 y 7 m de altura (Williams, 1982). No se encuentra listada en ninguna categoría de amenaza según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, 2017). Los machos son verdes con puntos claros y saco gular amarillo con líneas longitudinales formadas por pequeños puntos oscuros y una longitud de hocico a cloaca (LHC) de 70,5 mm (\pm 5,6 mm). Las hembras, ligeramente más pequeñas, son de color café con dos polimorfismos, uno con manchas oscuras dorsales y otro con una línea dorsal beige, y presentan una LHC de 62,8 (\pm 5,4 mm) (Figura 1). Según registros personales en el municipio de Ibagué, se han observado individuos copulando en los meses de enero, abril y septiembre, así como nidadas de 2 a 34 huevos.

Área de estudio. La investigación se desarrolló en el corregimiento de Juntas, municipio de Ibagué, departamento del Tolima, Colombia, en los predios del Ecolodge Ukuku y sus alrededores (4°33'50"N, 75°19'65"O), a 1.900 m.s.n.m., en una área aproximada de 40 Ha. La zona de estudio se caracteriza por tener parches de bosque secundario y matorrales surcados por caminos.

Patrón de actividad diaria. Para establecer la actividad diaria de la población de *A. huilae* en estudio, se seleccionaron tres transectos lineales contiguos de 500 m cada uno. A lo largo de siete días, entre febrero y marzo de 2017, dos personas recorrieron cada transecto de manera alterna entre las 06:00 y las 18:00 horas, registrando cada hora el número de individuos observados para un total de 252 horas/hombre (pareja) de esfuerzo de muestreo (12 horas diarias x 3 transectos X 7 días). Cada pareja de observadores registró el número máximo de animales perchados o en movimiento en cada intervalo de muestreo, el cual se tomó como índice de la actividad diaria de las lagartijas (Logan, *et al.*, 2015). Solo se registraron los datos de los individuos adultos, es decir, aquellos con una LHC mayor a 55 mm (Li, *et al.*, 2011). Debido a que el estudio se realizó con lagartijas localizadas en transectos restringidos a los parches de bosque, es posible que un mismo animal se haya contado varias veces durante los siete días de muestreo, por lo que los resultados del presente trabajo se aplican específicamente a la población de estudio. No obstante, el número máximo de animales reportados sí correspondió al total de lagartijas observadas en cada hora, ya que fueron registradas simultáneamente por los tres grupos de trabajo en los tres diferentes transectos establecidos.

Registro de las temperaturas ambientales y microambientales. En el curso de los registros del patrón de actividad diaria de *A. huilae*, se tomó la temperatura



Figura 1. Individuos de *Anolis huilae* de Ibagué, Colombia. A. Macho en despliegue gular. B. Hembra con polimorfismo de manchas en muda. C. Hembra con polimorfismo de línea dorsal

microambiental (T_{micro}) en el lugar donde se encontraron perchadas las lagartijas con ocho sensores de temperatura (iButton®) cada hora. Además, para medir la temperatura ambiental (T_{amb}) se instaló un termohigrómetro EL-USB 2-LCD® en la parte exterior del Ecolodge Ukuku, área de confluencia de los tres transectos de estudio, suspendiéndolo bajo techo a una altura de 2,5 m del suelo para simular algo de sombra, y se lo programó para tomar registros cada hora.

Análisis de datos. Para establecer si hubo diferencias en la actividad diaria entre los machos y las hembras en cada periodo de muestreo de una hora, se hizo una prueba pareada de Wilcoxon, con la cual también se comparó el promedio de las temperaturas ambientales (T_{amb}) con el de las temperaturas microambientales (T_{micro}) en cada hora del día. Por último, se utilizó la correlación de Spearman para establecer la asociación tanto de la temperatura ambiental como de la microambiental entre las 6:00 y las 18:00 horas con el número de animales activos durante el periodo de estudio. El análisis estadístico de los datos se hizo con los programas InfoStat, versión 2017, e IBM® SPSS® Statistic, versión 21.0.0, tomando como valor de significación un p menor de 0,05 (Zar, 1996).

Resultados

No se encontraron diferencias significativas entre el número de hembras y machos activos a lo largo de cada una de las 12 horas de muestreo ($Z=0,49$; $n=12$; $p=0,56$). Al unir los datos de los machos y las hembras, se registró un mínimo de 15 y un máximo de 29 individuos para cada hora de muestro en los tres transectos de estudio (Tabla 1). Además, se observó que las lagartijas presentaron un patrón de actividad diaria unimodal, con un pico máximo de animales activos entre las 12:00 y 14:00 horas (Figura 2A).

Las temperaturas ambientales y microambientales mostraron el mismo patrón, con un pico máximo de 24,7 °C para la temperatura ambiental entre las 12:00 y 13:00 horas, y de 21,5 °C para las temperaturas microambientales entre las 14:00 y 16:00 horas (Figura 2B). Las temperaturas microambientales fueron menores que las ambientales (Tabla 1), con diferencias significativas ($Z=-2,59$; $n=12$; $p=0,005$), y las lagartijas fueron más numerosas en las temperaturas altas ambientales ($r_s=0,958$; $n=13$; $p<0,05$) y microambientales ($r_s=0,742$; $n=12$; $p<0,05$) (Figura 3).

Discusión

Según los resultados del estudio, *A. huilae* presentó un patrón de actividad diaria unimodal con picos máximos alrededor del mediodía (entre las 12:00 y las 14:00 horas), cuando las temperaturas ambiental y microambiental eran las más altas (Figura 2). Este patrón de actividad es similar al encontrado en otras especies del mismo género, como *A. cristatellus* (Huey, 1983), *A. fuscoauratus* (Vitt, et al., 2003), *A. nitens* (Vitt, et al., 2008), *A. onca* (Velásquez, et al., 2011) y *A. heterodermus* (Méndez-Galeano & Calderón-Espinosa, 2017), las cuales presentan una mayor actividad entre las 11:00 y las 13:00 horas. En consecuencia, estos resultados concuerdan con la hipótesis de que la actividad de las lagartijas está relacionada con las temperaturas ambientales y corporales (Hanato, et al., 2001) y que la variación de la actividad de los lagartos diurnos está determinada por el ambiente y la fisiología termal de la especie (Adolph & Porter, 1993), aunque difieren de lo señalado por Sinervo, et al. (2010), quienes mencionan que la actividad de los animales decrece cuando las temperaturas son mayores. La diferencia entre estos resultados puede atribuirse a que los lagartos estudiados por estos autores habitan zonas

Tabla 1. Temperaturas registradas y número de individuos observados durante el estudio del patrón de actividad diaria de *Anolis huilae* en Ibagué, Colombia

Hora	$\bar{X} T_{amb} \pm DE$ (°C)	$\bar{X} T_{micro} \pm DE$ (°C)	No. Max. ♀	No. Max. ♂	n
6:00-7:00	15,1 ± 0,2	15,0 ± 1,2	8	7	15
7:00-8:00	16,9 ± 0,5	15,6 ± 1,3	8	8	16
8:00-9:00	19,7 ± 1,2	17,0 ± 1,8	10	9	19
9:00-10:00	22,4 ± 1,3	18,6 ± 2,0	12	12	24
10:00-11:00	23,4 ± 1,2	19,9 ± 2,0	14	13	27
11:00-12:00	23,9 ± 1,2	20,7 ± 2,0	15	14	29
12:00-13:00	24,6 ± 1,1	21,2 ± 2,2	14	14	28
13:00-14:00	23,8 ± 0,9	21,5 ± 2,6	14	15	29
14:00-15:00	22,6 ± 0,7	21,5 ± 2,7	13	14	27
15:00-16:00	21,5 ± 0,6	21,1 ± 1,9	13	13	26
16:00-17:00	20,1 ± 0,6	20,3 ± 2,2	11	11	22
17:00-18:00	18,8 ± 0,8	19,4 ± 2,0	10	9	19

\bar{x} : promedio; DE: desviación estándar; T_{amb} : temperatura ambiental; T_{micro} : temperatura microambiental; No. Max.: número máximo de individuos registrados; ♂: machos; ♀: hembras

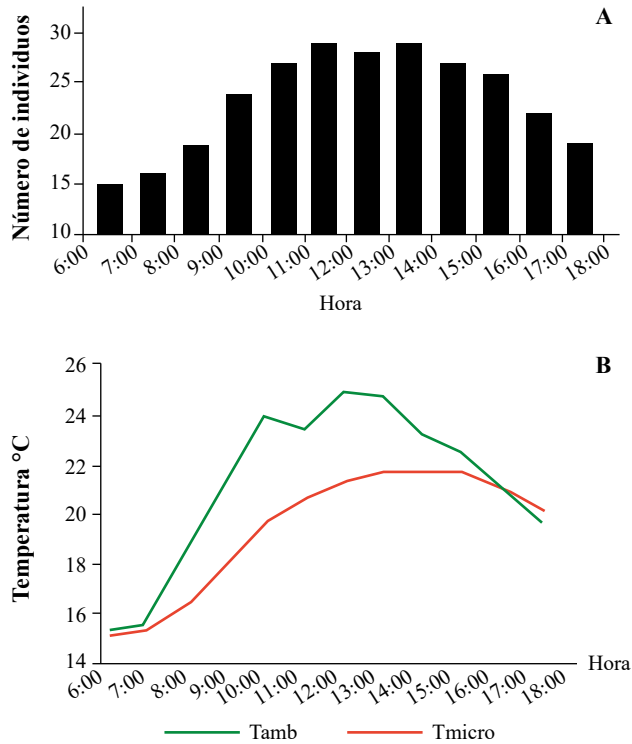


Figura 2. A. Patrón de actividad diario de *Anolis huilae* de Ibagué, Colombia. **B.** Promedio de las temperaturas ambientales (T_{amb}) y microambientales (T_{micro}) registradas durante el estudio

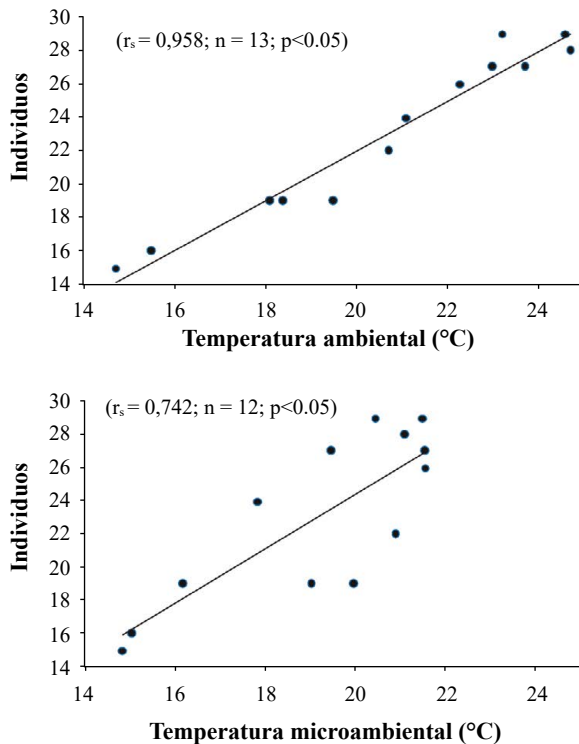


Figura 3. Correlaciones lineales entre el número de individuos activos de *Anolis huilae* y las temperaturas ambientales y microambientales en Ibagué, Colombia

abiertas y están expuestos a temperaturas ambientales que pueden superar sus límites térmicos críticos máximos (CT_{max}), por lo que los animales se refugian durante las horas de mayor temperatura, en tanto que *A. huilae* habita zonas boscosas, sombreadas, y se localiza principalmente en perchas que la protegen de la exposición directa de la radiación solar ofreciéndole temperaturas microambientales significativamente menores que las ambientales (Figura 2B). Probablemente la amortiguación térmica generada por el bosque o el matorral hace que estas lagartijas prefieran las temperaturas microambientales diarias más altas para maximizar su actividad funcional y su comportamiento, además porque, según los experimentos preliminares (datos sin publicar), dichas temperaturas son bastante inferiores a sus temperaturas críticas máximas.

Vitt, *et al.* (2008) plantean que las lagartijas de tamaños pequeños son termoconformistas y tigmotérmicas, ya que sus temperaturas corporales están supeditadas básicamente a la temperatura ambiental y a la del sustrato de percha. En este sentido, *A. huilae* podría ajustarse térmicamente a esta clasificación, ya que es un ecomorfo de tamaño pequeño del tipo *trunk-ground* (Huey, *et al.*, 1983). Sin embargo, el uso de estas estrategias termorreguladoras debe validarse aplicando metodologías como la propuesta por Hertz, *et al.* (1993), la cual requiere recolectar datos sobre las preferencias térmicas y la sensibilidad térmica de algunas variables fisiológicas. Esta información es importante para determinar los posibles efectos antrópicos sobre la conservación de esta lagartija endémica de Colombia, especialmente por el actual cambio climático y la acelerada destrucción de los bosques que constituyen su hábitat, lo cual conlleva un incremento de las variables de su ambiente térmico que podría afectar su comportamiento termorregulatorio y su patrón de actividad diaria.

En el estudio se pudo observar que *A. huilae* es una especie de actividad diurna, es decir, durante las horas de luz, aproximadamente entre las 6:00 y las 18:00 horas. Sin embargo, algunas lagartijas descendieron de sus perchas al suelo alrededor de las 05:45 horas y finalizaron su actividad un poco después de las 18:00 horas. El inicio de la actividad de estas lagartijas en el amanecer podría deberse al ligero aumento de la temperatura ambiental, ya que según Pianka (1993), las especies del género *Anolis*, particularmente las del trópico, perciben con facilidad las variaciones térmicas ambientales. Este comportamiento también podría atribuirse a un ritmo circadiano endógeno de los reptiles que regula su actividad diaria (Firth & Belan, 2007), o a una estrategia contra la depredación, ya que coincide con el inicio de la actividad de las aves, que son sus potenciales depredadores (Poulin, *et al.*, 2001; Huang, *et al.*, 2011; Marshal, *et al.*, 2016). Además, el que la mayoría de los lagartos adultos sean activos en las horas del mediodía sugeriría que esta especie es especialista desde el punto de vista térmico, como lo indica Avery (1982) para algunas especies ectotermas que escogen un rango de temperatura

estrecho para su actividad diaria, y **Addo-Bediako, et al.** (2000) y **Cruz, et al.** (2005), quienes mencionan que las especies con un estrecho rango de distribución altitudinal (como sucede con *A. huilae*) son generalmente especialistas termales. El que *A. huilae* pueda ser una especie de este tipo es otro dato importante para establecer el efecto de los cambios térmicos bruscos en su microhábitat (**Huey, et al.**, 2009). También es posible que, al igual que otras especies del género *Anolis* (**Muñoz, et al.**, 2014), *A. huilae* presente una gran plasticidad fisiológica y de comportamiento, en cuyo caso es igualmente necesario conocer hasta dónde llegan sus límites térmicos para enfrentar los desafíos impuestos por los cambios ambientales locales y globales.

Conclusiones

Anolis huilae presentó un patrón de actividad diario unimodal, con el mayor pico de actividad entre las 12:00 y las 14:00 horas, cuando las temperaturas ambientales y microambientales son las más altas. Esta lagartija habita lugares sombreados en los parches de bosques o en los matorrales, por lo que durante sus horas de actividad diaria está protegida de las temperaturas ambientales altas y de la radiación solar directa. Probablemente esta sea la razón de que presente una mayor actividad diaria hacia las horas del mediodía, con lo cual incrementa su temperatura corporal sin alcanzar su límite térmico crítico, a diferencia de otros lagartos que viven en áreas abiertas y permanecen inactivos en las horas de mayor temperatura diaria.

Agradecimientos

A la bióloga Annie M. Jiménez por su apoyo durante todo el estudio; a los estudiantes de Biología de la Universidad del Tolima Diego Valbuena, Diana Díaz Moreno, Luisa Fernanda Velásquez, Carlos Felipe Hernández y James Herrán por su colaboración en campo; a los propietarios del Ecolodge Ukuku Rural Lodge por facilitar sus locaciones, y a la oficina de investigaciones de la Universidad del Tolima por el financiamiento parcial de la investigación en el marco del macroproyecto número 510114.

Contribución de los autores

Ambos autores contribuyeron al análisis de los datos y a la escritura del manuscrito.

Conflicto de intereses

Ninguno

Referencias

Addo-Bediako, A., Chown, S. L., Gaston, K. J. (2000). Thermal tolerance, climatic-variability and latitude. *Proceeding of the Royal Society of London B*. **267**: 739-745.

Adolph, S. C., Porter, W. P. (1993). Temperature, activity, and lizard life histories. *American Naturalist*. **142**: 273-295.

Avery, R. A. (1982). Field studies of body temperatures and thermoregulation. En C. Gans and F. H. Pough (Eds). *Biology of the Reptilia*. Vol. 12. Physiology C. Physiological Ecology, p. 93-166. New York, USA: Academic Press.

Carretero, M., Llorente, G. (1993). Ecología térmica y actividad de una población costera de *Psammodromus hispanicus*. *Revista Española de Herpetología*. **7**: 21-32.

Cruz, F. B., Fitzgerald, L. A., Espinoza, R. E., Schulte II, J. A. (2005). The importance of phylogenetic scale in test of Bergmann's and Rapoport's rules: lessons from a clade of South American lizards. *Journal of Evolutionary Biology*. **18**: 1559-1574.

Díaz, J., Cabezas-Díaz, S. (2004). Seasonal variation in the contribution of different behavioural mechanism to lizard thermoregulation. *Functional Ecology*. **18**: 867-875.

Firth, B. T., Belan, I. (2007). Daily and seasonal rhythms in selected body temperature in the Australian lizard *Tiliqua rugosa* (Scincidae): field and laboratory observations. *Physiological Zoology*. **71**: 303-311.

Gibbons, J. W., Semlitsch, R. D. (1987). Activity patterns. En Seigel, R. A., Collin, J. T. and Novak, S. S. (Eds). *Snakes: Ecology and Evolutionary Biology*. p. 396-421. New York, USA: McMillan Publishing Company.

Hanato, F., Vrcibradic, D., Galdino, C., Cunha-Barros, M., Rocha, C., Van Sluy, M. (2001). Thermal ecology and activity patterns of the lizards community of the Restinga of Jurabatiba, Macaé, R. J. *Revista Brasileira de Biologia*. **61**: 287-294.

Hertz, P. E., Huey, R., Stevenson, R. D. (1993). Evaluating temperature regulation by field-active ectotherms: the fallacy of the inappropriate question. *American Naturalist*. **142**: 796-818.

Huey, R. B. (1983). Natural variation in body temperature and physiological performance in a lizard (*Anolis cristatellus*). En Rhodin, A. G. and Miyata, K. (Eds). *Advances in Herpetology and Evolutionary Biology*. p. 484-490. Cambridge, Massachusetts, USA: Museum of Comparative Zoology.

Huey, R. B., Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Vitt, L. J., Hertz, P. E., Pérez, H. J. A. (2009). Why tropical forest lizards are vulnerable to climate warming. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*. **276**: 1939-1948.

Huey, R. B., Kearney, M. R., Krockenberger, A., Holtum, J. A. M., Jess, M., Williams, S. E. (2012). Predicting organismal vulnerability to climate warming: roles of behaviour, physiology and adaptation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*. **367**: 1665-1679.

Huey, R. B., Pianka, E. R., Schoener, T. W. (1983). *Lizard Ecology, Studies of a Model Organism*. Massachusetts, USA: Harvard University Press.

Huang, B., Lubarsky, K., Teng, T., Blumstein, D.T. (2011). Take only pictures, leave only...fear? The effects of photography on the West Indian anole *Anolis cristatellus*. *Current Zoology*. **57**: 77-82.

IUCN. (2017). IUCN Red List of Threatened Species. Version 2017.2. Fecha de consulta: abril de 2017. Disponible en: www.iucnredlist.org.

Li, H., Qu, Y. F., Ding, G. H., Ji, X. (2011). Life-history variation with respect to experienced thermal environment in the lizard, *Eremias multiocellata* (Lacertidae). *Zoological Science*. **28**: 332-338.

Logan, M.L., Fernández, S.G., Calsbeek, R. (2015). Abiotic constraints on the activity of tropical lizards. *Functional Ecology*. **29**: 694-700.

- Marshal, K. L. A., Philpot, K. E., Stevens, M.** (2016). Microhabitat choice in island lizards enhances camouflage against avian predators. *Scientific Reports*. **6**: 1-10.
- Muñoz, M. M., Stimola, M. A., Algar, A. C., Conover, A., Rodríguez, A. J., Landestoy, M. A., Bakken, G. S., Losos, J. B.** (2014). Evolutionary stasis and lability in thermal physiology in a group of tropical lizards. *Proceedings of the Royal Society B*. **281**: 2013-2433.
- Méndez-Galeano, M. A., Calderón-Espinosa, M. L.** (2017). Thermoregulation in the Andean lizard *Anolis heterodermus* (Squamata: Dactyloidae) at high elevation in the Eastern Cordillera of Colombia. *Iheringia Serie Zoológica*. **107**: 1-8.
- Pianka, E.** (1993). The many dimensions of a lizard ecological niche. En Valakos, E., Bohme, W., Pérez-Mellado, V. and Maragou, P. (Eds). *Lacertids of the Mediterranean, A biological approach*. p. 121-154. Athens, Bonn, Alicante: Hellenic Zoological Society.
- Poulin, B., Lefebvre, G., Ibáñez, R., Jaramillo, C., Hernández, C., Rand, S.** (2001). Avian predation upon lizards and frogs in a neotropical forest understorey. *Journal of Tropical Ecology*. **17**: 21-40.
- Sinervo, B., Méndez de la Cruz, F., Miles, D. B., Heulin, B., Bastiaans, E., Villagrán-Santa Cruz, M., Lara-Resendiz, R., Martínez-Méndez, N., Calderón-Espinosa, M. L., Mesa-Lázaro, R. N., Gadsden, H., Ávila, L.J., Morando, M., De la Riva, I. J., Sepúlveda, P. V., Duarte-Rocha, C. E., Ibanguengoytía, N., Aguilar-Puntriano, C., Massot, M., Lepetz, V., Oksanen, T. A., Chapple, D. G., Bauer, A. M., Branch, W. R., Clobert, J., Sites Jr., J. W.** (2010). Erosion of lizard diversity by climate change and altered thermal niches. *Science*. **328**: 894-899.
- Tewksbury, J. J., Huey, R. B., Deutsch, C. A.** (2008). Putting the heat on tropical animals. *Science*. **320**: 1296-1297.
- Velásquez, J., González, L. A., Prieto-Arcas, A.** (2011). Ecología térmica y patrón de actividad del lagarto *Anolis onca* (Squamata: Polycrotidae) en la península de Araya, Venezuela. *Saber, Universidad de Oriente, Venezuela*. **23** (1): 5-12.
- Vitt, L., Avila-Pires, T., Zani, P., Sartorius S., Espósito, M.** (2003). Life above ground: ecology of *Anolis fuscoauratus* in the Amazon rain forest, and comparisons with its nearest relatives. *Canadian Journal of Zoology*. **81**: 142-156.
- Vitt, L. J., Shepard, D. B., Vieira, G. H. C., Caldwell, J. P., Colli, G. R., Mesquita, D. O.** (2008). Ecology of *Anolis nitens brasiliensis* in Cerrado woodland of Cantão. *Copeia*. **1**: 144-153.
- Williams, E. E.** (1982). Three new species of the *Anolis punctatus* complex from Amazonian and inter-Andean Colombia, with comments on the eastern members of the *Punctatus* species group. *Breviora*. **467**: 1-38.
- Zar, J. H.** (1996). *Biostatistical Analysis*. Upper Saddle River, New Jersey, USA: Prentice Hall.

Aspectos reproductivos y pesqueros de *Prochilodus magdalenae* Steindachner, 1879 (Characiformes: Prochilodontidae) en la ciénaga de Marriaga, río Atrato, Colombia

Margarita María Roa-Cubillos*, Francisco Antonio Villa-Navarro

Grupo de Investigación en Zoología, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

Resumen

Prochilodus magdalenae ha sido históricamente una de las fuentes de alimento de mayor importancia para la población a nivel nacional. Esta especie endémica de Colombia ha proporcionado más del 50 % del volumen de capturas en las principales cuencas trasandinas del país. El aislamiento de la población de *P. magdalenae* en la cuenca del Atrato hace necesario que se establezcan medidas de conservación ajustadas a sus características biológicas y reproductivas. En el presente estudio se registró información biométrica de las capturas de *P. magdalenae* provenientes de la pesca artesanal en la ciénaga de Marriaga (cuenca baja del río Atrato) desde abril de 2014 a marzo de 2015. Se registraron 574 individuos de los cuales 427 eran hembras y 147, machos. La distribución de las tallas para las hembras estuvo entre 200 y 470 mm de longitud estándar (LE) y para los machos entre 210 y 415 mm. El análisis de la longitud y el peso evidenció un crecimiento isométrico ($b=2,9577$) y una gran correlación entre las dos variables ($r^2=0,8119$) para las hembras, en tanto que para los machos el crecimiento fue alométrico negativo ($b=1,8793$) con una correlación baja ($r^2=0,5628$). La talla media de madurez (TMM) para la población total fue de 365 mm (LE). La época de mayor actividad reproductiva se estimó entre octubre y mayo. La distribución de las tallas y la talla media de madurez (TMM), así como las épocas de desove, difirieron de las registradas en las zonas baja y media del Atrato, así como en las otras cuencas trasandinas. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: *Prochilodus magdalenae*; Río Atrato; Aspectos reproductivos; Aspectos pesqueros.

Reproductive aspects and fishery of *Prochilodus magdalenae* Steindachner, 1879 (Characiformes: Prochilodontidae) in the Marriaga swamp, Atrato River system, Colombia

Abstract

Prochilodus magdalenae has historically been one of the most important food sources for the human population nationwide. This Colombian endemic species represents more than 50% of all catches in the main river basins of the country. The isolation of the population of *P. magdalenae* in the Atrato basin demands the adoption of conservation measures adapted to their biological and reproductive characteristics. During our study we recorded the biometric information of *P. magdalenae* catches obtained via artisanal fishing in the Marriaga swamp (Atrato River lower basin) from April 2014 to March 2015. From a total of 574 recorded individuals, 427 were females and 147 males. The female size ranged between 200 and 415 mm (standard length, SL), and the male size ranged between 210 and 415 mm (SL). In females, the length-weight analysis indicated an isometric growth ($b=2.95$) and a high correlation between the two variables ($r^2=0.81$). In males, it indicated a negative allometric growth ($b=1.87$) and a low correlation ($r^2=0.56$). The average size at maturity for the whole analyzed population was 365 mm (SL). The highest period of reproductive activity was estimated between October and March. The size ranges, the average size at maturity, and the spawning seasons of the individuals registered in the Marriaga swamp differed from those registered in the middle and lower area of the Atrato river basin, and other basins where the *P. magdalenae* has been studied. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: *Prochilodus magdalenae*; Atrato River; Reproductive aspects; Fishing aspects.

Introducción

El bocachico (*Prochilodus magdalenae* Steindachner, 1879) es la especie pesquera continental de mayor importancia comercial en Colombia; durante décadas ha sido parte de la seguridad alimentaria de la población colombiana y fuente de empleo para los pescadores pertenecientes a las cuencas de los ríos Magdalena, Sinú y Atrato (Galvis &

Mojica, 2007; Valderrama, *et al.*, 2011). Dado que es una de las especies más investigadas en la cuenca del río Magdalena (Valderrama, *et al.*, 2011), ha sido un referente para

*Correspondencia:

Margarita María Roa-Cubillos; margararoa@gmail.com

Recibido: 7 de septiembre de 2018

Aceptado: 12 de febrero de 2019

Editor: Arturo Acero

establecer las medidas de manejo que se aplican actualmente para sus poblaciones en las diferentes cuencas del país (Mojica, et al., 2012).

Prochilodus magdalenae se encuentra en la categoría de vulnerable (VU A2c,d) debido a la fuerte presión pesquera a que se ha visto sometido en los últimos 40 años (Mojica, et al., 2012). En la cuenca del río Magdalena su participación pesquera en 1970 fue de 63,64 % (17.945,8 ton/año) y para 2009 había descendido a 37,8 % (Gutiérrez, et al., 2011). Esta presión pesquera también se evidencia con el seguimiento de su talla de captura: en 1973 la talla media de captura (TMC) se estableció en 38 cm de longitud estándar (LE), en 1987 se redujo a 27 cm (Mojica, et al., 2012) y, actualmente ha descendido a 24,78 cm (Alonso, et al., 2014).

En la cuenca del Sinú las capturas de *P. magdalenae* entre 1997 y 2002 representaron el 34 % de la captura total (promedio 645 toneladas/año), pero a finales de la primera década de este siglo sus valores anuales disminuyeron a menos de <400 toneladas/año (Valderrama, et al., 2011). La TMC entre 2001 y 2002 se estableció en 23,35 cm de LE (Valderrama, et al., 2002) y se redujo a 20,86 cm de LE entre el año 2012 y 2013 (Alonso, et al., 2014). Por otra parte, la talla media de madurez (TMM) descendió de 25,3 cm de LE en el 2003 (Valderrama & Solano, 2004) a 22,48 cm en tan solo una década (Alonso, et al., 2014).

Los estudios publicados sobre la cuenca del río Atrato son pocos y relativamente recientes. En la cuenca media, *P. magdalenae* ha representado el 47 % de las capturas (Rivas, et al., 2002), y el 52,08 % en la cuenca baja durante la década de los años 80 del siglo pasado (Mora, 1990), en tanto que más recientemente se ha estimado que constituye cerca del 80 % de los desembarcos registrados en Quibdó (Gutiérrez, et al., 2011). El volumen de los desembarcos se ha registrado con regularidad en la cuenca media, donde durante el período de 1997 a 2010 fluctuó entre 400 y 5.000 toneladas/año (Gutiérrez, et al., 2011); sin embargo, al final de este período dicho volumen disminuyó en un 50 % con respecto a los valores iniciales (Valderrama, et al., 2011). Por otra parte, la TMC se ha reducido durante los últimos años, pasando de 24,9 cm de LE (Mora, 1990) a 23,5 cm (Valderrama, et al., 2011).

El desconocimiento de la biología de una cohorte afecta su manejo adecuado, pues se establecen tallas mínimas de captura o épocas de veda que pueden no corresponder a las características propias de la población que requiere un manejo sustentable. En este sentido, el objetivo del presente estudio fue determinar las características reproductivas y poblacionales de los individuos de *P. magdalenae* de la ciénaga de Marriaga, cuenca baja del río Atrato, Colombia.

Materiales y métodos

La cuenca del río Atrato abarca 38.000 km², tiene una longitud de 750 km y su llanura aluvial cubre 130.000 ha. La cuenca presenta un régimen hidrológico unimodal, con

una época de lluvias intensas entre mayo y noviembre y de menor intensidad entre diciembre y abril (Jaramillo-Villa & Jiménez-Segura, 2008).

La ciénaga de Marriaga se localiza en las coordenadas 08°06'38,0" N y 76°57'50,4" O, cerca de la desembocadura del río Atrato en el Golfo de Urabá (Figura 1). Forma un complejo lagunar con la ciénaga Limón, protegida de la extracción de recursos pesqueros, y hace parte de la zona de amortiguación del Parque Nacional Natural de Los Katios (PNN Katios, 2006).

La ciénaga de Marriaga está ubicada en jurisdicción del municipio de Unguía, departamento de Chocó, entre los 0 y los 12 m s. n. m., próxima a la desembocadura del río Atrato en el mar Caribe, por lo que tiene influencia de las aguas marinas y está categorizada como laguna costera (INVEMAR, 2002). Además de presentar macrófitas flotantes en el espejo de agua, con dominio de *Eichornia crassipes*, las asociaciones vegetales características de esta zona son principalmente arracachales (*Montrichardia arborescens*), panganales (*Raphia taedigera*), manglares de mangle rojo (*Rhizophora mangle*) y negro (*Avicennia germinans*) y cativales (*Prioria copaifera*) (Codechocó, 2013).

Los datos pluviométricos durante el periodo de estudio (2014-2015), así como el promedio mensual 'multianual' de la década anterior al estudio (2005-2014), se obtuvieron a partir de los registros de la estación meteorológica Unguía (11130010) colocada en la cuenca baja de río Atrato por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) (Figura 2).

Los ejemplares de *P. magdalenae* fueron recolectados por pescadores artesanales entre abril de 2014 y marzo de 2015 utilizando la técnica de trasmallo con redes de multifilamento de ojo de malla variable entre 7,6 y 12,7 cm, una altura de 2,5 a 7 m y una longitud de 100 a 1.000 m. Se determinó la longitud total (LT: cm) de cada individuo muestreado, su longitud estándar (LE: cm), el peso total (W: g) y su estadio de madurez sexual (EMS), en tanto que en una submuestra se registró el peso gonadal (g). Estas muestras se fijaron en formol al 10 % para análisis posteriores.

Análisis estadístico. La distribución de las tallas de los ejemplares se obtuvo empleando los valores de la LE agrupada en intervalos de 2 cm, y se graficó con las marcas de clase para cada intervalo. El análisis de la relación de longitud y peso se hizo tanto para la población total como discriminando en hembras y machos, y los datos se agruparon de forma bimensual para así utilizar esta relación matemática como una estimación indirecta de la tasa de crecimiento (González, et al., 1996). Dicha relación se estableció empleando la ecuación:

$$W = a L^b$$

donde *W* es el peso total (g), y *L* la longitud estándar (LE cm), y *a* y *b* son constantes (Froese, 2006).

Se determinó la proporción sexual total y bimensual con la información de campo de los ejemplares recolectados y con esos datos se probó la hipótesis de una proporción

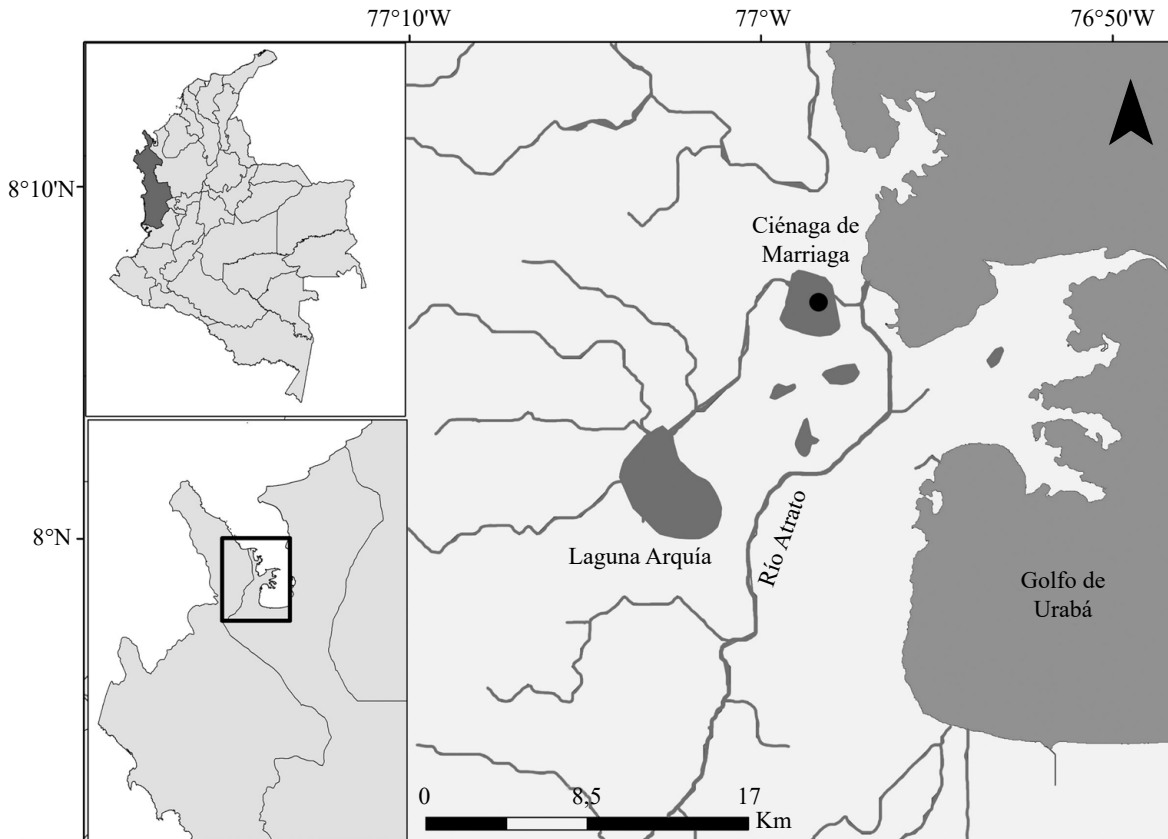


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio (ciénaga de Marriaga) entre los departamentos de Chocó y Antioquia, y próxima a la desembocadura del río Atrato en el mar Caribe, Colombia

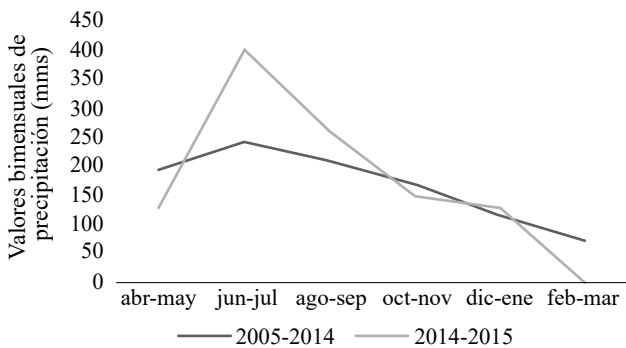


Figura 2. Valores bimensuales ‘multianuales’ de la década de 2005 a 2014 y del año de estudio (2014-2015) registrados en la estación meteorológica Unguía (11130010) del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM)

sexual de 1:1 mediante la prueba de χ^2 al cuadrado. Solo se emplearon las hembras como indicador de los periodos de reproducción para analizar la dinámica reproductiva (Wootton, 1995).

El análisis macroscópico de las gónadas se hizo según la propuesta de Vazzoler (1996): (I) inmaduros, (II) madurando, (III) maduros y (IV) desovados. Asimismo, se analizó la variación mensual del índice gonadosomático

(IGS), en el cual el peso de las gónadas se expresa como un porcentaje del peso corporal. Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) para probar la hipótesis de que el IGS no varía durante un ciclo hidrológico y determinar dónde se encontraba la diferencia en caso de que esta existiera. Para determinar la posible relación entre la pluviosidad y el IGS, se empleó la prueba de correlación de Spearman ($p < 0,05$).

La talla media de madurez (TMM) se estableció empleando la LE a la cual correspondía el 50 % de la frecuencia acumulada de individuos maduros (EMS III) mediante la siguiente ecuación:

$$S(L)' = \frac{1}{[1 + e^{(s1-s2L)}]}$$

donde L = longitud, $S(L)'$ = frecuencia relativa acumulada corregida y $S1$ y $S2$ representan constantes iguales a las constantes a y b obtenidas de la regresión lineal entre $\ln[1/S(L)-1]$ y L (Sparre & Venema, 1997).

Para analizar el crecimiento de la población se utilizó la ecuación de crecimiento de von Bertalanffy (1938), donde L_t es igual a la longitud a la edad t , L_∞ es la longitud asintótica, t_0 es la edad hipotética del pez en la que su longitud equivale a cero y k es el parámetro de crecimiento; para ello se utilizó la información proveniente de la frecuencia de tallas con el empleo del programa FISAT II.

$$L_t = L_\infty [1 - e^{-K(t-t_0)}]$$

En los casos en los que se presentaba crecimiento oscilatorio se utilizó la ecuación propuesta por Pauly (1979) donde C es la amplitud de la oscilación:

$$L_t = L_\infty [1 - e^{-K(t-t_0) + c(\frac{K}{2\pi})\text{sen}2\pi(t-ts)}]$$

La explotación pesquera se estimó mediante el cálculo de la mortalidad total (Z) con el método de curva de captura linealizada en su versión modificada para convertir las tallas en edades, para lo cual se utilizó el programa FISAT II (Gayanilo & Pauly, 1997):

$$t(L) = t_0 - \frac{1}{K} * \ln \left(1 - \frac{L}{L_\infty} \right),$$

donde N es el número de peces en cada clase de talla, Δt es el tiempo necesario para que el pez pase de una clase de talla a la siguiente, y t es la edad correspondiente a la marca de clase i .

$$\ln \left(\frac{N_i}{\Delta t_i} \right) = a + b * t_i$$

La información se analizó de manera bimensual con el fin de agrupar un número representativo de datos. Las pruebas estadísticas se hicieron con el paquete estadístico InfoStat, versión 2013 (Di Rienzo, et al., 2013) y un nivel de significación de $\alpha = 0,05$.

Resultados

Se registró un total de 580 ejemplares de *P. magdalenae*, de los cuales 426 fueron hembras y 144 machos. Las tallas estuvieron entre 20,0 y 47,0 cm de LE ($\bar{x}=32,1$ cm; $s=5,9$), donde el intervalo de longitud con mayor número de individuos estuvo comprendido entre 25,0 y 27,0 cm de LE ($n=112$) (Figura 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/729/2966>). En las hembras ($n=426$) los valores estuvieron entre 20,0 y 47,0 cm de LE ($\bar{x}=33,1$ cm; $s=5,9$) y en los machos ($n=144$) entre 21,0 y 41,5 cm ($\bar{x}=29,5$ cm; $s=4,6$) (Figura 3).

La relación entre longitud y peso de la población total se describió mediante el modelo exponencial con la siguiente ecuación: $W_t=0,035 L^{2,8536}$ y $r^2=0,779$, y con límites de confianza (LC 95 %) para b entre 2,63 y 3,12, lo que indicaba un crecimiento isométrico. La ecuación utilizada en el caso de las hembras fue $W=0,024 L^{2,9577}$ (LC 95 %), para una b entre 2,83 y 3,09 y una a entre 0,014 y 0,038, lo que indicaba un crecimiento isométrico. En los machos la ecuación fue $W=0,801 L^{1,8793}$ (LC 95 %), para una b entre 1,61 y 2,15 y una a entre 0,319 y 2,013, lo cual correspondía a valores de crecimiento alométrico negativo (Figura 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/729/2967>) (Tabla 1).

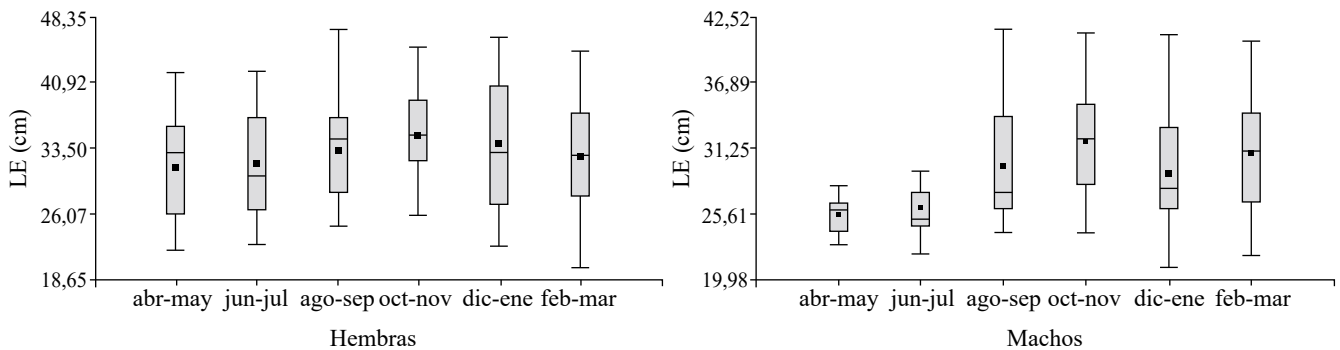


Figura 3. Distribución de tallas de hembras y machos de *P. magdalenae* capturados en la ciénaga de Marriaga, cuenca baja del río Atrato, Colombia

Tabla 1. Valores bimensuales resultantes de la relación entre longitud y peso de hembras y machos de *P. magdalenae* capturados en la ciénaga de Marriaga, Colombia.

Bimestre	Hembras				Machos			
	n	B	LI-LS (95%)	r ²	N	B	LI-LS (95%)	r ²
Abril - mayo	81	2,712	2,490-2,960	0,8529	9	1,479	-1,980 -4,930	0,4519
Junio - julio	49	3,005	2,620-3,390	0,8405	15	0,806	-0,360-1,970	0,1463
Agosto - septiembre	59	2,914	2,600-3,230	0,8551	31	1,948	1,470-2,430	0,7034
Octubre - noviembre	83	3,432	3,050-3,810	0,8012	31	1,847	1,060-2,640	0,4395
Diciembre - enero	97	3,092	2,800-3,380	0,8265	40	1,977	1,510-2,440	0,6588
Febrero - marzo	57	2,817	2,440-3,190	0,8057	18	2,143	1,660-2,630	0,8471

b =pendiente, r^2 = coeficiente de determinación, LI-LS (95 %)=límite inferior-límite superior

Los machos representaron 25,5 % (n=144) y las hembras 74,5 % (n=426) de la captura total, es decir, una proporción de 1:3 ($\chi^2=13,64$; $p=0,0181$). Esta proporción varió durante el periodo de estudio, con una proporción máxima entre machos (M) y hembras (H) de 1:7 entre abril y mayo y una mínima de 1:1,9 entre agosto y septiembre (Figura 4). La proporción de M:H durante abril y mayo presentó diferencias significativas con respecto a los otros meses ($p<0,05$).

Se registraron hembras en EMS III entre octubre y mayo, siendo el periodo de febrero a marzo el de mayor captura de ejemplares maduros; además, se registraron ejemplares desovados y en reposo (EMS IV) durante todo el año. La presencia de machos maduros (EMS III) se registró entre agosto y marzo, y disminuyó durante los últimos meses de la etapa reproductiva. Se capturaron individuos en reposo (EMS IV) solo durante febrero y marzo, en tanto que entre abril y julio no se capturó ningún individuo adulto (Figura 5).

El IGS para las hembras presentó un mayor valor entre febrero y marzo ($\bar{x}=1,07$; $s=1,54$) y menor entre agosto y septiembre ($\bar{x}=0,25$; $s=0,25$); según el ANOVA de Kruskal-Wallis hubo diferencias significativas entre

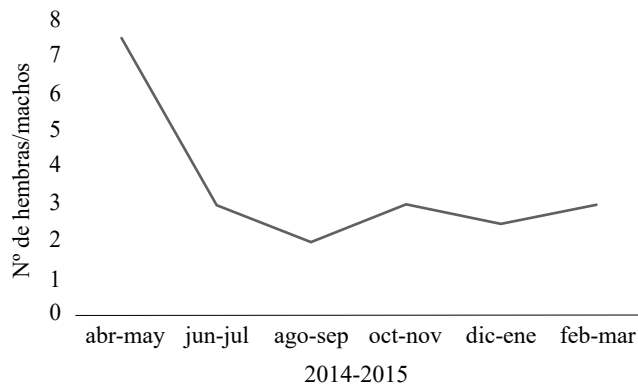


Figura 4. Proporción de hembras y machos de *P. magdalenae* en los ejemplares capturados durante el periodo de estudio en la ciénaga de Marriaga, cuenca baja del río Atrato, Colombia

agosto y septiembre y el resto del año ($p=0,045$) (Figura 3S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/729/2968>). Asimismo, el análisis de correlación de Spearman mostró una relación significativa entre los valores de pluviosidad y la variación de la actividad reproductiva (IGS) bimensual ($p<0,05$). El análisis para establecer la talla media de madurez (TMM) demostró que el 50 % de los individuos de la población alcanzaba la madurez al llegar a los 36,5 cm de LE. Las hembras alcanzaron una TMM al llegar a los 37,0 cm de LE, y los machos con 35,0 cm de LE (Figura 6).

La estimación de la tasa de mortalidad evidenció una mortalidad natural de 0,97, un coeficiente de mortalidad por pesca (F) de 0,46 y una tasa de explotación ϵ de 0,32, en tanto que su tasa instantánea de mortalidad (Z) fue de 1,43 (Figura 4S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/729/2969>).

Con una longitud asintótica (L_{∞}) de 53,0, una amplitud de la oscilación \odot de 0,1 y un punto de invierno (WP) de 0,95, la población presentó una tasa de crecimiento (K) de 0,520 año⁻¹. La ecuación de crecimiento hallada fue:

$$L_t = 53,0(1 - e^{-0,520(t-t_0) - 0,1/2 \pi \text{sen } 0,9})$$

El gráfico de tallas y la curva de crecimiento (Figura 5S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/729/2970>) evidenciaron que la población presentaba un crecimiento oscilatorio, con un tiempo de vida estimado de cuatro años, y que el reclutamiento podría efectuarse durante junio.

Discusión

Las tallas de los ejemplares de *P. magdalenae* capturados en la ciénaga de Marriaga difirieron de las registradas en la misma cuenca y otras cuencas del país, lo que puede atribuirse a diferentes presiones de pesca o a dinámicas poblacionales distintas. Se considera que la disminución del tamaño de los peces, así como su maduración acelerada, es una respuesta a la presión pesquera en sus poblaciones (Sparre & Venema,

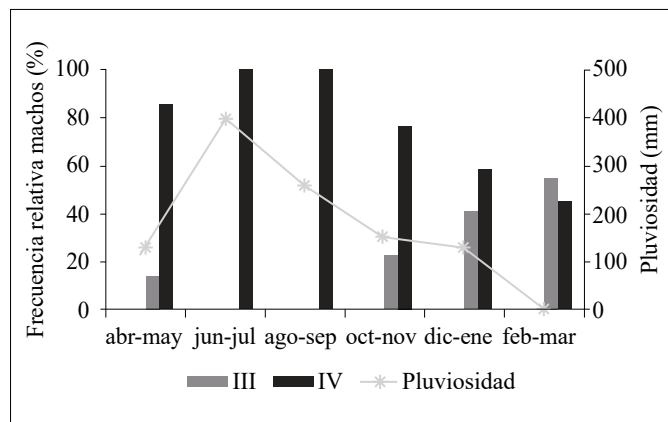
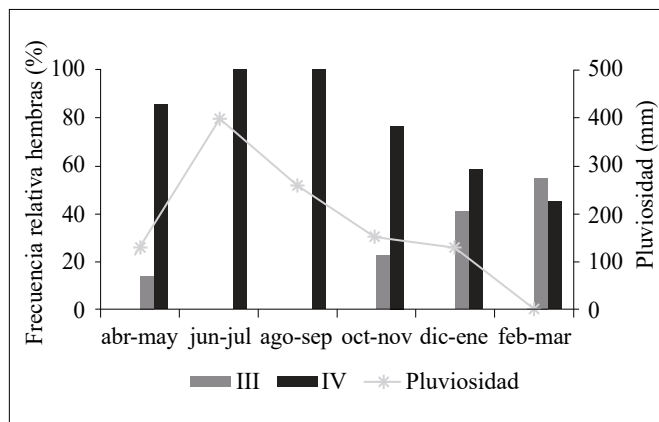


Figura 5. Frecuencia relativa de los estadios de madurez sexual III y IV de hembras y machos de *P. magdalenae* capturados durante el periodo de estudio en la ciénaga de Marriaga, cuenca baja del río Atrato, Colombia

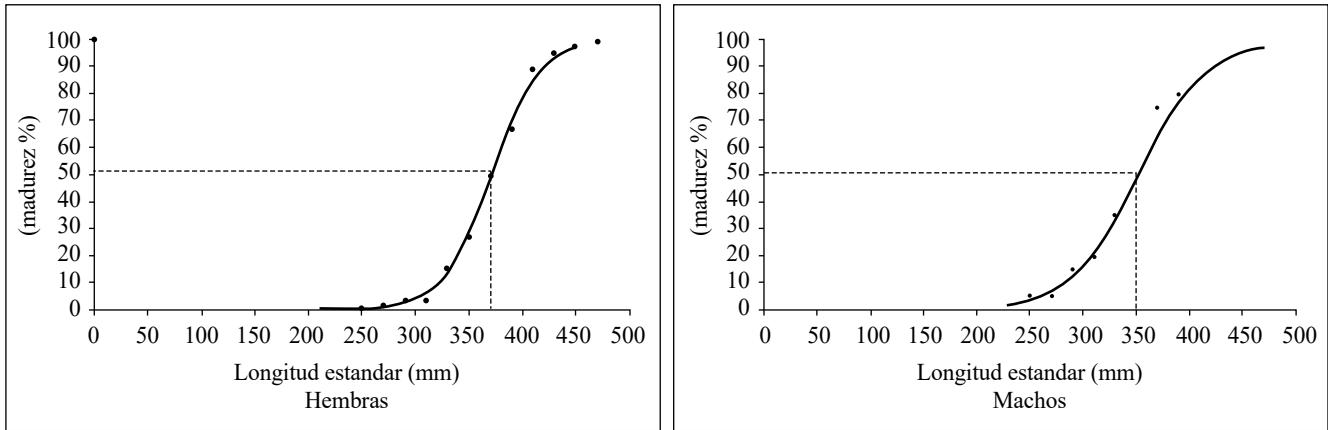


Figura 6. Talla media de madurez (TMM) (línea punteada) de hembras y machos de *P. magdalenae* de la ciénaga de Marriaga, cuenca baja del río Atrato, Colombia

1997; Welcomme, 1999; Allan, *et al.*, 2005), lo que sugiere que la mayor TMM registrada en la ciénaga de Marriaga obedecería a una menor presión pesquera ejercida sobre la especie en este sector del río Atrato.

Prochilodus magdalenae es una especie migratoria, cuya reproducción es anual y se sincroniza con el régimen hidrológico de la cuenca (Maldonado-Ocampo, *et al.*, 2012). Durante el periodo de estudio la época reproductiva se registró en los meses de menor pluviosidad (octubre a mayo), lo cual fue evidente por la presencia de individuos maduros (EMS III), así como por el alto valor del IGS, el cual se relaciona con el desarrollo y el crecimiento del ovario y es un indicador preciso de las épocas de reproducción (Vazzoler, 1996). Los datos difirieron de los registrados por otros autores para la misma cuenca, ya que en sus estudios se estableció que entre noviembre y diciembre se iniciaba la maduración gonadal con desoves entre abril y mayo, aunque estos resultados corresponden a estudios parciales (Jaramillo-Villa & Jiménez-Segura, 2008) y en la zona media del Atrato (Cala & Román-Valencia, 1999).

La relación entre longitud y peso reflejó diferentes tipos de crecimiento en machos y hembras, lo cual podría atribuirse a diferencias de edad entre los ejemplares de cada sexo capturados. Durante el estudio se registró un mayor número de machos en estadio juvenil que hembras en este mismo estadio. Por otra parte, los valores menores de *b* después del pico reproductivo podrían reflejar la inversión energética que implica la producción de gónadas y la época de apareamiento (Froese, 2006), así como el desplazamiento de individuos adultos después de este pico, principalmente de machos, cuyas tallas y valores de *b* reflejan la presencia exclusiva de individuos juveniles en la ciénaga.

La ausencia de machos de tallas grandes y el cambio en la proporción de sexos inmediatamente después del pico reproductivo podría ser evidencia de que la población presenta una migración asincrónica, en la cual los machos remontarían río arriba un par de meses antes que las hembras.

Un comportamiento similar se registró en *Prochilodus lineatus* en el río Uruguay, donde los machos migraron meses antes que las hembras después de reproducirse (Sverlij, *et al.*, 1993).

Por otra parte, mientras que la presencia de hembras maduras y en reposo (EMS III y IV) se registró durante todo el estudio en la ciénaga de Marriaga, no hubo presencia de machos adultos en estos estadios entre abril y julio; este comportamiento se ha observado en poblaciones de especies migratorias en las que los individuos residentes no requieren el desplazamiento migratorio para desencadenar la maduración de sus gónadas (Jonsson & Jonsson, 1993).

La migración parcial no es rara en las especies de *Prochilodus*: en Brasil *P. argenteus* se considera una especie migratoria parcial, pues una parte de la población es residente y permanece en el mismo territorio durante las épocas de desove y las demás (Godinho & Kynard, 2006). En la zona aluvial de la Guayana venezolana se demostró que las hembras de *P. mariae* residentes y las migratorias maduraban durante la misma temporada (Saldaña & Venables, 1983). La decisión de migrar o permanecer en las ciénagas podría depender de la oferta alimentaria del lugar, el riesgo de depredación y el gasto energético que pueda demandar el proceso de migración (Jonsson & Jonsson, 1993; Naslund, *et al.*, 1993; Barbarino-Duque, *et al.*, 1998; Chapman, *et al.*, 2011).

La mortalidad de *P. magdalenae* en la ciénaga de Marriaga ($M=0,97$) fue inferior a la estimada para otras cuencas de Colombia, por ejemplo, en la cuenca del Magdalena se calculó en $M=2,29 \text{ año}^{-1}$ (Barreto & Borda, 2008), caso evidente de una población gravemente sobreexplotada (Galvis & Mojica, 2007), y en la cuenca del Sinú se calculó en $M=2,69 \text{ año}^{-1}$ (Valderrama & Solano, 2004).

El coeficiente de crecimiento (*K*) para la especie en la ciénaga de Marriaga indica un crecimiento rápido y superior a los registrados en las cuencas del Magdalena ($0,33 \text{ año}^{-1} - 0,49 \text{ año}^{-1}$) (Valderrama & Petre, 1994; Barreto

& Borda, 2008), del Sinú (0,32 año⁻¹) (Valderrama & Solano, 2004) y del Atrato (0,24 año⁻¹) (Barreto, *et al.*, 2009). Asimismo, los parámetros de la ecuación de Von Bertalanffy evidenciaron que la población de la ciénaga de Marriaga presentaba una longitud asintótica (L_{∞}) mayor a la registrada para otras cuencas (Magdalena: $L_{\infty} = 50,0$; Sinú: $L_{\infty} = 50,2$ y Atrato: $L_{\infty} = 39,6$) (Valderrama & Solano, 2004; Barreto & Borda, 2008; Barreto, *et al.*, 2009). Según Sparre & Venema (1997), la mayoría de las especies de ciclo de vida corto presentan un valor alto de K, y es posible que las condiciones ambientales de la ciénaga de Marriaga le permitan a la población crecer más y con mayor rapidez que en otras cuencas transandinas y zonas del río Atrato, y por ello soportarían aún la extracción pesquera.

Conclusiones

Teniendo en cuenta la TMM, la LE y la mortalidad, en la ciénaga de Marriaga *P. magdalenae* actualmente se encuentra en mejor estado que las poblaciones de las otras cuencas.

La presencia de hembras adultas durante el año de estudio (a diferencia de los machos), sugiere la existencia de una población residente que permanece en la ciénaga a pesar de los cambios en el régimen hidrológico.

Información suplementaria

Figura 1S. Distribución de tallas de *P. magdalenae* capturados en la ciénaga de Marriaga, cuenca baja del río Atrato, Colombia. Vea la figura 1S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/729/2966>

Figura 2S. Relación longitud-peso para hembras y machos de *P. magdalenae* capturados en la ciénaga de Marriaga, cuenca baja del río Atrato, Colombia. Vea la figura 2S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/729/2967>

Figura 3S. Índice Gonadosomático (IGS) para las hembras de *P. magdalenae* de la ciénaga de Marriaga y pluviosidad, cuenca baja del río Atrato, Colombia. Vea la figura 3S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/729/2968>

Figura 4S. Estimación de la mortalidad por el método de curva linealizada para los individuos de *P. magdalenae* capturados en la ciénaga de Marriaga, cuenca baja del río Atrato, Colombia. Vea la figura 4S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/729/2969>

Figura 5S. Curva de crecimiento ($R_n=0,308$) para los individuos de *P. magdalenae* capturados en la ciénaga de Marriaga, cuenca baja del río Atrato, Colombia. Vea la figura 5S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/729/2970>

Agradecimientos

La investigación se llevó a cabo con el apoyo económico y logístico de WWF-Colombia y del Grupo de Investigación en Zoología de la Universidad del Tolima, lo cual fue fundamental para la culminación del estudio.

Contribución de los autores

Margarita Maria Roa-Cubillos: revisión de muestras, análisis de la información, escritura del manuscrito; Francisco Antonio Villa-Navarro: análisis de la información y escritura del manuscrito.

Conflicto de intereses

Ninguno.

Referencias

- Allan, J. D., Abell, R., Hogan, Z. E. B., Revenga, C., Taylor, B. W., Welcomme, R. L., & Winemiller, K. (2005). Overfishing of inland waters. *AIBS Bulletin*, *55* (12): 1041-1051.
- Alonso, J. C., Escobar, F. D., Polo, C. J., Puentes, V. (2014). Aguas Continentales. En: Estado de los principales recursos pesqueros de Colombia - 2014. Serie Recursos Pesqueros de Colombia – AUNAP. Puentes, V., Escobar, F. D., Polo, C. J., y Alonso, J. C. (Eds.). Oficina de Generación del Conocimiento y la Información, Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca – AUNAP. p. 164-199.
- Barbarino-Duque, A., Taphorn, D. C., Winemiller, K. O. (1998). Ecology of the Coporo, *Prochilodus mariae* (Characiformes, Prochilodontidae), and status of annual migrations in western Venezuela. *Environmental biology of fishes*, *53*: 33-46.
- Barreto, C. G. & Borda, C. A. (2008). Evaluación de los recursos pesqueros colombianos. Subgerencia de pesca y acuicultura. Dirección técnica de regulación. Bogotá, D.C. 126 p.
- Barreto, C., Borda, C., Otto, J., Sánchez, C., Sanabria, A., Muñoz, S. (2009). Propuesta de cuotas de aprovechamiento de los recursos pesqueros colombianos y ornamentales para la vigencia 2010. Instituto Colombiano Agropecuario - ICA. 113 p.
- Cala, P. & Román-Valencia, C. (1999). Cambios cíclicos histomorfológicos de las gónadas del *Prochilodus magdalenae* (Pisces: Curimatidae), río Atrato, Colombia. *Dahlia Rev. Asoc. Colomb. Ictiol.* *3*: 3-16.
- Chapman, B. B., Skov, C., Hulthen, K., Brodersen, J., Nilsson, P. A., Hansson, L.-A., Bronmark, C. (2011). Partial migration in fishes: Definitions, methodologies and taxonomic distribution. *Journal of Fish Biology*, *81*: 479-499.
- Codechocó. (2013). Acuerdo consejo directivo número 002. Subdirección de desarrollo sostenible. República de Colombia. 20 p.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., Robledo, C. W. InfoStat versión (2013). Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
- Froese, R. (2006). Cube law, condition factor and weight-length relationships: History, meta-analysis and recommendations. *J. Appl. Ichthyol.* *22*: 241-253.
- Galvis, G. & Mojica, J. I. (2007). The Magdalena river freshwater fishes and fisheries. *Aquatic ecosystem health & management*, *10* (2): 127-139.
- Gayanilo, F. C., & Pauly, D. 1997. FAO - ICLARM stock assessment tools. Reference manual. Computerized Information Series. FAO. Rome.
- González, E., Varona, M., Cala, P. (1996). Datos bioecológicos del oscar, *Astronotus Ocellatus* (Pisces: Cichlidae), en los alrededores de Leticia, Amazonía. *Dahlia. Rev. Asoc. Colomb. Ictiol.* *1*: 51-62.

- Godinho A. L. & Kynard, B.** (2006) Migration and spawning of radio-tagged zulega *Prochilodus argenteus* in a dammed Brazilian river. Transactions of the American Fisheries Society. **135**: 811-824.
- Gutiérrez F. de P., Rivas-Lara, T. S., Rincón López, C.** (2011). Diagnóstico de la pesquería en la cuenca del Atrato. Capítulo 3. 103-118 p. En: Lasso, C. A., F. de Paula Gutiérrez, M. A. Morales-Betancourt, E. Agudelo, H. Ramírez-Gil y R. E. Ajiaco-Martínez (Eds). (2011). II. Pesquerías continentales de Colombia: cuencas del Magdalena-Cauca, Sinú, Canalete, Atrato, Orinoco, Amazonas y vertiente del Pacífico. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de los Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., 304 p.
- INVEMAR.** (2002). Informe anual sobre el estado de los ambientes marinos y costeros en Colombia, Programa Sinam – Unidad coordinadora de información. INVEMAR. 148 p.
- Jaramillo-Villa, U. & Jiménez-Segura, L. F.** (2008). Algunos aspectos biológicos de la población de *Prochilodus magdalenae* en las ciénagas de Tumaradó (río Atrato), Colombia. Actual. Biol. **30** (88): 55-66.
- Jonsson, B. & Jonsson, N.** (1993). Partial migration: Niche shift versus sexual maturation in fishes. Reviews in Fish Biology and Fisheries. **3**: 348-365.
- Maldonado-Ocampo, J. A., Usma, J. S., Villa-Navarro, F. A., Ortega-Lara, A., Prada-Pedreras, S., Jiménez, L.F., Jaramillo-Villa, U., Arango, A., Rivas, T., Sánchez, G. C.** (2012). Peces dulceacuicolas del Chocó Biogeográfico de Colombia. WWF Colombia, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), Universidad del Tolima, Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP), Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C., Colombia. 400 p.
- Mojica J. I., Valderrama, M., Barreto, C., Álvarez-León, R.** (2012). *Prochilodus magdalenae*. En: Mojica, J. I., J. S. Usma, R. Álvarez-León & C. A. Lasso (Eds). (2012). Libro rojo de peces dulceacuicolas de Colombia 2012. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, WWF Colombia y Universidad de Manizales. Bogotá, D. C., Colombia, 319 p.
- Mora, J.M.** (1990). Impacto ambiental de la pesca sobre el complejo de ciénagas de Tumaradó Parque Nacional Natural Katios, Chocó-Colombia. Trabajo de grado. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá D.C.
- Naslund, I., Milbrink, G., Eriksson, L. O., Holmgren, S.** (1993). Importance of habitat productivity differences, competition and predation for the migratory behaviour of Arctic charr. Oikos. **66**: 538-546.
- Parque Nacional Natural de Los Katíos.** (2006). Plan de manejo Parque Nacional Natural Los Katíos 2005-2009. Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia. Territorial Noroccidental. Turbo-Antioquia. 275 p.
- Rivas, T., Conte, B., Puentes, E., Cuesta, E., Mena, M., Ramírez, A., Blandón, M., Casas, Y., Carrascal, O., Rivas, W.** (2002). Estado actual de la pesca en la cuenca media del río Atrato, Chocó-Colombia. Revista Universidad Tecnológica del Choco. **15**: 25-32.
- Saldaña J. & Venables B.** (1983). Energy compartmentalization in migratory fish, *Prochilodus mariae* (Prochilodontidae) of the Orinoco River. Copeia. **3**: 617-623.
- Sverlij, S. B., Espinach A., Orti, G.** (1993). Sinopsis de los datos biológicos y pesqueros del sábalo *Prochilodus lineatus* (Valenciennes, 1847). FAO Sinopsis sobre la Pesca, No.154. Roma, FAO. 64 p.
- Sparre P. & Venema, S. C.** (1997). Introducción a la evaluación de los recursos pesqueros tropicales. Parte 1. FAO Documento técnico de pesca. N°306.1, Rev.2. Roma.
- Valderrama, M., Mogollón, M., Solano, D., Álvarez, L.** (2002). Monitoreo y estadística pesquera en la cuenca del río Sinú con participación comunitaria. Informe Final, periodo marzo 2001 febrero 2002, presentado a Urra SA E.5.P. Montería. Colombia.
- Valderrama, M. & Petrere, M. Jr.** (1994). Crecimiento del bocachico *Prochilodus magdalenae* (Steindachner, 1878; Prochilodontidae) y su relación con el régimen hidrológico en la parte baja de la cuenca del río Magdalena (Colombia). Boletín Científico INPA. **2**: 136-152.
- Valderrama, M. & Solano, D.** (2004). Estado de la población de bocachico, *Prochilodus magdalenae* (Pisces: Characiformes), y su manejo en la cuenca del río Sinú, Colombia. Dahlia, Rev Asociación Colombiana de Ictiología. **7**: 3-12.
- Valderrama, M., Jiménez-Segura, L.F., López-Casa, S., Rivas, T. S., Rincón, C. E., Nieto-Torres, S., González-Cañón, G., Galvis-Galindo, I., Hernández-Barrero, S., Salas F.P.** (2011). *Prochilodus magdalenae* (Prochilodontidae). Capítulo 7,8. 305-311p. En: Lasso, C. A., E. Agudelo Córdoba, L. F. Jiménez-Segura, H. Ramírez-Gil, M. Morales-Betancourt, R. E. Ajiaco-Martínez, F. de P. Gutiérrez, J. S. Usma, S. E. Muñoz Torres y A. I. Sanabria Ochoa (Eds.). I. Catálogo de los recursos pesqueros continentales de Colombia. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de los Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D.C., 715 p.
- Vazzoler, A. E. A. de M.** (1996). Biologia da reprodução de peixes teleosteos: teoria e pratica. EDUEM, Maringa, Sao Pablo, 169 p.
- Welcomme R. L.** (1999). A review of a model for qualitative evaluation of exploitation levels in multi-species fisheries. Fisheries Management and Ecology. **6**: 1-19.
- Wootton, R.** (1998). Ecology of teleost fishes. 2º ed. Kluwer Academic Publishers. Boston, 386 p.

Valores objeto de conservación del subsistema de áreas protegidas de los Andes occidentales, Colombia

✉ Néstor Javier Roncancio-Duque*, ✉ Laura Alejandra Vélez Vanegas

Dirección Territorial Andes Occidentales, Parques Nacionales Naturales de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

Resumen

Para planificar el manejo de la conservación de la biodiversidad y de los recursos naturales se deben formular objetivos específicos y medibles que permitan evaluar la efectividad de la gestión. Su formulación específica para cada uno de los componentes de la biodiversidad o de los servicios ecosistémicos derivados de sus procesos ecológicos no es práctico, pues ello no ayuda a una gestión ambiental efectiva. Por lo tanto, se deben seleccionar unos elementos sustitutos que representen los objetivos de la conservación y las situaciones de manejo que deben resolverse para alcanzarlos. En este sentido, como paso inicial para revisar la planeación del manejo de todo el territorio, el equipo del Subsistema de Áreas Protegidas Andes Occidentales (SAO) llevó a cabo la selección de esos elementos sustitutos denominados “valores objeto de conservación” usando el enfoque de especies del paisaje, el cual permite definir un grupo de especies animales que cumplen funciones de especies sombrilla, piedra angular y bandera. En el SAO se definieron nueve especies, entre las cuales se encuentran cuatro carnívoros, incluidos dos felinos, mamíferos acuáticos, un ave, un ungulado, un primate y un roedor. Con ello se aspiraba a generar un plan de manejo concertado con todos los actores del territorio para lograr su conservación efectiva y consolidar la estructura ecológica del subsistema. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Objetivos de conservación; Especies de paisaje; Manejo efectivo.

Values of conservation objects in the West Andean protected areas subsystem

Abstract

In order to plan the conservation management of the biodiversity and of natural resources in general, we must formulate specific and measurable goals to assess how effective such management is. It is not practical to define such goals for each component of the biodiversity and the ecosystem services derived from the ecological process, as this does not allow for an effective environmental management. Thus, it is necessary to select some surrogate items representing the conservation goals and the management situations that must be resolved to achieve them. In this sense, and as an initial step to review and fit its management plan to the whole territory, the West Andean protected areas subsystem (SAO) team selected those surrogate items and called them values of the conservation objects. The selection was done using the Landscape Species Approach to define a group of animals as umbrella, keystone and flagship species. We selected nine species: four carnivorous including two felids, as well as aquatic mammals, a bird, an ungulate, a primate, and a rodent. With this, we expected to come up with management plans based on the cooperation with all relevant stakeholders in the territory for an effective conservation effort aimed at consolidating the ecological structure of this subsystem. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Object of conservation; Landscape species; Effective management.

Introducción

Mediante la gestión ambiental se busca conservar toda la biodiversidad en un territorio o, por lo menos, dentro de una estructura ecológica que permita mantener la oferta de servicios ecosistémicos en un paisaje determinado. No obstante, no es eficiente planear e implementar estrategias de conservación para cada uno de los componentes de la diversidad biológica (Roberge & Angelstam, 2004). Por lo tanto, se hace necesario seleccionar una serie de elementos sustitutos que representen las situaciones de manejo (objetivos de conservación, amenazas y causas en el paisaje), en torno a las cuales se puedan formular objetivos

medibles y llevar a cabo un monitoreo efectivo que permita adaptar las acciones de manejo en el marco de un proceso de adopción estructurada de decisiones (Holling, 1978; Lyons, *et al.*, 2008). La pretensión es que, al lograr un escenario de conservación efectivo para los objetos sustitutos, se conserve toda la biodiversidad que está en simpatría con ellos (Marcot & Flather, 2007).

*Correspondencia:

Nestor Javier Roncancio Duque; monitoreo.dtao@parquesnacionales.gov.co

Recibido: 9 de agosto de 2018

Aceptado: 14 de febrero de 2019

Editor: Jaime Cantera

Las autoridades ambientales y entidades de apoyo, como las ONG y la academia, hacen ejercicios de selección de objetos sustitutos, los cuales reciben el nombre de objetos de conservación o valores objeto de conservación en algunos escenarios. Algunas veces, tácitamente la selección se apega a conceptos como especie sombrilla (**Branton & Richardson, 2011; Fleishman, et al., 2000; Roberge & Angelstam, 2004; Wilcox, 1984**), especie focal (**Lambeck, 1997**) o especie piedra angular (*keystone*) (**Caro & O'Doherty, 1999**). Sin embargo, en la mayoría de los casos la selección se hace bajo un criterio de rareza de la especie, es decir, aquellas con distribución restringida (endémicas) o bajas densidades, y en otros casos se limita únicamente a un criterio de carisma, especies bandera (**Sergio, et al., 2006; Western, 1987**) vulnerabilidad o, simplemente, a oportunidades de gestión, confundiendo, muchas veces, especies indicadores con especies objetivo (**Caro & O'Doherty, 1999; Feinsinger, 2001**). En cualquier caso, la selección de los sustitutos no responde a un criterio ecológico (**Andelman & Fagan, 2000; Lindenmayer, et al., 2014; Sergio, et al., 2008**), no está justificada con referentes cuantitativos bien definidos y, por ello, puede estar permeada por el sesgo de los participantes en el proceso (**Jarro-Fajardo, 2011; Nekaris, et al., 2015; Stevens, et al., 2011; Zambrano, 2010**).

Estas debilidades metodológicas tienen consecuencias que se reflejan en un gran número de elementos sustitutos redundantes para un mismo paisaje, los cuales en muchos casos no están ligados de manera directa a ninguna situación de manejo. Es así como los planificadores de la conservación se ven abocados recurrentemente a la formulación de planes de manejo de especies en los que se repiten las estrategias de intervención para un mismo paisaje sin objetivos espacialmente explícitos (**Angelstam, et al., 2003; Sanderson, et al., 2002**), lo que resulta en planes de manejo muy generales cuya implementación no es efectiva y, si lo llega a ser, no contribuye a tener un sistema eficazmente gestionado (**Rondinini, et al., 2011**).

La consecuencia de esta selección sin justificación ecológica es la dificultad para determinar los indicadores adecuados y establecer planes de monitoreo ajustados a la planificación de las acciones de manejo (**Rondinini, et al., 2011**). En este sentido, atendiendo a la concepción generalizada de que la investigación transversal es necesaria para la conservación, se hacen ingentes esfuerzos para la recolección de datos que no se enfocan en resolver los vacíos de información requerida para el manejo, con lo cual los recursos disponibles se desperdician (**Caro & O'Doherty, 1999; Sergio, et al., 2008**).

En este contexto, y en aras de revisar y actualizar la planificación para la conservación de su territorio de acción, el equipo del Subsistema de Áreas Protegidas de los Andes Occidentales (SAO) llevó a cabo el proceso de selección de valores objeto de conservación en la perspectiva de resolver los aspectos metodológicos deficientes para así hacer una selección mínima y complementaria (no redundante) de

elementos sustitutos de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos. En dicha selección se recurrió al enfoque de especies paisaje (**Coppolillo, et al., 2004**), en el cual se selecciona un conjunto de especies animales a las que se les puede determinar un rango de hogar y de necesidades de dispersión individual (**Baguette, et al., 2013**) con base en criterios de heterogeneidad y área mínima para satisfacer su requerimientos ecológicos, la vulnerabilidad local frente a las actividades humanas, la funcionalidad ecológica (**Sattler, et al., 2014**) y el reconocimiento e interacción con las poblaciones humanas (**Coppolillo, et al., 2004**). Este tipo de selección de objetos sustitutos ecológicamente justificada combina de manera ponderada las características de las especies sombrilla, focal, piedra angular y bandera (**Rasmussen, 2014**).

Materiales y métodos

Área de estudio. La Dirección Territorial Andes Occidentales de Colombia abarca un área de 15.844.104 hectáreas distribuidas en 188 ecosistemas que van desde zonas arenosas y ríos hasta bosques de páramo pluvial en orobiosmas diferenciados para cada vertiente de las cordilleras, zonas nivales y afloramientos rocosos (**Ríos-Franco & Valencia, 2014**). Este paisaje conserva cerca de 6,67 millones de hectáreas (42 %) de bosques y áreas seminaturales, mientras que los territorios agrícolas ocupan alrededor de 8,88 millones de hectáreas (56 %). Aproximadamente 200.000 hectáreas son áreas húmedas y superficies de agua naturales y artificiales. El uso del suelo está principalmente asociado a ganadería extensiva (pastos), cultivos de café, caña de azúcar y arroz, y cerca de 600 centros urbanos que demandan los servicios ecosistémicos de las áreas de conservación (Figura 1).

Selección de los valores objeto de conservación (VOC). Para la selección de los VOC de la Dirección Territorial se empleó el método de especies paisaje (*Landscape Species Approach*), con la aproximación conceptual propuesto en los boletines 2, 3 y 4 del Living Landscapes Program de la **Wildlife Conservation Society (WCS)** (2001-2002) y el manual técnico 5 de este mismo programa (**Stringberg, 2007**). El objetivo inicial del método es elegir un conjunto limitado de especies animales a cuyos individuos se les pueden definir valores de dispersión y que puedan representar todos los objetivos de conservación definidos para el paisaje y sirvan para monitorizar la efectividad de las estrategias implementadas (**Elzinga, et al., 2001; Sergio, et al., 2008**). La selección de los valores objeto de conservación, o especies paisaje, se basó en cinco criterios: 1) el área, es decir, las especies que necesiten mayor cantidad de área para sostener poblaciones viables; 2) la heterogeneidad, o sea las especies que requieren más tipos de cobertura vegetal, o asociaciones vegetales naturales y zonas de manejo (diferentes tipos de aproximación para el manejo, por ejemplo, la de las jurisdicciones administrativas), para satisfacer sus requerimientos ecológicos; 3) la vulnerabilidad, es decir, las especies que hoy sufren el impacto, o pueden sufrirlo

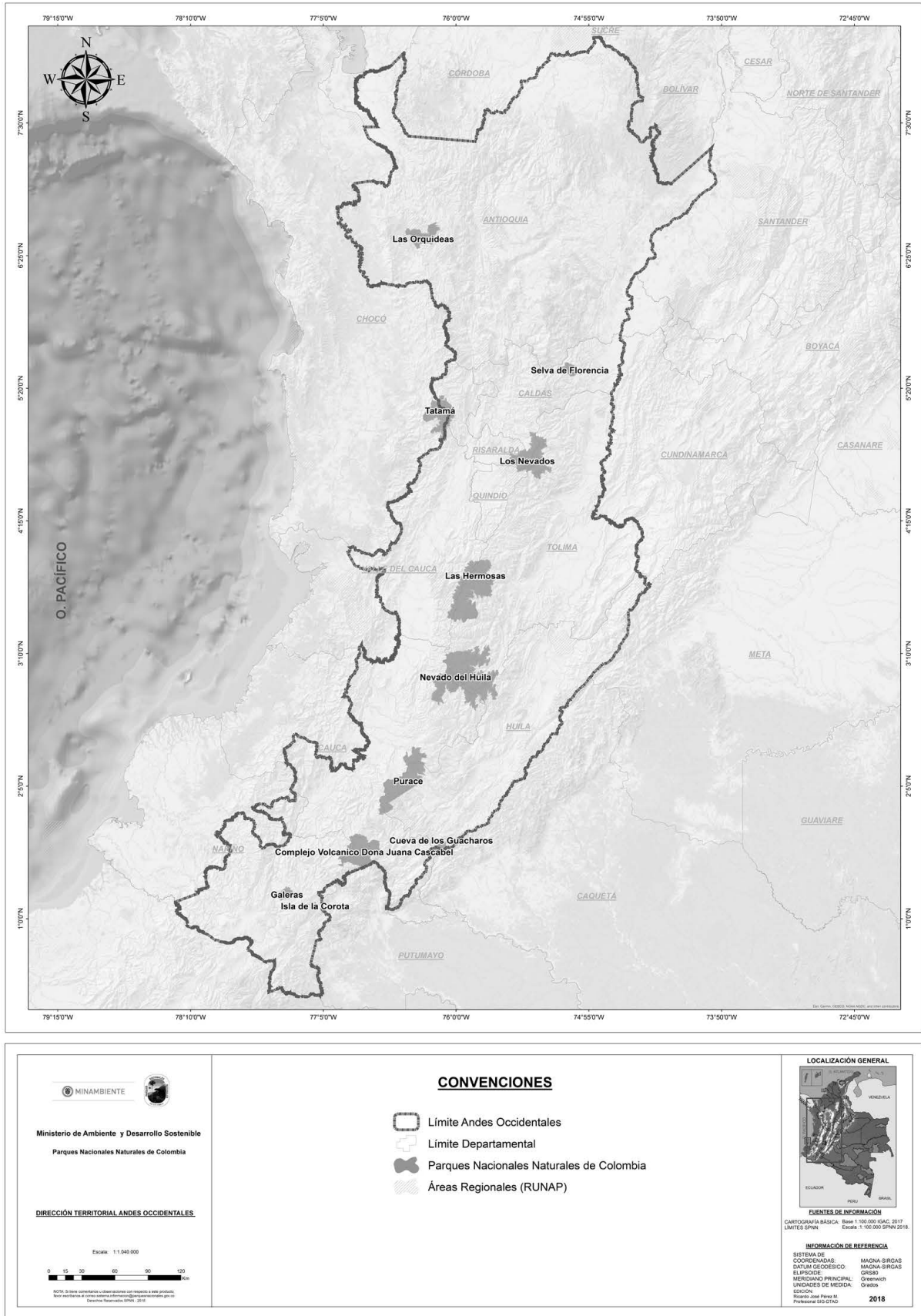


Figura 1. Subsistema de los Andes Occidentales, Colombia

en el futuro, de las actividades humanas en términos de la gravedad, la reversibilidad y la proporción del área afectada; 4) la funcionalidad ecológica, o sea, las especies que cumplen más funciones dentro del ecosistema (polinización, degradación de materia orgánica, depredación, exclusión competitiva, etc.), y 5) la importancia socioeconómica, referida a las especies que, en términos culturales o económicos, tengan mayor significación positiva o negativa y puedan, además, ser especies bandera o carismáticas. Las especies seleccionadas fueron aquellas que cumplieron de manera más ajustada con estos criterios.

En este sentido, fue necesario contar con los parámetros y los criterios de selección. Los primeros recogen la información acerca del paisaje en el cual se va a hacer la selección de los valores objeto de conservación. En este caso, se referían al número de ecosistemas, biomas o tipos de asociaciones vegetales del paisaje, los tipos de zonas de manejo, el área que ocupan, las actividades humanas que se dan en el paisaje y que sean, o puedan llegar a convertirse en una amenaza para la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Asimismo, se decidió recoger la información sobre el rango de hogar con datos continuos. Además, se determinó cuantitativamente el momento en que se podía considerar que un tipo de cobertura, ecosistema o zona de manejo estaba representado por una especie. Por último, se relacionaron las funciones ecológicas presentes en el paisaje y se definió a partir de qué valor se podía considerar que las representaba una especie.

En cuanto a los criterios de selección, se propuso inicialmente una serie de especies candidatas que cumplieran con uno o más de los criterios. Con base en los criterios definidos tienden a seleccionarse especies de vertebrados grandes, mamíferos, aves o reptiles producto de la relación alométrica entre el tamaño corporal y el rango de hogar (Sinclair, 2003; Wilcox, 1984), y la relación positiva entre la masa y la distancia de dispersión (Jenkins, et al., 2007). Pensando en las oportunidades de gestión, las cuales son mayores para las especies que se encuentran en alguna categoría de vulnerabilidad, se utilizaron los libros rojos de mamíferos, aves y reptiles de Colombia (Castaño-Mora, 2002; Renjifo, et al., 2002; Rodríguez-Mahecha, et al., 2006). Además, después de un ejercicio de intercambio de observaciones sobre la metodología con el comité técnico del Subsistema, se adicionaron algunas especies de peces, con lo que se determinaron, finalmente, 28 especies candidatas entre mamíferos, aves y peces (Tabla 1S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/719/3526>).

A continuación, se presenta el proceso de gestión de la información seguido para cada uno de los cinco criterios y las especies candidatas.

Criterio 1. Heterogeneidad.

Parámetros de selección. Tipos de "hábitat". A partir de la clasificación de ecosistemas hecha para determinar las prioridades de conservación en el Subsistema (Ríos-Franco

& Valencia, 2014), la cual relaciona 188 tipos diferentes de ecosistemas, se escogieron 19 de ellos (Tabla 1), los cuales resultaron de unir aquellos que representaban un mismo tipo de cobertura y piso bioclimático, ya que no se consideró que una mayor diferenciación generara un efecto en términos de representatividad para alguna de las especies candidatas. Por ejemplo, los bosques de páramo en la clasificación original se dividían en pluviales, muy húmedos, húmedos o secos y, además, por cordilleras (3) y por vertientes (2), lo que resultaba en hasta 24 tipos diferentes de ecosistemas para cada tipo de bosque y piso bioclimático.

Para cada uno de los 19 tipos de ecosistema, se determinó su área de ocupación en el paisaje y se especificó el valor de nivel de uso necesario para considerarlo como valor objeto de conservación (Tabla 1). En cuanto a los tipos de "hábitat", se consideró que debían incluirse cuando el nivel de uso fuera de dos o más en una escala de 0 a 3 (ver criterios de selección).

Zonas de manejo. El Subsistema de los Andes Occidentales (SAO) está dividido en cuatro subsistemas temáticos: Sistema Departamental de Áreas Protegidas de Antioquia (SIDAP Antioquia), Sistema Regional de Áreas Protegidas del Eje Cafetero (SIRAP Eje Cafetero), SIRAP Macizo y SIDAP Nariño, los cuales tienen diferentes estructuras, tipos

Tabla 1. Ecosistemas naturales remanentes de la territorial Andes Occidentales y el nivel de representación del VOC para cada tipo de hábitat según los criterios de selección.

No.	Tipo de ecosistema	Área (ha)	Nivel de uso del VOC
1	Arbustal andino	1.117.774	2
2	Arbustal basal	539.727	2
3	Arbustal de páramo	184.129	2
4	Arbustal subandino	277.828	2
5	Bosque andino	1.142.389	2
6	Bosque basal	1.827.898	2
7	Bosque de páramo	371.586	2
8	Bosque subandino	960.723	2
9	Cuerpo de agua andino	4.753	2
10	Cuerpo de agua basal	24.120	2
11	Cuerpo de agua de páramo	756	2
12	Cuerpo de agua subandino	73	2
13	Herbazal andino	41.761	2
14	Herbazal basal	258.863	2
15	Herbazal de paramo	357.542	2
16	Herbazal subandino	111.853	2
17	Humedal basal	115.305	2
18	Humedal subandino	707	2
19	Ríos	80.445	2

VOC: valores objeto de conservación

de gobernabilidad, posicionamiento y estados de avance en términos de la consolidación e implementación de los planes de acción. Estos cuatro escenarios se concibieron como los factores políticos y de gestión determinantes para abordar el manejo (planificación e implementación de las acciones y el monitoreo) en los diferentes sectores del paisaje. En este sentido, se estableció que los cuatro subsistemas temáticos serían las zonas de manejo que debían quedar representadas por los valores objeto de conservación, se determinó su área y se les asignó el valor de nivel de uso con el cual quedarían representados como valor objeto de conservación (Tabla 2). Asimismo, se consideró que las zonas de manejo quedaban representadas cuando el nivel de uso fuera de 2 o más en una escala de 0 a 3 (ver criterios de selección).

Criterios de selección. Se determinó qué tanto representaba cada una de las especies candidatas a los 19 ecosistemas y a las cuatro zonas de manejo, así: “0= La población de la especie candidata no usa este tipo de hábitat o zona de manejo. Esta especie, o nunca ha sido vista allí, o solo se la ha visto de manera ocasional (por ejemplo, un animal explorando este terreno). 1= La población de la especie candidata usa este tipo de hábitat o zona de manejo. Sin embargo, dada la abundancia y persistencia de esta especie, es muy poco probable que sufra un fuerte impacto si se produce una disminución en la extensión, calidad o acceso al hábitat o zona de manejo. La especie puede compensar fácilmente esas reducciones haciendo uso de otros hábitats o zonas. 2= La población de la especie candidata es altamente dependiente de este tipo de hábitat o zona de manejo, aunque no requiere de él para su persistencia. Una reducción en la extensión, calidad o acceso a este hábitat o zona de manejo tendrá impactos significativos sobre la abundancia y la distribución de la especie candidata en el paisaje; sin embargo, la pérdida de este muy probablemente no causará su extinción local. Este valor puede considerarse como una selección apropiada si las observaciones de una especie indican que pasa una cantidad considerable de tiempo en el hábitat o zona de manejo, aunque no quede claro si es que técnicamente “requiere” de este. 3= La población de una especie candidata requiere este tipo de hábitat o zona de manejo para cumplir con su ciclo de vida. Si el hábitat o zona de manejo es destruido, la especie se extinguirá localmente.” (Stringberg, 2007).

Criterio 2. Área

Parámetros de selección. Se definió que el rango de hogar se registraría con valores continuos.

Criterios de selección. Además de la estimación del rango de hogar para cada especie, se tuvo en cuenta si había distancias de dispersión largas (> a 10 km), si la conectividad (calificados como “SI” o “No”) y la proporción de área ocupada por la especie en el paisaje eran importantes. Para incluir la estimación del rango de hogar se revisaron publicaciones que documentaran estudios para cada especie y se consultaron expertos de los diferentes grupos (Tabla 1S). Para determinar la proporción de área del paisaje

Tabla 2. Zonas de manejo de la Territorial Andes occidentales y el nivel de representación del VOC para cada una según los criterios de selección.

No.	Zonas de manejo	Área (ha)	Nivel de uso del VOC
1	Antioquia	6.296.422	2
2	Eje cafetero	3.196.752	2
3	Macizo	4.810.684	2
4	Nariño	3.507.300	2

VOC: valores objeto de conservación

ocupada por cada especie candidata, se ajustaron los polígonos de distribución de la *Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza* (UICN), teniendo en cuenta el rango altitudinal de localización de la especie. Por ejemplo, para el mono aullador rojo, el polígono de la UICN se extiende desde el borde oriental de la región Pacífico hasta la Amazonia brasilera, incluidas las partes más altas de las cordilleras Central y Oriental (>5.000 m). La presencia del mono aullador se ha confirmado solo hasta los 3.200 msnm (Hernández-Camacho & Cooper, 1976), por lo tanto, el área por encima de dicha altitud se sustrajo del polígono. Posteriormente se calculó la proporción de la Dirección Territorial Andes Occidentales con respecto al área de distribución de la especie. La gestión de la información se llevó a cabo en el laboratorio de Sistemas de Información Geográfica de la Dirección Territorial Andes Occidentales de Parques Nacionales Naturales de Colombia con el programa ArcGis 9.2.

Criterio 3. Vulnerabilidad

Parámetros de selección. Para definir la vulnerabilidad de cada especie de paisaje, se tuvieron en cuenta las actividades humanas que se hubieran convertido o pudieran llegar a convertirse en una amenaza para la conservación de la biodiversidad o los servicios ecosistémicos. Queda implícito que no toda actividad humana es necesariamente una amenaza, ya que ello depende de la gravedad, la proporción del área afectada y la resiliencia del sistema (especie, comunidad, etc.). Se definieron 15 actividades humanas: tala para cultivos y ganadería, quema, extracción de madera, y flora no maderable, cacería por conflicto, consumo y comercio, introducción de especies animales y vegetales, minería, construcción de vías y represas, disposición de residuos en áreas de conservación y ecoturismo. Asimismo, para cada actividad humana se determinó la urgencia y la probabilidad de que ocurriera. “La urgencia define cuán pronto ocurrirá una actividad humana en particular: 0= Si ocurre no lo hará en los próximos 10 años. 1= Si ocurre, podría ser en los próximos 3 a 10 años. 2= Si ocurre, podría ser en los próximos 1 a 3 años. 3= La amenaza ya está ocurriendo y se debe actuar de inmediato. La probabilidad de que la actividad ocurra es el grado de incertidumbre asociado con una actividad humana particular y se determina

con un valor entre 0 y 1 (por ejemplo, si se piensa que hay un 25 % de probabilidad de que se construya una represa, se debe ingresar 0,25).” (Stringberg, 2007). Todas las actividades humanas relacionadas en la Dirección Territorial Andes Occidentales obtuvieron una calificación de 3 en cuanto a la urgencia y de 1 en cuanto a la probabilidad de que ocurriera.

Criterios de selección. La vulnerabilidad de cada especie candidata en el paisaje se determina a partir de su estatus de conservación (Castaño-Mora, 2002; Renjifo, et al., 2002; Rodríguez-Mahecha, et al., 2006) y un índice de amenaza que integra la gravedad con que cada actividad humana afecta la especie, la capacidad de recuperación de esta una vez se elimina esa actividad humana, y la proporción de área que ocupa la especie en el paisaje afectado por dicha actividad humana. “La gravedad es la medida en que una amenaza particular disminuye la abundancia y la distribución local de la especie, así: 0= Ninguna o positiva. 1= Poca, es decir, un efecto medible, aunque pequeño sobre la densidad o la distribución. 2= Alguna, por su efecto sustancial sobre la densidad o la distribución, aunque la erradicación local es poco probable. 3= Seria, ya que la erradicación local es probable.” (Stringberg, 2007). El tiempo de recuperación se refiere a “cuán rápido la población puede recuperarse de los impactos de una amenaza particular (que está ocurriendo o puede ocurrir) si es que esta es eliminada. El tiempo de recuperación se define seleccionando uno de los siguientes valores: 0= Inmediato o en menos de 1 año. 1= Recuperación entre 1 y 10 años. 2= Recuperación entre 10 y 100 años. 3= La recuperación puede tomar más de 100 años o simplemente puede que no ocurra. La proporción de área afectada es la proporción estimada de la distribución local de la especie (en el paisaje) que es afectada por una amenaza particular, así: 0= La distribución local no se ve afectada. 1= Menos del 10 % de la distribución local se ve afectada. 2= 10 a 25 % de la distribución local se ve afectada. 3= 25 a 50 % de la distribución local se ve afectada. 4= Más de la mitad de la distribución local se ve afectada.” (Stringberg, 2007).

Para determinar la proporción del área afectada por cada actividad humana y cada especie candidata, se usó la metodología de *CORINE Land Cover* adaptada para Colombia, escala 1: 100.000 (Ideam, 2010), recurriendo a la función “Clip” de la *Shape Management Tool* del Arc Gis 9.2. Todas las especies candidatas se calificaron según todas las actividades humanas y los tres criterios (Tablas 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/719/3527>, 3S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/719/3528> y 4S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/719/3529>).

Criterio 4. Funcionalidad

Parámetros de selección. Se relacionaron 10 funciones ecológicas que dan lugar en el paisaje de la territorial Andes Occidentales: herbívora, depredación de primer, segundo y

mayor orden, degradación de materia orgánica, depredación y dispersión de semillas, polinización, disturbio mecánico, control de plagas e interacción competitiva.

Criterios de selección. Cada especie candidata se calificó según la importancia de su papel con respecto a cada una de las funciones ecológicas consideradas, así: “0= La especie no desempeña ningún papel en esa función. 1= Se piensa que la especie tiene algún efecto o tiene poco efecto. 2= La especie tiene un efecto claro. 3= La especie tiene un efecto fuerte” (Stringberg, 2007) (Tabla 5S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/719/3530>).

Criterio 5. Importancia socioeconómica

Parámetros de selección. Para determinar la importancia socioeconómica de cada especie candidata en el paisaje, se consideró si tenía un valor económico positivo o negativo y un valor cultural positivo o negativo (una misma especie en el paisaje puede tener valores culturales y económicos tanto positivos como negativos). Además, se consideró su potencial como especie emblemática o bandera.

Criterios de selección. Cada especie fue calificada según las cinco opciones, así: “0= Especie sin significación. 1= Especie con alguna significación. 2= Especie con gran significación.” (Stringberg, 2007) (Tabla 3).

Posteriormente se calcularon los puntajes originales y normalizados para cada criterio y el puntaje agregado para cada especie (para los detalles de las ecuaciones, ver el Manual técnico 5 del Living Landscapes Program de Stringberg, 2007) (Tabla 6S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/719/3531>).

Análisis de datos. Antes de iniciar la selección de los valores objeto de conservación, se definieron los siguientes parámetros: el margen de error para seleccionar especies con puntajes agregados similares; el valor de corte para definir cuándo una amenaza individual estaba representada por una especie dentro del conjunto final del valor objeto de conservación, y el valor mínimo requerido del estatus de conservación. El margen de error y el valor de corte para que una amenaza quedara representada fueron de 5 % y 0,5, respectivamente. Además, dado que todas las especies candidatas estaban clasificadas bajo algún criterio de amenaza, todas se incluyeron en la categoría de estatus de conservación.

En el proceso de selección final de los valores objeto de conservación participaron los comités técnicos de los subsistemas y se usó el programa Landscape species 2.0 como herramienta de apoyo para los cálculos y las diferentes iteraciones. En cuanto a la selección de los valores objeto de conservación del subsistema, se escogió la especie con el mayor puntaje agregado. Al escoger la primera especie se extrajeron los tipos de “hábitat”, las zonas de manejo, las actividades humanas y las funciones ecológicas que representaba.

A continuación, se escogió la especie con el puntaje agregado más alto que representara nuevos tipos de hábitat, zonas de manejo, actividades humanas o funciones

Tabla 3. Calificación de la importancia socioeconómica de cada especie candidata

Nombre común	Potencial especie bandera	Valor cultural local		Valor económico	
		Positivo	Negativo	Positivo	Negativo
Mono aullador rojo	2	1	0	1	0
Pato colorado	1	1	1	1	1
Mono araña negro	2	2	0	2	0
Mono araña café	2	1	0	1	0
Lorito cadillero	1	0	0	0	0
Tangara multicolor	1	1	0	0	0
Paujil de pico azul	2	2	0	2	0
Guagua loba	2	2	0	2	0
Cacique candela	1	0	0	0	0
Mono churuco	2	2	0	2	0
Perico paramuno	2	1	0	0	0
Nutria	2	0	1	2	2
Loro orejiamarillo	2	1	0	1	0
Águila crestada	2	0	2	0	2
Jaguar	2	1	1	0	2
Pava caucana	2	1	0	2	0
Zambullidor plateado	1	0	0	0	0
Puma	2	0	0	0	2
Danta centroamericana	2	2	0	2	0
Danta común	2	2	0	2	0
Danta de páramo	2	2	0	2	0
Oso de anteojos	2	0	2	0	2
Cóndor	2	2	2	0	0
Sabaleta	0	0	0	2	0
Mojarra negra	0	0	0	2	0
Bagre blanco	0	0	0	2	0
Mico tití gris	2	0	0	0	2
Manatí	2	2	0	2	0

ecológicas. Una especie puede tener un puntaje agregado muy alto, pero si no representa nuevos elementos con relación a una especie previamente seleccionada, no se la tiene en cuenta como valor objeto de conservación para evitar la redundancia de los esfuerzos de conservación en el paisaje.

Cuando varias especies presentaron un valor agregado que no se diferenciaba significativamente en cuanto al margen de error predefinido, se evaluó cuál especie presentaba mayores oportunidades de gestión y esta se seleccionaba.

Resultados

En cuatro ejercicios iterativos llevados a cabo por el equipo técnico de la Dirección Territorial Andes Occidentales (DTAO) y en algunos subsistemas temáticos se seleccionaron como valores objeto de conservación el oso, el puma, el pato colorado y el manatí, siendo el oso

el primero en todos los resultados. La danta de páramo y el jaguar se seleccionaron en tres de los cuatro ejercicios. Además, el mono churuco se seleccionó en dos análisis, en tanto que la nutria y la guagua loba se seleccionaron cada uno en una de las iteraciones (Tabla 4).

Discusión

El oso andino depende principalmente de los bosques altoandinos y de páramo. Está presente en los cuatro subsistemas temáticos, lo que no lo hace dependiente exclusivamente de uno de ellos (Tabla 5), y está asociado a 12 de las 15 actividades humanas que podrían traducirse en amenazas directas para la biodiversidad en este paisaje, siendo particularmente significativo el efecto de la cacería por conflicto (Tabla 7S, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/downloadSuppFile/719/3532>).

Tabla 4. Especies Valor Objeto de Conservación (VOC) seleccionadas para la Territorial Andes Occidentales.

Orden	Asesores en Biología de la conservación de SINAP y DTAO	Equipo técnico de DTAO	Comité técnico de SIRAP Macizo	Comité técnico de SIRAP Eje Cafetero
1	Oso andino	Oso andino	Oso andino	Oso andino
2	Puma	Jaguar	Puma	Puma
3	Pato colorado	Pato colorado	Danta de páramo	Danta de páramo
4	Danta de páramo	Mono churuco	Pato colorado	Jaguar
5	Jaguar	Manatí	Nutria	Pato colorado
6	Mono churuco	Puma	Manatí	Guagua loba
7	Manatí			Manatí

Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP)
 Sistema Regional de Áreas Protegidas (SIRAP)
 Dirección Territorial Andes Occidentales (DTAO)

Tabla 5. Representación de las zonas de manejo (subsistemas temáticos) para los valores objeto de conservación del Subsistema Andes Occidentales

VOC	Antioquia	Eje cafetero	Macizo	Nariño
Pato colorado	0	3	3	3
Guagua loba	2	2	2	1
Mono churuco	3	0	3	0
Nutria	2	2	2	2
Jaguar	3	1	1	2
Puma	2	2	2	2
Danta de páramo	1	2	2	2
Oso de anteojos	2	2	2	2
Manatí	3	0	0	0

VOC: valores objeto de conservación

El puma es la especie con mayor representación de ecosistemas dentro del subsistema (14/19) (Tabla 5), lo cual está asociado con su amplia distribución altitudinal. Se distribuye en los cuatro subsistemas temáticos (Tabla 5) y es vulnerable a 11 de las 15 actividades humanas relacionadas (Tabla 7S), entre las cuales se destaca la cacería para consumo de especies que hacen parte de su dieta, lo cual degrada su hábitat.

El pato colorado representa los cuerpos de agua andinos y de páramo, no el SIDAP Antioquia, y está asociado principalmente a la introducción de especies animales, específicamente a la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) y a otras actividades que generan la degradación de su hábitat, incluida la minería.

El manatí representa exclusivamente los ecosistemas acuáticos basales únicamente en el SIDAP Antioquia, por lo tanto, dentro del SAO depende exclusivamente de la efectiva gestión ambiental en ese subsistema. Esta especie se ha visto fuertemente afectada por la introducción de especies vegetales y la cacería por consumo.

La danta de páramo representa casi todos los ecosistemas del bosque altoandino hacia arriba, incluidos los cuerpos de agua. Depende en buena parte de la efectiva gestión en todos los subsistemas, aunque en menor proporción del SIDAP Antioquia. La especie está afectada particularmente por la cacería por conflicto, asociada probablemente con el cultivo de papa, y a la cacería para consumo.

El jaguar está asociado con ocho de los diez ecosistemas por debajo de los sistemas subandinos, pero principalmente con los bosques basales. Depende fundamentalmente de la efectiva gestión en el SIDAP Antioquia, y la actividad humana que más lo afecta directamente es la cacería por conflicto, además de la reducción o degradación de los bosques basales debido a la cacería para consumo de las especies que hacen parte de su dieta.

El mono churuco depende exclusivamente de los bosques en zonas basales y subandinas, además de dos subsistemas temáticos sin continuidad, el SIDAP Antioquia y el SIRAP Macizo. La tala rasa para cultivos y pasturas y la

quemada son las actividades humanas que más lo afectan al ser una especie dependiente de dosis altas. El mono churuco también se ve afectado por la cacería para consumo.

La nutria depende de la asociación de bosques subandinos y basales con los ríos y cuerpos de agua y está en los cuatro subsistemas temáticos. Además de ser vulnerable a las actividades que generan la degradación de su hábitat, es la especie del paisaje más vulnerable a la cacería para comercio.

Por último, la guagua loba depende exclusivamente de los bosques altoandinos, desde Antioquia hasta el Macizo, y se ve afectada principalmente por la cacería para consumo y, además, por la reducción y la fragmentación de su hábitat.

Cinco de los nueve valores objeto de conservación son grandes mamíferos. Los grandes mamíferos, principalmente los grandes carnívoros, se han usado como sustitutos en diferentes categorías: como especie piedra angular (Sinclair, 2003; Ucarli, 2011), bandera (Clark, 2004; Ucarli, 2011) o sombrilla (McKelvey, *et al.*, 2000; Ucarli, 2011). No obstante, su potencial como objeto sustituto depende del contexto asociado y qué tanto representa los objetivos de conservación y las situaciones de manejo (Sergio, *et al.*, 2008, 2006). También se seleccionaron especies de otros niveles de la cadena alimenticia que permiten incrementar la eficacia al combinar estrategias de conservación (Hanley, *et al.*, 2005; Keuroghlian, *et al.*, 2009).

El oso andino se ha usado como objeto sustituto en Ecuador desde la perspectiva de especie bandera. Sin embargo, se reconoce que se hizo pensando en un público general y no en las comunidades locales, las cuales tenían interacciones económicas negativas con la especie como resultado de la actividad depredadora de este úrsido contra el ganado bovino (Clark, 2004). Tácitamente se lo reconoce como una especie sombrilla y piedra angular que puede servir de herramienta efectiva de conservación, aunque su eficacia debe comprobarse empíricamente (Sanderson, *et al.*, 2002). En general, los grandes felinos se han concebido como especies piedra angulares o carismáticas (McKelvey, *et al.*, 2000) y el jaguar, por ejemplo, se ha propuesto como especie paisaje para bosques atlánticos en Brasil (Cullen Jr, 2006). Por otra parte, diversas especies de nutrias se han usado como objetos sustitutos y la nutria americana se ha propuesto explícitamente como especie sombrilla para el Neotrópico (Stevens, *et al.*, 2011).

En Colombia y en los países vecinos existen programas o iniciativas de conservación del oso en diferentes escalas de paisaje (Arjona, *et al.*, 2012, Boher, *et al.*, 1994, Rodríguez, 2001, Rodríguez, *et al.*, 2003), de la danta de montaña (Lizcano, *et al.*, 2004), de felinos, incluidos el jaguar y el puma (Castaño-Urbe, *et al.*, 2013) y de la guagua loba (Saavedra-Rodríguez, *et al.*, 2012), así como propuestas de gestión que incluyen los corredores para el jaguar, el oso y el manatí planeados por Corantioquia (González-Caro, *et al.*, 2014), y otros para el puma y el mono churuco están siendo contemplados por el SIDAP Antioquia, con los cuales se

pretende integrar los objetivos de manejo y articular las actividades de cada estrategia.

Es claro que el tamaño usual de las áreas protegidas no alcanza para conservar poblaciones viables de la mayoría de estas especies (Noss, *et al.*, 1996), y es en este sentido que se decidió consolidar el SINAP. Sin embargo, para definir los objetivos de manejo en esta escala de paisaje se hace necesario determinar la disponibilidad actual de hábitat de estas especies, inicialmente siguiendo métodos basados en principios fundamentales y, posteriormente, validándolos con modelos estadísticos (Craighead & Cross, 2007), a partir de lo cual se definen sus necesidades de conectividad (Clark, 2004). La estructura ecológica principal de este paisaje emergería de la red ecológica conformada por las áreas mínimas requeridas en cuanto a estructura y configuración para mantener poblaciones viables de las especies paisaje (Baguette, *et al.*, 2013, Lambeck, 1997; Roberge & Angelstam, 2004).

Esta aproximación asume que debido a sus características, estas especies son adecuadas como elementos sustitutos de la biodiversidad. Sin embargo, es necesario probar esta hipótesis verificando empíricamente la riqueza y la abundancia en grupos indicadores (Sergio, *et al.*, 2008).

Para el caso particular de los indicadores de abundancia ideales para el monitoreo de poblaciones animales, se pueden incluir tamaños poblacionales, densidades o sustitutos según la proporción o cantidad de área usada u ocupada, asumiendo que a mayor abundancia mayor será el área usada u ocupada por una especie en un territorio, y, por ende, su supervivencia, fecundidad y crecimiento. El indicador seleccionado depende de la capacidad de implementar las metodologías disponibles para cada uno.

Entre las metodologías disponibles que permiten tener estimaciones más precisas, ya que permiten calcular la probabilidad de detección y el área de muestreo real, se cuenta con los modelos de ocupación (MacKenzie, *et al.*, 2002), el muestreo por distancia (Buckland, *et al.*, 2001), el método de marca y recaptura (Nichols, 1992), así como un método que permite estimar densidades con cámaras trampa sin necesidad del reconocimiento individual (Rowcliffe, *et al.*, 2008).

Los modelos de ocupación estiman la proporción del área (o parches) ocupada o usada y pueden emplearse en áreas relativamente grandes, dados los recursos y la capacidad logística implícitas, y en organismos susceptibles de ser detectados con cualquier tipo de registro (directo o siguiendo rastros). Por otro lado, el muestreo por distancias conviene en áreas moderadamente grandes y organismos con abundancias relativamente altas que sean detectables por observación directa. No obstante, hay variaciones que permiten recurrir al muestreo por distancias utilizando rastros, siempre y cuando sea posible estimar la tasa de producción y de desaparición del rastro.

El método de marca y recaptura es aplicable en áreas relativamente pequeñas, con tamaños poblacionales moderados y organismos susceptibles de ser capturados, marcados,

liberados y reconocidos durante todo el experimento. Esta metodología tiene como limitante que no estima el área de muestreo, la cual debe calcularse con base en las distancias de dispersión de algunos individuos, lo cual puede afectar la traducción del tamaño poblacional a densidades.

Por último, la estimación de la densidad mediante cámaras trampa y sin necesidad de reconocimiento individual es una metodología aplicable a varios vertebrados terrestres medianos y grandes; con ella pueden explorarse áreas inferenciales variables, pero ello implica una gran cantidad de cámaras o la capacidad de moverlas frecuentemente para obtener los tamaños de muestra adecuados.

Dado el tamaño de la DTAO y el hecho de que la mayoría de los valores objeto de conservación seleccionados eran organismos que se detectan con dificultad y cuya abundancia es relativamente baja, se planteó un plan de monitoreo para los indicadores de abundancia siguiendo el método de **Mackenzie** (2002), el cual permite usar cualquier tipo de registro (incluidos los tomados mediante técnicas de 'fototrampeo'). Además, se planteó implementar el método de **Rowcliffe** (2008) para medir la densidad poblacional y evaluar si se logran estimaciones con la suficiente precisión para poder detectar cambios en caso de haberlos (poder estadístico).

En algunos casos las especies paisaje podrían no cobijar algunas cuya distribución geográfica es restringida y cuyos requerimientos ecológicos son específicos, o sobre las cuales hay amenazas particulares (**Andelman & Fagan, 2000; Fontaine, et al., 2007; Lindenmayer, et al., 2014**). En este sentido, es necesario analizar cuáles de esos componentes de la biodiversidad podrían requerir acciones particulares, lo que complementaría la lista. Normalmente, en estas adiciones se integran especies que necesitan estrategias de conservación basadas en el desplazamiento de organismos vivos (reintroducciones, refuerzos, suplementos o introducciones) (**UICN, 1998**), pues sus poblaciones están tan reducidas y aisladas que el garantizar únicamente el mantenimiento o recuperación de su hábitat no garantiza la recuperación de las poblaciones.

Por lo tanto, una vez determinada la disponibilidad de hábitat y las áreas con mayor probabilidad de conectividad, se deberá consultar a los expertos de otros grupos, y a botánicos, herpetólogos, entomólogos, para evaluar cuáles organismos deben ser incluidos, con el fin de complementar los valores objeto de conservación.

Conclusiones

El presente estudio representa el primer aporte para la Dirección Territorial Andes Occidentales sobre la selección de valores objeto de conservación que pueden ser elementos sustitutos de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en el SAO. A partir de esta selección se hace necesario analizar la distribución del hábitat actual y futuro de dichos objetos de conservación teniendo en cuenta que está determinada por diferentes parámetros físicos y bióticos que

pueden tener mayor o menor incidencia dependiendo de los requerimientos ecológicos de cada especie. Además, el conocimiento de los hábitats de dichos valores contribuye a una mejor planificación de la gestión del territorio y la conservación de las diferentes especies. Por ello, se pretende ampliar su selección y conocimiento en todo el ámbito andino para obtener información a una mayor escala.

Información suplementaria

Tabla 1S. Especies candidatas definidas para el Subsistema Andes Occidentales. Vea la tabla 1S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/719/3526>

Tabla 2S. Actividades humanas: calificación según la gravedad con que cada actividad humana afecta la especie candidata. 0= ninguna o positiva, 1= poca-efecto medible aunque pequeño sobre la densidad o la distribución, 2= alguna – efecto sustancial sobre la densidad o la distribución, aunque la erradicación local es poco probable, 3= la erradicación local es probable. Vea la tabla 2S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/719/3527>

Tabla 3S. Actividades humanas: calificación según la capacidad de recuperación de la especie una vez removida la actividad humana. 0= inmediato o en menos de 1 año, 1= Recuperación entre 1-10 años, 2= Recuperación entre 10-100 años y 3= Recuperación puede tomar más de 100 años o simplemente puede que no ocurra. Vea la tabla 3S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/719/3528>

Tabla 4S. Actividades humanas: proporción de área de paisaje que ocupa la especie afectada por la actividad humana. 0= La distribución local no es afectada, 1= < 10% de la distribución local es afectada, 2= 10% - 25% de la distribución local es afectada, 3= 25% - 50% de la distribución local es afectada, 4 = Más de la mitad de la distribución local es afectada. Vea la tabla 4S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/719/3529>

Tabla 5S. Calificación de funciones ecológicas de las especies. 0= La especie no desempeña ningún papel en esa función, 1= Se piensa que la especie tiene algún efecto o tiene un efecto débil, 2= La especie tiene un efecto claro y 3= La especie tiene un efecto fuerte. Vea la tabla 5S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/719/3530>

Tabla 6S. Puntajes agregados de importancia socioeconómica para casa especie candidata. Vea la tabla 6S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/719/3531>

Tabla 7S. Amenazas directas para los VOC seleccionados para el Subsistema Andes Occidentales. Vea la tabla 7S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/719/3532>

Agradecimientos

Al comité técnico del Subsistema Andes Occidentales y a los comités técnicos de los Subsistemas temáticos SIDAP Antioquia, SIRAP Eje Cafetero y SIRAP Macizo, por respaldar esta iniciativa y permitir su continuidad. Al director y a todo el equipo técnico de la Dirección Territorial Andes Occidentales de Parques Nacionales Naturales de Colombia, por realimentar continuamente el

proceso. A Samantha Stringberg, por apoyar el análisis. A Milena del Pilar Marrugo, por las sugerencias en la edición del documento y a Fernando Ayerbe Quiñones y otros especialistas de los diferentes grupos, por la información sobre las especies candidatas.

Contribución de los autores

Néstor Javier Roncancio recopiló y analizó la información primaria y secundaria, y redactó y editó el documento final. Laura Alejandra Vélez Vanegas contribuyó a la recopilación de la información secundaria, la redacción y la edición del documento final.

Conflicto de intereses

Los autores del manuscrito declaran que no tienen conflicto de intereses.

Referencias

- Andelman, S. J. & Fagan, W. F. (2000). Umbrellas and flagships: Efficient conservation surrogates or expensive mistakes? *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **97** (11): 5954-5959.
- Angelstam, P. K., Büttler, R., Lazdinis, M., Mikusiński, G., Roberge, J.-M. (2003). Habitat thresholds for focal species at multiple scales and forest biodiversity conservation - dead wood as an example. *Annales Zoologici Fennici*. **40** (6): 473-482.
- Arjona, F., Rodríguez-Mahecha, J.V., Restrepo H. (2012). Plan de manejo y conservación del oso andino (*Tremarctos ornatus*) en la jurisdicción de la Corporación Regional de Cundinamarca. Conservación Internacional. Colombia.
- Baguette, M., Blanchet, S., Legrand, D., Stevens, V. M., Turlure, C. (2013). Individual dispersal, landscape connectivity and ecological networks. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*. **88** (2): 310-326.
- Boher, S., Cuesta, M., De Luca, A., Goldstein, I., Lamas, M., Lobo, A., Marín, B., Michelangeli, F., Mondolfi, E., Pernalet, J., Rodríguez, J.P., Torres, D., Waugh D., Yerena, E. (1994). Plan de acción para el oso andino en Venezuela. Grupo Ad Hoc de especialistas del oso frontino en Venezuela.
- Branton, M. & Richardson, J. S. (2011). Assessing the Value of the Umbrella-Species Concept for Conservation Planning with Meta-Analysis. *Conservation Biology*. **25** (1): 9-20.
- Buckland, S. T., Anderson, D. R., Burnham, K. P., Laake, J. L., Borchers, D. L., Thomas, L. (2001). *Introduction to Distance Sampling: Estimating Abundance of Biological Populations*. Oxford University Press, Oxford.
- Caro, T. M. & O'Doherty, G. (1999). On the Use of Surrogate Species in Conservation Biology. *Conservation Biology*. **13** (4): 805-814.
- Castaño-Mora, O. V. (2002). Libro rojo de reptiles de Colombia. Libros rojos de especies amenazadas de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales- Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente, Conservación Internacional Colombia. Bogotá, Colombia. 160 pp.
- Castaño-Uribe, C., González-Maya, J.F., Zárrate-Charry, D., Ange-Jaramillo, C., Vela-Vargas, I.M. (2013). Plan de conservación de felinos del Caribe colombiano: los felinos y su papel en la planificación regional integral basada en especies clave. Fundación Herencia Ambiental Caribe, ProCAT Colombia, The Sierra to Sea Institute. Santa Marta, Colombia.
- Clark, M. R. (2004). Using the spectacled bear as a conservation tool in the Condor Bioserve, Ecuador. *Journal of Sustainable Forestry*. **18** (2-3): 223-236.
- 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.
- Craighead, F.L., Cross, B. (2007). Identifying Core Habitat and Connectivity for Focal Species in the Interior Cedar-Hemlock Forest of North America to Complete a Conservation Area Design. *USDA Forest Service Proceedings*. **49**: 1-16.
- Cullen Jr, L. (2006). Jaguars as landscape detectives for the conservation of Atlantic Forests in Brazil. PhD Thesis, University of Kent. Canterbury, Inglaterra.
- Elzinga, C. L., Salzer, D.W., Willoughby, J. W., Gibbs, J. P. (2001). *Monitoring plant and animal populations*. Malden, USA: Blackwell Science. 372 pp.
- Feinsinger, P. (2001). *Designing field studies for biodiversity conservation*. The Nature Conservancy. Island Press. 215 pp.
- Fleishman, E., Murphy, D. D., Brussard, P. F. (2000). A new method for selection of umbrella species for conservation planning. *Ecological Applications*. **10** (2): 569-579.
- Fontaine, B., Gargominy, O., Neubert, E. (2007). Priority sites for conservation of land snails in Gabon: Testing the umbrella species concept. *Diversity and Distributions*. **13** (6): 725-734.
- González-Caro, S., Restrepo, Z., Yusti, C., Botero, S., López, B., Posada, L., Peña, A., Mejía, O., Álvarez, E. (2014). Antioquia un territorio para conservar. Convenio 4600000674. Gobernación de Antioquia-Jardín Botánico de Medellín. Medellín, Colombia.
- Hanley, T. A., Smith, W. P., Gende, S. M. (2005). Maintaining wildlife habitat in southeastern Alaska: Implications of new knowledge for forest management and research. *Landscape and Urban Planning*. **72** (1): 113-133.
- Hernández-Camacho, J., Cooper, R. W. (1976). The nonhuman primates of Colombia. En *National Research Council. Neotropical Primates: Field Studies and Conservation: Proceedings of a Symposium on the Distribution and Abundance of Neotropical Primates* (35-69). Washington, DC: The National Academies Press.
- Holling, C. S. (1978). *Adaptive Environmental Assessment and Management*. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons. 402 pp.
- Jarro-Fajardo, E. M. C. (2011). Lineamientos técnicos para la formulación de objetivos de conservación y valores objeto de conservación. Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales, Colombia.
- Jenkins, D. G., Bescacin, C. R., Duxbury, C. V., Elliott, J. A., Evans, J. A., Grablow, K. R., Hillegass, M., Lyon, B. N., Metzger, G. A., Olandese, M. L., Silvers, G. A., Suresch, H. N., Thompson, T. N., Trexler, C. M., Williams, N. C., Williams, S. E. (2007). Does size matter for dispersal distance?. *Global Ecology and Biogeography*. **16** (4): 415-425.

- Keuroghlian, A., Eaton, D. P., Desbiez, A. L.** (2009). The response of a landscape species, white-lipped peccaries, to seasonal resource fluctuations in a tropical wetland, the Brazilian Pantanal. *International Journal of Biodiversity and Conservation*. **1** (4): 087-097.
- Lambeck, R. J.** (1997). Focal species: A multi-species umbrella for nature conservation. *Conservation Biology*. **11** (4): 849-856.
- Lindenmayer, D. B., Barton, P. S., Lane, P. W., Westgate, M. J., McBurney, L., Blair, D., Gibbons, P., Likens, G. E.** (2014). An empirical assessment and comparison of species-based and habitat-based surrogates: A case study of forest vertebrates and large old trees. *PLOS ONE*. **9** (2): e89807.
- Lizcano, D. J., Medici, P., Montenegro, O., Carrillo, L., Camacho, A., Miller, P. S.** (2004). Conservación de danta de montaña. Reporte final. UICN/SSC Conservation Breeding Specialist Group, Apple Valley, MN, USA.
- Lyons, J. E., Runge, M. C., Laskowski, H. P., Kendall, W. L.** (2008). Monitoring in the context of structured decision-making and adaptive management. *The Journal of Wildlife Management*. **72** (8): 1683-1692.
- MacKenzie, D. I., Nichols, J. D., Lachman, G. B., Droege, S., Andrew Royle, J., Langtimm, C. A.** (2002). Estimating site occupancy rates when detection probabilities are less than one. *Ecology*. **83** (8): 2248-2255.
- Marcot, B. G., Flather, C. H.** (2007). Species-level strategies for conserving rare or little-known species. En M.G. Raphael y R. Molina (Eds.), *Conservation of Rare or Little-Known Species: Biological, Social, and Economic Considerations* (125-164). Washington, DC, USA: Island Press.
- McKelvey, K. S., Aubry, K. B., Agee, J. K., Buskirk, S. W., Ruggiero, L. F., Koehler, G. M.** (2000). Lynx conservation in an ecosystem management context. **15**: 419-441.
- Nekaris, K. A.-I., Arnell, A. P., Svensson, M. S.** (2015). Selecting a conservation surrogate species for small fragmented habitats using ecological niche modelling. *Animals*. **5** (1): 27-40.
- Nichols, J. D.** (1992). Capture-Recapture Models. *BioScience*. **42** (2): 94-102.
- Noss, R., Quigley, H., Hornocker, M., Merrill, T., Paquet, P.** (1996) *Conservation biology and carnivore conservation in the Rocky Mountains*. *Cons. Biol.* **10**: 949-963.
- Rasmussen, K.** (2014). Recommendations for the Identification and Selection of Vertebrate Umbrella Species for Conservation Planning in Terrestrial Ecosystems. Master Thesis. University of Calgary. Calgary, Canada. 102 pp.
- Renjifo, L., Franco M. A., Amaya E. J., Kattan, G., López L. B.** (2002). Libro Rojo de Aves de Colombia. Libros rojos de especies amenazadas de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt-Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia. 562 pp.
- Ríos-Franco, C. A., Valencia, A.** (2014). Informe Convenio 506/2013, Carder- WCS. Pereira, Colombia.
- Roberge, J.-M., Angelstam, P. E. R.** (2004). Usefulness of the umbrella species concept as a conservation tool. *Conservation Biology*. **18** (1): 76-85.
- Rodríguez, D.** (2001). Programa nacional para la conservación y recuperación del oso andino (*Tremarctos ornatus*), especie amenazada de los ecosistemas andinos colombianos. Ministerio del Medio Ambiente. Subdirección de Ecosistemas. Colombia.
- Rodríguez, D., Cuesta, F., Goldstein, I., Bracho, A.E., Naranjo, L.G., Hernández O.L.** (2003). Estrategia ecorregional para la conservación del oso andino en los Andes del Norte. WWF Colombia, Fundación WII, EcoCiencia, Wildlife Conservation Society. Bogotá, Colombia. 38 pp.
- Rodríguez-Mahecha, J. V., Mendoza, C. L., Nash, S. D.** (2006). Libro rojo de los mamíferos de Colombia. Libros rojos de especies amenazadas de Colombia. Conservación Internacional Colombia - Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá, Colombia. 430 pp.
- Rondinini, C., Rodríguez, A. S. L., Boitani, L.** (2011). The key elements of a comprehensive global mammal conservation strategy. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*. **366** (1578): 2591-2597.
- Rowcliffe, J. M., Field, J., Turvey, S. T., Carbone, C.** (2008). Estimating animal density using camera traps without the need for individual recognition. *Journal of Applied Ecology*. **45** (4): 1228-1236.
- Saavedra-Rodríguez, C.A., Oshbar, K., Rojas, V., Roncancio, N.J., Ríos-Franco, C.A., Gutiérrez-Chacón, C., Gómez-Posada, C., Giraldo, P.A., Velasco, J.A.** (2012). Plan de conservación y manejo de la guagua loba (*Dinomys branikii*) para el Sistema Regional de Áreas Protegidas del Eje Cafetero (SIRAP-EC), Colombia. Corporación Autónoma de Risaralda (CARDER). Corporación Autónoma de Caldas (CORPOCALDAS).
- 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.
- Sattler, T., Pezzatti, G. B., Nobis, M. P., Obrist, M. K., Roth, T., Moretti, M.** (2014). Selection of multiple umbrella species for functional and taxonomic diversity to represent urban biodiversity. *Conservation Biology: The Journal of the Society for Conservation Biology*. **28** (2): 414-426.
- Sergio, F., Caro, T., Brown, D., Clucas, B., Hunter, J., Ketchum, J., McHugh, K., Hiraldo, F.** (2008). Top predators as conservation tools: Ecological rationale, assumptions, and efficacy. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. **39** (1): 1-19.
- Sergio, F., Newton, I., Marchesi, L., Pedrini, P.** (2006). Ecologically justified charisma: Preservation of top predators delivers biodiversity conservation. *Journal of Applied Ecology*. **43** (6): 1049-1055.
- Sinclair, A. R. E.** (2003). The role of mammals as ecosystem landscapers. *Alces*. **39**: 161-177.
- Stevens, S. S., Organ, J. F., Serfass, T. L.** (2011). Otters as flagships: Social and cultural considerations. In *Proceedings of Xth International Otter Colloquium, IUCN Otter Specialist Group Bulletin A*. **28**: 150-161.
- Stringberg, S.** (2007). Manual técnico 5: Una guía rápida de referencias para el software Selección de Especies Paisaje versión 2.1. Living Landscapes Program. Wildlife Conservation Society.
- Ucarli, Y.** (2011). Usability of large carnivore as a keystone species in Eastern Black Sea Region, Turkey. *African Journal of Biotechnology*. **10** (11): 2032-2036.
- UICN.** (1998). Guías para reintroducciones de la UICN. Preparadas por el Grupo Especialista en Reintroducción de la Comisión de Supervivencia de Especies de la UICN, UICN, Gland, Suiza & Cambridge, Reino Unido.

- Western, D.** (1987). Africa's elephants and rhinos: Flagships in crisis. *Trends in Ecology & Evolution*. **2** (11): 343-346.
- Wilcox, B. A.** (1984). *In situ* conservation of genetic resources: Determinants of minimum area requirements. National Parks, Conservation and Development: The Role of Protected Areas in Sustaining Society. Smithsonian Institution Press, Washington, DC. p. 639-647.
- Wildlife Conservation Society.** (2001). Boletín 2: Las especies paisaje para la conservación basada en un sitio. Living Landscapes Program.

- Wildlife Conservation Society.** (2002). Boletín 3: Los papeles que cumplen las especies paisajes en la conservación basada en un sitio. Living Landscapes Program.
- Wildlife Conservation Society.** (2002). Boletín 4: La selección de especies paisaje. Living Landscapes Program.
- Zambrano, H.** (2010). Objetivos de conservación de las áreas protegidas. Cómo definirlos y cómo asociar objetos de conservación. Subdirección técnica. Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales.

Aislamientos endofíticos de *Colletotrichum* spp. a partir de hojas y ramas de mango (*Mangifera indica* L.) cultivar Azúcar en el municipio de Ciénaga, Magdalena, Colombia

✉ Andrés Quintero-Mercado^{1,*}, ✉ Fabio Dangon-Bernier², ✉ Alberto Páez-Redondo²

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

² Programa de Ingeniería Agronómica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

Resumen

La antracnosis es la enfermedad más limitante en cultivos de mango en el departamento del Magdalena, Colombia, pues causa pérdidas de 40 a 50 % de la cosecha. A nivel mundial, se registran pérdidas en campo hasta de 51 % y en poscosecha, de 20 a 30 %. El agente causal, *Colletotrichum* spp., es un hemibiotrofo que inicialmente no produce síntomas en su hospedante, pero después se torna necrotrofo. El endofitismo es un estilo de vida del hongo cuyo papel en la patogenia es aún incierto. En este contexto, se propuso la caracterización de aislamientos endofíticos de *Colletotrichum* spp. a partir de hojas y ramas de mango cultivar Azúcar de un cultivo ubicado en Ciénaga. Se determinó la prevalencia de los aislamientos en hojas y ramas de tres estratos del árbol mediante tres protocolos de extracción: 1) en cámara de cloro, 2) con hipoclorito de sodio al 4 %, y 3) con hipoclorito de sodio al 2 %. Se describió la morfometría (colonia, conidios y apresorios), se hizo la prueba de patogenia en los frutos y la identificación molecular del aislamiento más virulento. Se obtuvieron nueve cepas endofíticas, ocho de hojas y una de ramas. La mejor extracción (18,2 %) se logró con el hipoclorito de sodio al 2 %; la prevalencia fue mayor en el estrato superior (10 % de las muestras) y en las hojas (8,9 % de las muestras). Las cepas endofíticas indujeron lesiones de 0,65 a 19,7 mm de diámetro y la más virulenta (HP3A-4) se identificó molecularmente como *C. tropicale*, siendo este el primer registro en Colombia del hongo como endófito patogénico en el mango. Se concluyó que es posible encontrar *Colletotrichum* como endófito en hojas y ramas de mango y que puede causar infección al inocularse en los frutos, evidenciando así una gran probabilidad de que actúe como un inóculo oculto para el desarrollo de la antracnosis en el mango. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Hemibiotrofo; Prevalencia; Patogenicidad; Inóculo oculto; *C. tropicale*.

Endophytic isolation of *Colletotrichum* spp. from the leaves and branches of mango (*Mangifera indica* L.) cultivar Azúcar in the municipality of Ciénaga, Magdalena, Colombia

Abstract

Anthraxnose is the most limiting disease in mango crops in the department of Magdalena (Colombia), causing crop losses between 40 and 50%; worldwide, losses in the field of up to 51% of the crop have been reported and between 20 and 30% in postharvest. The causal agent, *Colletotrichum* spp., has a hemibiotrophic lifestyle, initially does not induce symptoms in its host, but later it changes to a necrotrophic stage. Endophytism is a lifestyle of *Colletotrichum*, but its role in pathogenicity is still uncertain, which led us to characterize endophytic isolates of *Colletotrichum* spp. from leaves and branches of mango, cultivar Azúcar, from a crop located in Ciénaga (Magdalena). The prevalence of the isolates in leaves and branches was determined considering three strata of the tree using three extraction protocols: (1) Chlorine chamber; (2) 4% sodium hypochlorite, and (3) 2% sodium hypochlorite. Morphometric descriptions included the colony, the conidia, and the appressoria. We tested pathogenicity in fruits and carried out the molecular identification of the most pathogenic isolates. We obtained nine endophytic isolates, eight in leaves and one in branches. The best extraction (18.2%) protocol was the one using 2% sodium hypochlorite. The highest prevalence was found in the upper strata of the tree (10% of the samples) and in the leaves (8.9% of the samples). The endophytic strains induced lesions diameter between 0,65-19,7 mm in diameter in fruits. The most virulent strain (HP3A-4) was identified as *C. tropicale* by molecular techniques. This is the first report in Colombia of this fungus acting as pathogenic endophyte on mango. The present study indicated that it is possible to find *Colletotrichum* as an endophyte in mango leaves and branches, which can cause infection when inoculated in fruits and evidences its high hidden inoculum potential for the development of anthracnose. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Keys words: Hemibiotrophic; Prevalence; Pathogenicity; Hidden inoculum; *C. tropicale*.

*Correspondencia:

Andrés Felipe Quintero Mercado; acquimer88@gmail.com, **Recibido:** 4 de noviembre de 2018, **Aceptado:** 22 de febrero de 2019,
Editor: Jairo Castaño Zapata

Introducción

La antracnosis, enfermedad causada por especies del hongo *Colletotrichum*, es la principal limitación de la productividad del mango (*Mangifera indica* L.) en zonas productoras de esta especie frutícola (Ploetz, 2003). En el departamento de Magdalena las pérdidas en las cosechas oscilan entre 40 y 50 % y, aunque no hay registros que cuantifiquen el daño en la fase de poscosecha, probablemente en esta las pérdidas son mayores (Páez, 1997; Páez, 2003). En otras regiones productoras del mundo se han registrado pérdidas en campo hasta de 60 %, y en poscosecha, de 20 a 46 % (Dihn, 2002; Kamle & Kumar, 2016; Pavitra & Singh, 2017), a pesar de la implementación de diversas estrategias de manejo en campo y en la poscosecha (Nelson, 2008; Pavitra & Singh, 2017). A nivel experimental, se han registrado incidencias hasta del 100 % y efectos graves hasta de 21 % (Hofman, et al., 1997; Chonhenchob, et al., 2011; Chiangsin, et al., 2016).

El manejo de la antracnosis en sistemas productivos de mango tecnificados en el Magdalena se fundamenta en aspersiones calendarizadas de fungicidas para proteger las estructuras reproductivas de los árboles, las cuales se complementan con labores culturales cuando hay daño evidente. En las plantaciones tradicionales prevalecen sistemas de producción extractivos poco tecnificados (Páez, 2003).

Una de las fuentes de inóculo de *Colletotrichum* spp. corresponde a estructuras del hongo que permanecen quiescentes en la epidermis de los órganos reproductivos y vegetativos del hospedante (Kamle & Kumar, 2016). Bajo condiciones favorables y factores nutricionales adecuados, los estados quiescentes se activan, especialmente en las etapas de floración o fructificación del cultivo, afectando la inflorescencia y los frutos (Prusky & Lichter, 2007; Prusky, et al., 2013; Ploetz, 2003; Páez, 2003; Akem, 2006; Osorio, et al., 2009; Dodd, et al., 1991; Sangeetha & Rawal, 2008; Nelson, 2008), lo que permite que la enfermedad reduzca sustancialmente la productividad en cada árbol y aumente el rechazo de la fruta en los canales de comercialización por la baja calidad del producto (Cartagena & Vega, 2001; Páez, 2003).

Además de la quiescencia, algunas especies de *Colletotrichum* pueden permanecer como endófitos en el hospedante, con otro estilo de vida en el cual el microorganismo está activo dentro del tejido vegetal y establece una interacción simbiótica sin causarle daño aparente y sin que haya expresión de síntomas (Hyde & Soyong, 2008). Este tipo de interacciones se ha considerado como un indicador de evolución concertada y una estrategia de diseminación del microorganismo (Akem, 2006). Sin embargo, recientemente se ha planteado que puede ser un mecanismo del patógeno para evadir respuestas de defensa del hospedante y cambiar a un estado necrotrofico cuando las condiciones ambientales y factores fisiológicos propios del hospedante le son favorables (Arnold, et al., 2007; Hyde & Soyong, 2008; Vieira, et al., 2014).

A partir del reporte de *C. gloeosporioides* (Penz.) Penz. & Sacc. como endófito asintomático (Morales & Rodríguez, 2006) y los trabajos en Brasil sobre endófitos patógenos en el mango (Vieira, et al., 2014), se plantea todo un mundo de posibilidades sobre la presencia de especies patógenas que se comportan como endófitos en algún momento de su ciclo de vida (Delaye, et al., 2013).

Además del conocimiento biológico del endofitismo patógeno de *Colletotrichum* spp. en el mango, es importante esclarecer cuáles son las especies involucradas, lo cual adquiere mayor importancia cuando, a partir del concepto de concordancia filogenética (Taylor, et al., 2000) surgieron dudas acerca de la especie *C. gloeosporioides* como patógeno en zonas tropicales (Phoulivong, et al., 2010) y la identificación basada solo en caracteres biológicos (Hyde, et al., 2009). El análisis de ácidos nucleicos proporciona la información más confiable para la clasificación de especies de *Colletotrichum*, y los estudios biológicos sirven de complemento. La identificación de un grupo de genes distintivos y de regiones de espaciadores internos transcritos (*Internal Transcribed Spacers*, ITS) han permitido avanzar en el conocimiento de las especies de *Colletotrichum* asociadas a la antracnosis en diversas especies vegetales, entre ellas el mango y otros frutales (Cai, et al., 2009; Damm, et al., 2010; Cannon, et al., 2012; Afanador, et al., 2014; Ismail, et al., 2015; Gañán, et al., 2015).

El conocimiento de aislamientos endofíticos de *Colletotrichum* spp. en el mango, sobre todo en las condiciones del trópico, es incipiente o nulo. Por ello, la información exploratoria sobre este aspecto contribuirá a profundizar en el entendimiento de la epidemiología de la enfermedad y abrirá las puertas a nuevos estudios y al establecimiento de modelos de manejo ajustados a esa realidad. Un primer paso es conocer la presencia de estos estados del hongo en los diferentes órganos del árbol y su posible estratificación. En ese contexto, se planteó la comprobación del comportamiento endofítico de especies patógenas de *Colletotrichum* aisladas de hojas y ramas de mango cultivar Azúcar provenientes de un cultivo ubicado en Ciénaga, Magdalena, e identificar la especie patógena mediante el secuenciamiento de genes.

Metodología

Sitio de estudio y muestreo. Se recolectaron hojas y ramas de los tercios basal, medio y alto de la copa del árbol. Las muestras se tomaron de 10 árboles distribuidos al azar en un cultivo de mango de Azúcar de diez años ubicado en el corregimiento de Cordobita, municipio de Ciénaga, Magdalena (Finca La Ninfa), entre marzo y julio de 2018, el cual registra una precipitación acumulada de 411 mm, una temperatura media de 29 °C y una humedad relativa promedio de 68 %.

El muestreo se hizo cada 15 días durante cinco meses para un total de nueve muestreos. Se tomaron muestras de hojas y ramas asintomáticas, sin ningún tipo de daño

o alteraciones por agentes bióticos o abióticos. Con la ayuda de tijeras estériles se cortaron los órganos y se depositaron dentro de bolsas plásticas con cierre hermético. Posteriormente, se ubicaron en cajas de icopor limpias para conservarlos hasta su traslado al laboratorio de fitopatología de la Universidad del Magdalena, donde fueron procesadas.

Aislamiento y prevalencia de cepas endofíticas. Este primer experimento se hizo en las muestras recolectadas según se describió en la sección anterior.

Extracción de aislamientos endofíticos. Se utilizaron tres protocolos de extracción una vez las muestras se separaron según los factores de evaluación, es decir el órgano muestreado y el estrato del árbol.

Protocolo 1. Exposición en cámara de cloro durante 15 minutos. Esta metodología se basa en lo planteado por **Marshall, et al.** (1999) sobre el uso de la cámara de cloro para la extracción de endofitos, aplicada aquí con las modificaciones introducidas por **Páez** (2018). Los *órganos* (*hojas y ramas*) se lavaron con agua del grifo para eliminar los residuos y se secaron en servilletas durante 45 minutos para luego cortarlos en secciones de 25 mm². Posteriormente se desinfectaron en una cámara de extracción de gases marca Maser®. Se tomó papel de filtro de celulosa marca Whatman® (calibre 150 mm Ø) y se construyeron conos para depositar allí las secciones de hojas y ramas, lo cuales se rotularon. Los conos se cerraron y se sellaron con cauchos previamente desinfectados con alcohol antiséptico al 70 %. En un vaso de precipitados de 150 mL se depositaron 100 mL de hipoclorito de sodio en una concentración de 6,25 % y luego se lo colocó en un desecador. Los conos de papel de filtro con las muestras se sujetaron dentro del desecador, de tal manera que quedaron por encima de la boca del vaso, pero sin tocarla. Con una pipeta se tomaron 5 mL de ácido clorhídrico al 37 % w/v y se adicionaron lentamente al vaso que contenía el hipoclorito; luego se tapó el desecador, de manera que quedara herméticamente sellado para evitar la fuga de gases. Los órganos se dejaron expuestos durante 15 minutos. Una vez transcurrido el tiempo, el desecador se destapó y se dejó abierto durante 10 minutos para que saliera el exceso de gases.

Las muestras envueltas en papel de filtro se destaparon dentro de la cámara de flujo y posteriormente se sembraron en medio de agar de papa y dextrosa (PDA); se adicionaron a continuación 200 ppm de gentamicina (Genfar®) previamente preparados bajo condiciones de total asepsia. Se colocaron cinco secciones equidistantes de cada órgano (hoja y rama) dentro de una caja de Petri (100 X 15 mm) y se hicieron tres réplicas de cada tratamiento. Posteriormente, se incubaron a 25 °C durante cinco días en un estante metálico previamente desinfectado con hipoclorito de sodio al 5 %.

Protocolo 2. Inmersión de secciones de órganos en hipoclorito de sodio al 4 %. Se utilizó la metodología definida en evaluaciones previas (**Páez**, 2018) a partir de lo propuesto por **Stone, et al.** (2004) y **Photita, et al.**, (2004). Se lavaron los órganos (hojas y ramas) con agua del grifo para eliminar residuos, se secaron en servilletas durante 45

minutos y se cortaron en pedazos de 25 mm². Posteriormente se lavaron con agua destilada estéril durante cinco minutos para asegurar la ausencia de material inerte o restos biológicos de insectos o ácaros, entre otros. En la cámara de flujo laminar las muestras se sumergieron en una solución de hipoclorito de sodio al 4 % durante dos minutos, luego se lavaron por inmersión en agua destilada estéril durante dos minutos, se pasaron a una solución de alcohol etílico al 70 % durante otros dos minutos, se lavaron nuevamente con agua destilada estéril por inmersión durante dos minutos y se dejaron secar en servilletas estériles durante 10 minutos. Los pedazos de ramas y hojas se sembraron en medio PDA más 200 ppm de gentamicina (Genfar®) bajo condiciones de total asepsia. Se colocaron cinco secciones de cada órgano de forma equidistante dentro de la caja de Petri. Se hicieron tres réplicas de cada tratamiento. Las muestras se incubaron a 25 °C durante cinco días en un estante metálico previamente desinfectado con hipoclorito de sodio al 5 %.

Protocolo 3. Inmersión en hipoclorito de sodio al 2 %. La preparación de las secciones de los órganos, la siembra en medio de cultivo y la incubación se hicieron como en el protocolo 2, pero en este caso la desinfección se hizo por inmersión en hipoclorito de sodio al 2 % durante un minuto y, posteriormente, se hicieron dos lavados con agua destilada de dos minutos cada uno. No se hizo lavado en etanol.

Prevalencia de aislamientos endofíticos. De cada estrato se tomaron tres ramas que incluían los tres crecimientos vegetativos (basal, medio y apical) y se obtuvieron secciones de 25 mm². Se seleccionaron 15 que fueron sembrados de forma equidistante a 2 cm del borde en tres cajas de Petri, cinco en cada una, con medio de cultivo PDA más 200 ppm de gentamicina (Genfar®). Además, de cada rama se desprendieron todas las hojas y se seleccionaron aquellas que no mostraban daños mecánicos por insectos o síntomas de enfermedades; de cada estrato se escogieron cinco hojas, de las que se obtuvieron secciones de 25 mm², y se sembraron de forma similar a las ramas. Se cuantificó la prevalencia de aislamientos por caja de Petri mediante la fórmula: prevalencia de aislamientos = (positivos/número total sembrados) x 100.

Los cultivos se inspeccionaron cada dos días durante 20 días para registrar el número de aislamientos positivos para *Colletotrichum*. Se consideraron como positivos aquellos aislamientos en los que, mediante observaciones bajo el microscopio compuesto de luz, se confirmaron las características del hongo descritas por **Damm, et al.** (2012). Se utilizó un diseño anidado o jerárquico, con tres factores: estrato del dosel del árbol (bajo, medio y alto), los órganos muestreados (hojas y ramas), y los tres protocolos implementados para el aislamiento de los hongos endofitos; cada tratamiento se replicó nueve veces (muestreos). Se hizo un análisis de contingencias con proporciones entre los factores con el programa Statgraphics Centurion XVI - versión 16.2.04 (32-bits) 2013. Debido a la no normalidad de los datos se hizo un análisis estadístico no paramétrico (prueba de ji al cuadrado) con un nivel de 97,5 % de confianza.

Descripción morfológica de los endófitos de *Colletotrichum spp.* A partir de las siembras de secciones de hojas y ramas se obtuvieron los cultivos madre para caracterizar morfológicamente los aislamientos endofíticos de *Colletotrichum spp.* Para ello se tomaron cultivos de siete días, se plantaron anillos de nueve mm de diámetro de la zona de crecimiento activo del hongo en el centro de la caja de Petri con el medio y se incubaron a 25 °C. Los aislamientos se sembraron en medio de PDA más 200 ppm de gentamicina (Genfar®) utilizando tres cajas por aislamiento.

El seguimiento diario se inició a partir de las 24 horas para medir con una regla el crecimiento radial micelial cada dos días durante 10 días. A los siete días, una vez se evidenció un abundante crecimiento micelial y la formación de masas de conidias, se observaron las cajas con un microscopio Leica ICC50 (Leica Application Suite® LAS EZ, Versión 1.7.0 Build: 35), para verificar la presencia de *Colletotrichum spp.* mediante la comparación morfológica de las estructuras con base en las descripciones de **Damm, et al.** (2012) y de **Weir, et al.** (2012).

La colonia se describió cuando los cultivos alcanzaron los diez días, especificando el color y el aspecto del micelio.

Para determinar las diferencias en las tasas de crecimiento de las cepas de *Colletotrichum spp.* y el diámetro de las conidias (largo y ancho), se utilizó un diseño completamente al azar con tres repeticiones; se hizo un análisis de varianza de una vía (ANOVA) y las medias se compararon mediante pruebas de rango múltiples de Tukey con un nivel de confianza de 95 % con el programa Statgraphics Centurion XVI - versión 16.2.04 (32-bits) 2013.

Patogenia de los aislamientos. Se seleccionaron frutos en estado fenológico 801 según la escala BBCH (**Hernández, et al.**, 2011), correspondiente a frutos con madurez fisiológica e inicios del cambio de la coloración de la piel. Los frutos se desinfectaron previamente mediante su inmersión total en agua destilada estéril durante dos minutos, en hipoclorito de sodio al 1 % durante un minuto y de nuevo en agua destilada estéril durante dos minutos para luego ser secados en la cámara de flujo laminar y sometidos a aspersión con etanol al 70 %, por último, después de un minuto, se lavaron con agua destilada estéril durante dos minutos. Los frutos se colocaron sobre papel kraft estéril durante 45 minutos para que los frutos quedaran completamente secos.

Preparación del inóculo e inoculación. Veinte días después de la siembra los cultivos puros de los aislamientos utilizados para hacer la descripción morfológica se utilizaron para obtener cultivos puros monospóricos según el procedimiento seguido por **Ruiz, et al.** (2003). Los aislamientos se multiplicaron en medio de PDA con 200 ppm de gentamicina (Genfar®) para la obtención del inóculo.

En la cámara de flujo laminar marca Streamline®, se vertieron 20 ml de agua destilada estéril sobre la superficie de las cajas de Petri que contenían los cultivos de siete días; con la ayuda de una espátula pequeña estéril se raspó la superficie

de cada crecimiento para recoger todo el contenido fúngico cuidando de no extraer el medio de cultivo. Posteriormente, se depositó en un vaso de vidrio estéril, se agitó en un mezclador de vórtice durante tres minutos y, por último, se pasó por una gasa estéril y se recogió en un nuevo vaso de vidrio estéril. A la suspensión fúngica se le adicionaron 1,5 mL de Tween™ 20 al 0,1%, y se dejó en el agitador marca Hach® a 1.000 rpm mientras se realizaba la inoculación en cada fruto.

En la cámara de flujo laminar se tomaron discos de papel de filtro estériles de 0,5 cm de diámetro y con la ayuda de pinzas de punta plana se colocaron en cuatro puntos del fruto lo más equidistantes posible y cercanos al punto de inserción del pedúnculo.

El conteo de las conidias se hizo en la cámara de Neubauer, con el fin de asegurar una concentración de 5×10^5 conidias/mL. Con una micropipeta se tomaron 10 μ L de suspensión y se depositaron sobre cada anillo de papel de filtro y se hizo un segundo pase por cada sitio, dejando en total 20 μ L de suspensión por punto de inoculación. Se hicieron tres réplicas (frutos inoculados) por tratamiento (cepa aislada) para un total de 27 montajes; se utilizaron frutos inoculados con agua destilada estéril como testigo absoluto. Los frutos inoculados se colocaron en cámaras húmedas consistentes en cajas plásticas con tapas de 19 cm de largo x 8 cm de ancho x 7 cm de alto, cuyo fondo se recubrió con papel absorbente humedecido. Las cajas plásticas se cerraron herméticamente y se colocaron en el cuarto de crecimiento con fotoperiodos de 12 horas de luz y 12 de oscuridad y temperatura entre los 25 y los 28°C.

Seguimiento y evaluación. Se hicieron observaciones diarias durante 15 días para detectar la presencia de síntomas y signos en cada sitio inoculado y determinar el periodo de incubación (PI) y el de latencia (PL). La incidencia (%) se calculó con base en el número de puntos de inoculación en los que se apreciaban síntomas comparado con el total de puntos inoculados en los frutos.

Para determinar la patogenia o gravedad, se midió el diámetro de la lesión en cada punto inoculado con un calibrador digital pie de rey Stainless® hasta que las condiciones del experimento lo permitieron (coalescencia de lesiones, sobremaduración del fruto, entre otras). Se hicieron nuevos aislamientos a partir de las lesiones típicas de antracnosis resultantes de las inoculaciones, con el fin de cumplir con los postulados de Koch y confirmar su asociación con el desarrollo de las lesiones.

El experimento se evaluó mediante un diseño completamente aleatorizado con tres repeticiones y las diferencias en la virulencia de las cepas endofíticas de *Colletotrichum spp.* se determinaron mediante ANOVA de una vía, en tanto que las medias se compararon con el procedimiento de diferencia honestamente significativa (*honestly significant difference*, HSD) de Tukey y un nivel de confianza del 95 % usando el programa Statgraphics Centurion XVI- versión 16.2.04 (32-bits) 2013.

Identificación molecular del aislamiento endófito patogénico de *Colletotrichum* spp. Obtención de micelio para extracción de ADN. A partir de cultivos puros de las cajas de Petri, se sembró el aislamiento patogénico identificado como HP3A-4 en caldo arveja suplementado con sacarosa al 20 % según la metodología propuesta por Goodwin, et al. (1992) para obtener micelios puros.

Estandarización protocolo de extracción de ADN. Los micelios obtenidos a partir del cultivo líquido se secaron y se recogieron en tubos Falcon de 15 mL, se maceraron con nitrógeno líquido y se conservaron en el congelador a -20 °C. Se tomaron aproximadamente 20 mg de micelio macerado para la extracción de ADN usando el estuche OmniPrep™ for Fungus.

La calidad de la extracción se verificó corriendo una electroforesis en gel de agarosa al 1 % durante 30 minutos a 90 V y 200 mA. La concentración del ADN se verificó con un espectrofotómetro de microvolúmenes modelo Colibrí. Una vez finalizó la corrida de electroforesis, el gel se visualizó en un transiluminador UV y se tomó la respectiva fotografía.

Estandarización del protocolo de amplificación por PCR. Para la identificación molecular de los aislamientos se utilizó la técnica de amplificación por reacción en cadena de la polimerasa (*polymerase chain reaction*, PCR) de las regiones ITS3, ITS4, GAPDH y TUB2 para su posterior secuenciación. En cada reacción se utilizó una mezcla de tampón 1 x, 0,2 mM en cada dNTP, 0,5 µM de cada cebador, 1,5 mM de MgCl₂, 2,5 µL de ADN, 0,2 µL de polimerasa Taq y 15,3 µL de agua ultra pura H₂O para completar un volumen final de 25 µL. La amplificación incluyó un precalentamiento a 95 °C durante 3 minutos y un ciclo; la desnaturalización a 95 °C durante 30 segundos y 35 ciclos; el anillamiento a 55 °C durante 30 segundos y 35 ciclos; una extensión a 72 °C durante 1 minuto y 35 ciclos y, por último, la extensión final a 72 °C durante 7 minutos y un ciclo.

Secuenciación. Los productos de PCR ya limpios se enviaron a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia C.I. Tibaitatá en Mosquera (Cundinamarca, Colombia), para su respectiva secuenciación en ambas direcciones con el método de Sanger en un equipo de electroforesis capilar ABI 3500 de Applied Biosystems®. Para la identificación de la especie, se utilizaron los datos moleculares de los genes estudiados disponibles en el GenBank® del *National Center for Biotechnology Information* (NCBI) mediante alineación por medio de la *Basic Local Alignment Search Tool* (BLAST).

Resultados

Prevalencia de los aislamientos endófitos de *Colletotrichum* spp. Se obtuvieron ocho morfotipos de *Colletotrichum* spp. en hojas y uno en ramas de los diferentes estratos del árbol de mango cultivar Azúcar. Los resultados de la prueba de ji al cuadrado, con un nivel de confianza del 95 %, indicaron que el aislamiento endófito de *Colletotrichum* spp. dependía del órgano muestreado. En las 90 secciones de hojas y ramas sembradas para cada tratamiento, hubo una mayor presencia

de aislamientos endofíticos en las hojas, con una prevalencia de 17,8 %, frente a la de 2,2 % en las ramas (Figura 1). El 89 % de los aislamientos provenían de las hojas y 11 % de las ramas.

En cuanto la distribución de los aislamientos endofíticos de *Colletotrichum* spp. en el dosel de los árboles de mango de Azúcar, según la prueba de ji al cuadrado (nivel de confianza del 95 %) este factor incidió en la frecuencia de los aislamientos de cepas endofíticas del hongo. En el estrato alto se encontró la mayor prevalencia de aislamientos, con 20,6 % del total muestreado, en tanto que en los estratos medio y bajo la frecuencia de aislamientos fue de 3,3 (Figura 2).

Los resultados de la prueba de ji al cuadrado evidenciaron que los métodos de extracción utilizados también afectaron la frecuencia de los aislamientos endofíticos de

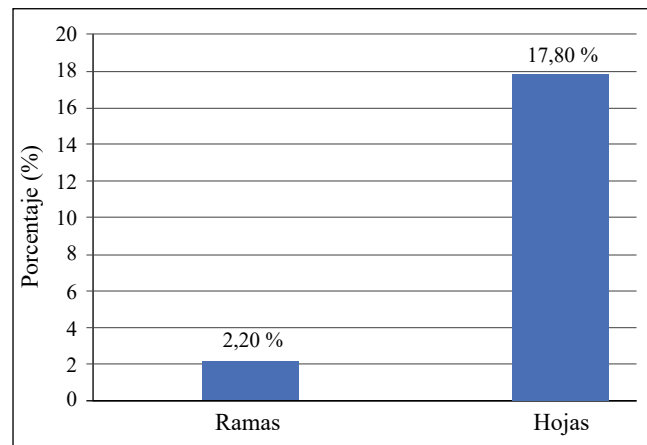


Figura 1. Prevalencia de aislamientos endofíticos de *Colletotrichum* spp., en los órganos muestreados (hojas y ramas) del árbol de mango cultivar Azúcar, según análisis de contingencia. Prueba de chi-cuadrado (alfa 0,05, Chi-esperado 6,049, Chi-calculado 3,84. Valor p 0,0139).

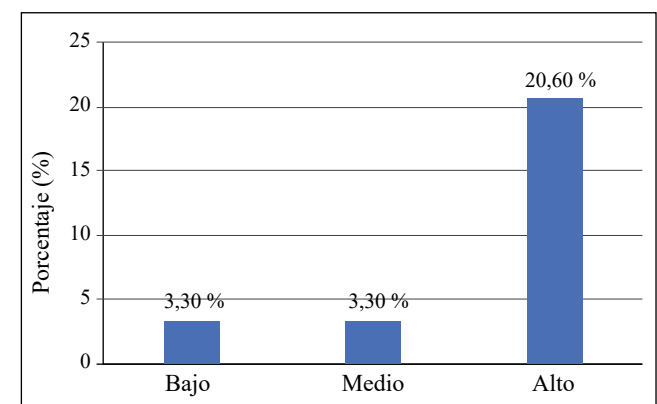


Figura 2. Prevalencia de aislamientos endofíticos de *Colletotrichum* spp., de acuerdo con el estrato del árbol de mango cultivar Azúcar, según análisis de contingencia. Prueba de chi-cuadrado (alfa 0,05, Chi-esperado 7,4631, Chi-calculado 5,99. Valor p 0,023955).

Colletotrichum spp. El mayor número se obtuvo con la inmersión en hipoclorito de sodio al 2 %, seis cepas, todas provenientes de las hojas, es decir, el 20,7 % del total de las muestras sembradas. Con el protocolo de la cámara de cloro se extrajeron dos cepas endofíticas en hojas y una en ramas, equivalentes al 10 % del total muestreado. Con el protocolo de inmersión en hipoclorito de sodio al 4 % no hubo extracción de endófitos de *Colletotrichum* spp. (Figura 3).

Descripción morfológica de los aislamientos endófitos de *Colletotrichum* spp. Aislamiento HP1B-5: colonias en medio de cultivo PDA con una tasa de crecimiento de 8,5 a 9,1 mm de diámetro día⁻¹ (8,76 ± 0,3b) y de textura algodonosa con crecimiento aéreo de color gris claro, zonas de avance de color blanco redondeadas o irregulares, conidióforos hialinos y conidios de 12,47 a 14,46 X 5,1 - 5,72 μm (13,62 ± 0,62 X 5,44 ± 0,19), de forma cilíndrica recta, ápices redondeados y hialinos. No se observaron estructuras de reproducción sexual. El aislamiento procedía de hojas del tercio bajo del árbol y se aisló con el protocolo 1 (cámara de cloro) (Figura 4 A).

Aislamiento HP3A-7: colonias en medio PDA con una tasa de crecimiento de 8,7 a 9,6 mm de diámetro día⁻¹ (9,1 ± 0,45), de textura algodonosa con crecimientos sobre el medio de color amarillo naranja y sectores semicirculares e irregulares de color marrón claro y una zona de avance de color blanco, conidióforos hialinos, conidios de 12,3 - 14,2 X 4,65 - 5,65 μm (13,13 ± 0,72 X 5,22 ± 0,38) hialinos y cilíndricos redondeados en el ápice y la base, con una cicatriz prominente en el centro, y apresorios de forma variable, simples a ampliamente lobulados e irregulares. No se observaron estructuras de reproducción sexual. El aislamiento procedía de hojas del tercio superior o alto del árbol y se aisló con el protocolo 3 (hipoclorito de sodio al 2 %) (Figura 4-B).

Aislamiento HP1M-8: colonias en medio PDA con una tasa de crecimiento de 6,2 a 7,1 mm de diámetro día⁻¹ (6,56 ± 0,47), de textura algodonosa con crecimiento al ras del medio de cultivo; hacia el centro presentaban un sector circular de color marrón amarillento opaco rodeado por otro sector circular de color naranja con zona de avance de color blanco, así como conidióforos hialinos y conidios de 11,23 - 12,72 X 5,2 - 6,32 μm (11,97 ± 0,48 X 5,67 ± 0,36), apresorios lobulares irregulares o redondeados, a veces cilíndricos y cortos con lóbulos delgados. No se observaron estructuras de reproducción sexual. El aislamiento procedía de hojas del tercio medio del árbol y se aisló con el protocolo 1 (cámara de cloro) (Figura 4-C).

Aislamiento HP3A-3: colonias en medio PDA con una tasa de crecimiento de 5,5 a 6,1 mm de diámetro día⁻¹ (5,7 ± 0,3), de textura algodonosa con crecimiento aéreo de color blanco y de tonalidad rosada a ras del medio, conidios de 10,01 - 12,56 X 4,2 - 5,7 μm (11,03 ± 0,78 X 4,9 ± 0,57) hialinos, cilíndricos y rectos, con puntas redondeadas, algunas levemente agudas, apresorios variables en su forma, irregulares y circulares. No se observaron estructuras de

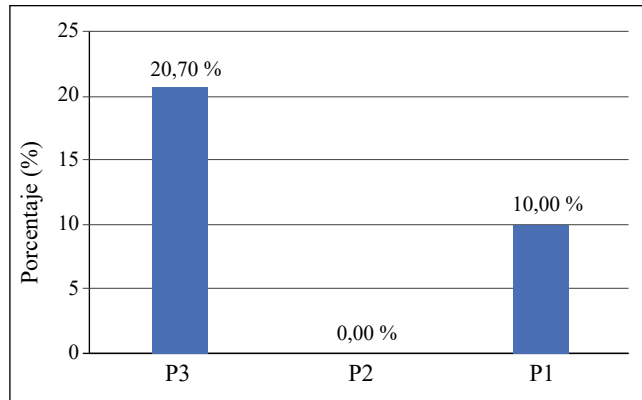


Figura 3. Prevalencia de aislamientos endofíticos de *Colletotrichum* spp., por protocolo o método de extracción utilizado. **P3:** Protocolo 3 (Hipoclorito de sodio al 2%); **P2:** Protocolo 2 (Hipoclorito de sodio al 4%); **P1:** Protocolo 1 (Cámara de Cloro). según análisis de contingencia. Prueba de chi-cuadrado (alfa 0,05, Chi-esperado 7,1264, Chi-calculado 5,99. Valor p 0,02834).

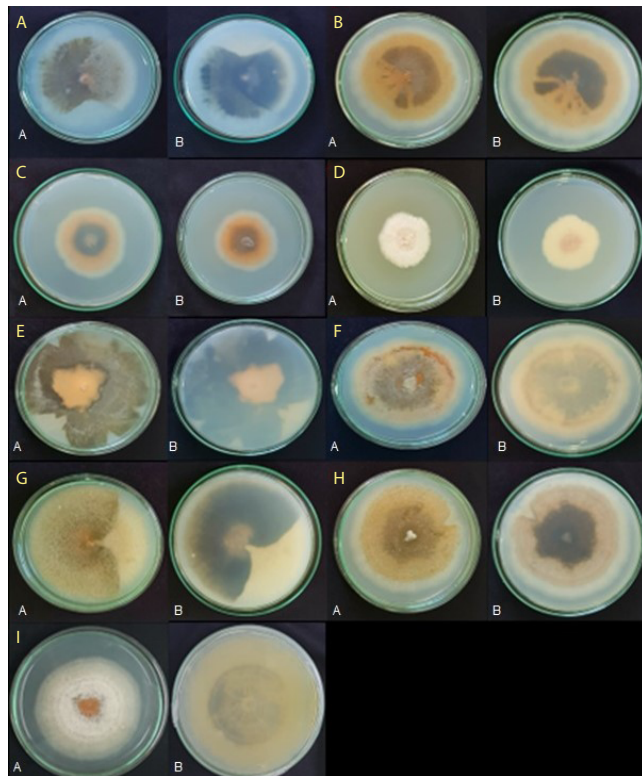


Figura 4. Aislamientos endofíticos de *Colletotrichum*. A. Anverso de la colonia. B. Reverso de la colonia después de 10 días de crecimiento en PDA a 25°C. 4-A. Aislamiento HP1B-5. 4-B. Aislamiento HP3A-7. 4-C. Aislamiento HP1M-8. 4-D. Aislamiento HP3A-3. 4-E. Aislamiento HP3A-2. 4-F. Aislamiento HP3A-1. 4-G. Aislamiento HP3A-4. 4-H. Aislamiento HP3A-6. 4-I. Aislamiento RP1A

reproducción sexual. El aislamiento procedía de hojas del tercio superior o alto del árbol y se aisló con el protocolo 3 (hipoclorito de sodio al 2 %) (Figura 4-D).

Aislamiento HP3A-2: colonias en medio PDA con una tasa de crecimiento de 9,8 a 10 mm de diámetro día⁻¹ (9,86 ± 0,11), de textura algodonosa y de crecimiento asimétrico a ras del medio en el sector central, rodeado por un crecimiento de color marrón oliva oscuro con micelio aéreo y zona de avance de color gris claro, así como conidios cilíndricos hialinos de 11,64 - 14,4 X 4,4 - 5,9 μm (12,83 ± 1,02 X 5,09 ± 0,49) ligeramente redondeados y con ápice obtuso, acérvulos semicirculares, conidióforos hialinos. No se observaron estructuras de reproducción sexual. El aislamiento procedía de hojas del tercio superior o alto del árbol y se aisló con el protocolo 3 (hipoclorito de sodio al 2 %) (Figura 4-E).

Aislamiento HP3A-1: colonias en medio PDA con una tasa de crecimiento de 7,5 a 8,3 mm de diámetro día⁻¹ (7,8 ± 0,40), de textura algodonosa con crecimiento marrón grisáceo circunferencial irregular acompañado de micelio aéreo escaso de color gris claro, con crecimiento a ras del medio de color naranja claro con un halo concéntrico naranja más oscuro y zona de avance o crecimiento de color amarillo pálido. Presentaban apresorios circulares y cilíndricos con lóbulos anchos, conidios cilíndricos hialinos de 13,25 - 15,1 X 6,78 - 7,4 μm (13,94 ± 0,72 X 7,11 ± 0,20) con puntas redondeadas que disminuían ligeramente hacia el ápice y acérvulos redondeados. No se observaron estructuras de reproducción sexual. El aislamiento procedía de hojas del tercio superior o alto del árbol y se aisló con el protocolo 3 (hipoclorito de sodio al 2 %) (Figura 4-F).

Aislamiento HP3A-4: colonias en medio PDA con una tasa de crecimiento de 4,23 a 4,87 mm de diámetro día⁻¹ (4,43 ± 0,20), de textura algodonosa con sectores distintos, color aceituna grisáceo y amarillo pálido, con sectores de color naranja en el centro y crecimiento de micelio aéreo de color gris (Figura 4 A y B), así como conidios hialinos cilíndricos de 12,3 - 16,65 X 4,23 - 4,87 μm (13,24 ± 0,64 X 4,43 ± 0,20) (Figura 4 C) y apresorios alargados y terminales, conidióforos hialinos y acérvulos redondeados. No se observaron estructuras de reproducción sexual. El aislamiento procedía de hojas del tercio superior o alto del árbol y se aisló con el protocolo 3 (hipoclorito de sodio al 2 %) (Figura 4-G).

Aislamiento HP3A-6: colonias en medio PDA con una tasa de crecimiento de 8,9 a 9,4 mm de diámetro día⁻¹ (9,1 ± 0,26), de textura algodonosa con crecimiento verde oliva y gris verdoso rodeado de crecimiento color naranja claro y zona de crecimiento o avance de color blanco grisáceo. Presentaban conidios hialinos cilíndricos alargados de 14,89 - 16,65 X 5,9 - 7,1 μm (15,9 ± 0,63 X 6,6 ± 0,34) y acérvulos circulares. No se observaron estructuras de reproducción sexual. El aislamiento procedía de hojas del tercio superior o alto del árbol y se aisló con el protocolo 3 (hipoclorito de sodio al 2 %) (Figura 4-H).

Aislamiento RPIA: colonias en medio PDA con una tasa de crecimiento de 8,7 - 9,1 mm de diámetro día⁻¹ (8,93 ± 0,20), de textura algodonosa con crecimiento

aéreo blanco y de color naranja claro a ras del medio con textura acuosa y zona de avance de color blanco grisáceo. Presentaban conidios hialinos cilíndricos alargados de 12,5 - 13,8 X 5,2 - 5,5 μm (12,97 ± 0,36 X 5,43 ± 0,09), acérvulos circulares, apresorios lobulares irregulares o redondeados y, a veces, cilíndricos cortos con lóbulos delgados. No se observaron estructuras de reproducción sexual. El aislamiento procedía de ramas del tercio superior o alto del árbol y se aisló con el protocolo 1 (cámara de cloro) (Figura 4-I).

En cuanto al crecimiento micelial y el largo y ancho de las conidias, se presentaron diferencias estadísticas entre los aislamientos (p=0,000). La cepa HP3A-7 presentó las conidias menos largas y anchas (11,03 x 4,9 μm), en tanto que la cepa HP3A-6 registró las conidias más largas (15,9 μm), y la cepa HP3A-1 tuvo las conidias más anchas (7,11 μm). En cuanto a la tasa de crecimiento, la cepa HP3A-3 registró el menor valor (5,7 mm/día⁻¹), y las cepas HP3A-2 y HP3A-4 presentaron las mayores tasas de crecimiento, de 9,86 mm/día⁻¹ en ambos casos (Tabla 1). Las demás cepas registraron valores intermedios, algunos similares y otros no tanto, lo que indica una cierta diversidad morfológica de los aislamientos endofíticos obtenidos.

Patogenia de los aislamientos endofitos de *Colletotrichum* spp. El período de incubación (PI) de todas las cepas fue de dos días y no se registraron diferencias estadísticas (p=0,6347) en la prueba HSD de Tukey (nivel de confianza de 95 %) (Figura 5); los signos se evidenciaron a partir del día 7 en los aislamientos H3PA-4 y HP1B-5. En los demás no fue posible determinar el período de latencia (PL) debido a que los frutos se deterioraron antes de que fueran evidentes los acérvulos y el micelio (Tabla 2).

En cuanto a la incidencia, en las cepas HP1B-5, HP3A-4, HP3A-7, HP3A-2 y HP3A-3 fue de 100 %, en tantos que el aislamiento HP1M-8 infectó el 75 % de los puntos inoculados y los aislamientos HP3A-1, HP3A-6, RP1A-9 indujeron lesiones en el 50 % de los sitios inoculados en los frutos (Tabla 2).

En cuanto a la gravedad del daño, los aislamientos inoculados presentaron una virulencia variable en los frutos. En la mayoría de los casos se evidenciaron los síntomas característicos de la antracnosis: lesiones de color marrón oscuro a negras, hundidas y prominentes (Figura 6). Hubo diferencias estadísticas en el tamaño de la lesión (diámetro) a los siete días de la inoculación entre las cepas (p=0,000), lo cual se confirmó con la prueba HSD de Tukey (nivel de confianza de 95 %). La cepa HP3A-4 causó la lesión de mayor tamaño (19,75 mm), y la cepa HP1M-8 la de menor tamaño (1,6 mm), sin diferencias estadísticas con el control por lo cual se la consideró no virulenta (Figura 7).

Identificación molecular del aislamiento endofito de *Colletotrichum* spp. de mayor capacidad patogénica. En el aislamiento HP3A-4 se obtuvieron productos de amplificación de la PCR parciales de la región ITS-ADNr (ITS3/ITS4) y de los genes *TUB2* y *GAPDH*, con una longitud aproximada de 550, 500 y 250 pares de bases, respectivamente.

Tabla 1. Resumen de caracteres morfológicos cuantitativos de las cepas endofíticas de *Colletotrichum* spp., aisladas a partir de hojas y ramas del árbol de mango cultivar Azúcar.

Cepas <i>Colletotrichum</i> spp.	Conidia		* Tasa de Crecimiento (mm/ día-1)
	^Δ Largo (μm)	^Δ Ancho (μm)	
HP1B-5	13,62 ± 0,62 (12,47 - 14,46)	5,44 ± 0,19 (5,10 - 5,72)	8,76 ± 0,30bc (8,50 - 9,10)
HP1M-8	11,97 ± 0,48 (11,23 - 12,72)	5,67 ± 0,36 (5,20 - 6,32)	6,56 ± 0,47d (6,20 - 7,10)
HP3A-3	11,03 ± 0,78 (10,01 - 12,56)	4,90 ± 0,57 (4,20 - 5,70)	5,70 ± 0,30d (5,50 - 6,10)
HP3A-7	13,13 ± 0,72 (12,30 - 14,20)	5,22 ± 0,38 (4,65 - 5,65)	9,10 ± 0,45ab (8,70 - 9,60)
HP3A-1	13,94 ± 0,72 (13,25 - 15,10)	7,11 ± 0,20 (6,78 - 7,40)	7,80 ± 0,40c (7,50 - 8,30)
HP3A-2	12,83 ± 1,02 (11,64 - 14,4)	5,09 ± 0,49 (4,40 - 5,90)	9,86 ± 0,11a (9,80 - 10,0)
HP3A-4	13,24 ± 0,64 (12,30 - 16,65)	4,43 ± 0,20 (4,23 - 4,87)	9,86 ± 0,15a (9,70 - 10,0)
HP3A-6	15,90 ± 0,63 (14,89 - 16,65)	6,60 ± 0,34 (5,90 - 7,10)	9,10 ± 0,26ab (8,90 - 9,40)
RP1A-9	12,97 ± 0,36 (12,5 - 13,80)	5,43 ± 0,09 (5,20 - 5,50)	8,93 ± 0,20b (8,70 - 9,10)

* Comparación de medias con un nivel de significancia P≤0,05. Prueba de múltiples rangos (HSD) Tukey.

Δ Comparación de medias con un nivel de significancia P≤0,05. Prueba de múltiples rangos (LSD) Fisher.

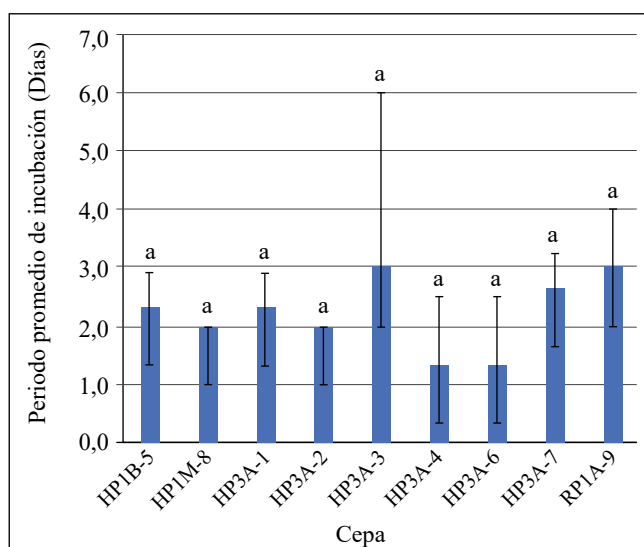


Figura 5. Periodo de incubación (PI) de los aislamientos endofíticos de *Colletotrichum* spp., en frutos de mango, 10 días después de la inoculación. Las barras de las columnas indican el valor de la desviación estándar de cada una de las medias. Las columnas con letras iguales no difieren significativamente según la prueba de HSD de Tukey (P≤0,05).

Se obtuvieron secuencias parciales de los genes evaluados cuyo número de nucleótidos correspondió a lo observado en los productos de amplificación. Las secuencias se analizaron mediante la herramienta BLAST (Tabla 3).

El aislamiento HP3A-4, el más virulento en frutos de mango cultivar Azúcar, correspondió a la especie *C. tropicale*, taxonómicamente agrupada en el complejo de especies de *C. gloeosporioides*.

Discusión

En el estudio se encontró una mayor prevalencia de *Colletotrichum* spp. endófito en hojas que en ramas. La presencia de organismos endófitos en los árboles de mango puede depender de las características intrínsecas del material vegetal y de su relación con las condiciones del medio en que se encuentran (Petrini, 1991; Vieira, et al., 2014).

Rubini, et al. (2005) aislaron en ramas de cacao comunidades de hongos endófitos en los que se incluyó a *C. gloeosporioides*. Asimismo, Gamboa & Bayman (2001) reportaron la presencia de una especie de *Colletotrichum* a partir de aislamientos de ramas en árboles de *G. guidonia* (Trompillo, Guaraguao). Sin embargo, en las ramas la abundancia de *Colletotrichum* como endófito no es muy

Tabla 2. Periodo de Incubación (PI), Periodo de Latencia (PL) e Incidencia (%), para nueve aislamientos de *Colletotrichum* inoculados en frutos de mango cultivar Azúcar.

No.de CEPA	Periodo de incubación (Días)	Periodo de latencia (Días)	Incidencia (%)
HP1B-5	2	7	100
HP3A-4	2	7	100
HP3A-7	2	ND*	100
HP3A-1	2	ND*	50
HP3A-6	2	ND*	50
RP1A-9	2	ND*	50
HP3A-2	2	ND*	100
HP3A-3	3	ND*	100
HP1M-8	2	ND*	75

*ND: No Determinado (las cepas nos mostraron en los frutos inoculados presencia de signos como micelio y acérvulos).

representativa con respecto a otros hongos de las mismas características ecológicas y que aparecen en los mismos órganos (Rubini, *et al.*, 2005; Gamboa & Bayman, 2001). Los estudios en el mango indican que los aislamientos endófitos de especies de *Colletotrichum* son más abundantes en hojas que en otros órganos como tallos y flores (Vieira, *et al.*, 2014).

Los métodos de extracción de hongos endofíticos se han basado en los procedimientos convencionales de desinfección, principalmente de las hojas, aunque también se ha recurrido a procedimientos con mayor capacidad desinfectante, como el uso de gases (cámara de cloro), con buenos resultados en cuanto a la diversidad de los hongos aislados (Mariano, *et al.*, 1997; Marshall, *et al.*, 1999; Larran, *et al.*, 2001; Otero, 2002; Schena, *et al.*, 2003; Lu, *et al.*, 2004; Higgins, *et al.*, 2014; Jaber & Salem, 2014; Murphy, *et al.*, 2014). En nuestro caso, el uso de hipoclorito de sodio al 2 % fue más eficiente que al 4 %, así como la cámara de cloro durante 15 minutos, tanto en hojas como en ramas. Es posible que la alta concentración del desinfectante haya afectado las estructuras no infectivas del hongo en los espacios intercelulares e, incluso, en el área intracelular, así como cualquier estructura localizada en la subepidermis, en tanto que con una menor concentración y un menor tiempo de exposición se eliminaron las estructuras fungosas superficiales, pero no se afectaron las estructuras internas del hongo. Se registró una menor eficiencia de la cámara de cloro, lo que podría atribuirse a que el tiempo de exposición a los gases fue letal para los microbios superficiales y endófitos presentes en las microsecciones de hojas y ramas; ello plantea la necesidad de ensayos futuros que permitan ajustar los protocolos para este tipo de órganos.

Según Gamboa (2006), es común encontrar que las comunidades de hongos endófitos varían con los estratos

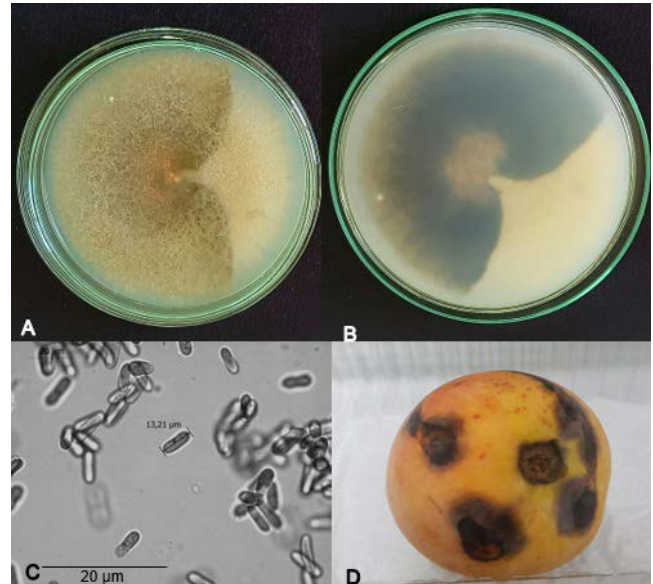


Figura 6. Cepa HP3A-4 (*Colletotrichum tropicale*): A. Anverso de la colonia. B. Reverso de la colonia después de 10 días de crecimiento en medio PDA. C. Conidios. D. Síntomas en fruto de Mango (*Mangifera indica* L.) inoculado con *Colletotrichum tropicale* después de 10 días y a 25°C; lesiones de color marrón oscuro a negras, hundidas y prominentes.

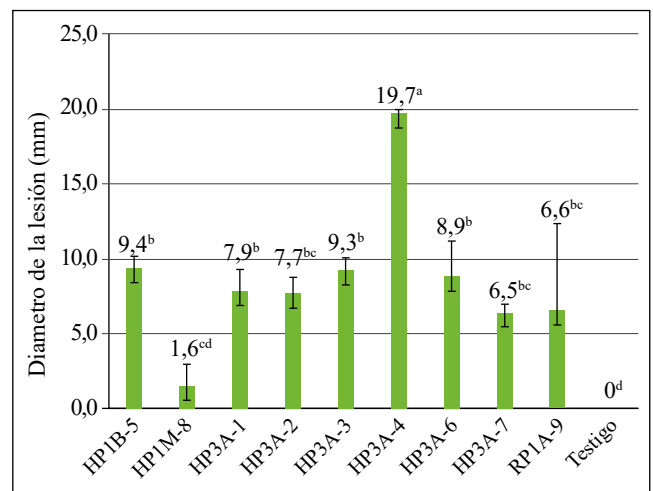


Figura 7. Diámetros de las lesiones causadas por los aislamientos endofíticos de *Colletotrichum* spp., en frutos de mango, 10 días después de la inoculación. Las barras de las columnas indican el valor de la desviación estándar de cada una de las medias. Las columnas con letras iguales no difieren significativamente según la prueba de HSD de Tukey ($P \leq 0,05$).

dentro del dosel, especialmente en la parte más alta donde hay mayor abundancia. Esto puede deberse a que, por su arquitectura compleja, los árboles tropicales generan muchos tipos de microclimas y microhábitats que interfieren en la abundancia de las especies. En el presente estudio se encontró una mayor prevalencia en el estrato superior.

Tabla 3. Números de acceso en el GenBank® obtenidos para la cepa HP3A-4 de *Colletotrichum*.

Código de la CEPA	HP3A-4			
	Gen	GAPDH	β- tubulina 2	ITS3-ITS4
Porcentaje de homología	100%	99%	99%	
Especie homóloga	<i>C. tropicale</i>	<i>C. tropicale</i>	<i>C. gloeosporioides</i>	
Accesión en el GENBANK®	KU213601.1	KU213604	MH700455.1	

Se han detectado aislamientos endofíticos de *C. gloeosporioides* (Penz.) Penz. & Sacc., *C. asianum*, *C. cliviae*, *C. dianesei*, *C. fructicola*, *C. karstii*, *C. tropicale*, y *C. endomangiferae* con capacidad patogénica en mangos (Morales & Rodríguez, 2009; Vieira, et al., 2014), especies que, en su mayoría, se han reportado como patógenos causantes de la antracnosis en el mango (Freeman, et al., 1998; Arauz, 2000; Ploetz, 2003; Weirm, et al., 2012; Lima, et al., 2013). En el presente estudio, se confirmó el potencial infectivo de cepas endofíticas de *Colletotrichum* spp. en mango cultivar Azúcar y que su naturaleza endofítica es un mecanismo que le permite estar oculto en tejidos vegetativos mientras las condiciones no le son favorables para desarrollar la infección, algo ya mencionado en algunos casos específicos (Carroll, 1988; Stone, et al., 2000; Hyde & Soyong, 2008; De Silva, et al., 2017). La presencia de estas especies patogénicas en hojas y ramas plantea el interrogante sobre su rol en la infección de otros órganos como las flores y los frutos, lo cual llevaría a revisar las estrategias de manejo utilizadas. Prihastuti, et al. (2009) plantearon que los aislamientos endofíticos de *Colletotrichum* pueden ser patógenos oportunistas, y que es necesario profundizar en el conocimiento de las infecciones naturales provenientes de cepas endofíticas.

La identificación de especies de hongos mediante los métodos convencionales puede resultar equivocada o inexacta (Xiang & Liang, 2012) debido a su gran diversidad morfológica, y a la variación en su gama de colores, estructuras macroscópicas y microscópicas y a su distribución espacial en el medio de cultivo (Watanabe, 2010; Weir, et al., 2012; Damm, et al., 2012; Freeman, et al., 2001).

En este estudio se evidenció la gran diversidad morfológica de las cepas endofíticas, por lo cual sería arriesgado atribuirle a alguna de las especies descritas actualmente. Los valores del tamaño de las conidias y el crecimiento de la colonia fueron similares a los registrados por Vieira, et al. (2014) en algunas especies de *Colletotrichum*. Según las variables descritas, los aislamientos HP3A-3, HP3A-6, HP1P-5, HP3A-1, HP3A-7, RP1A-9, HP3A-2 y HP3A-4, se asemejan a las especies de *C. endomangiferae*, *C. asianum*, *C. dianesei*, *C. fructicola*, *C. karstii* y *C. tropicale*; sin embargo, dado que dichas características son variables, las especies sugeridas deberán confirmarse mediante la caracterización molecular.

La especie endofítica más patogénica se identificó como *C. tropicale*, que se encuentra en *C. gloeosporioides sensu*

lato (Vieira, et al., 2014; Weir, et al., 2012). *C. tropicale* fue reportada por Rojas, et al. (2010) como una especie endofita en hojas de cacao (*Theobroma cacao*), guanábana (*Annona muricata*), aguacate (*Persea americana*), trompillo (*Trichilia tuberculata*), canfin (*Tetragastris panamensis*), pentagonia (*Pentagonia macrophylla*), ucuuba (*Virola surinamensis*) y laurel blanco (*Cordia alliodora*) en Panamá, y según Doyle, et al. (2013), se registró en *Terpsichore taxifolia* en Puerto Rico. En cuanto al mango, se la ha encontrado causando antracnosis en frutos después de inoculaciones controladas y se la aislado como organismo endofito en hojas (Lima, et al., 2013; Vieira, et al., 2014).

En el presente estudio se encontraron aislamientos endofitos de *Colletotrichum* spp. en hojas y ramas de mango cultivar Azúcar. Tal como se ha registrado en Brasil, la especie *C. tropicale*, endofito en hojas de mango, causó infecciones en los frutos de esta variedad, confirmando así su carácter patogénico y altamente virulento. Este registro constituye el primero reportado en mango en Colombia, ya que hasta ahora solo se habían registrado las especies *C. gloeosporioides*, *C. asianum*, *C. siamense* y *C. theobromicola* (Afanador-Kafuri, et al., 2003; Damm, et al., 2012; Gañán, 2014; Pardo, et al., 2016). La existencia de especies endofitas patogénicas indica que hay un gran potencial de inóculo oculto que posiblemente desencadenaría la antracnosis ante cambios fenológicos en el hospedante o el ambiente.

Agradecimientos

Al fondo Fonciencias, Vicerrectoría de Investigación, Universidad del Magdalena, y a la convocatoria No. 672 “Formación de capital humano de alto nivel para el departamento del Magdalena” de Colciencias, 2014. A la bióloga Eliana Revelo Gómez.

Contribución de los autores

Andrés Felipe Quintero Mercado: implementación metodológica (aislamiento y purificación del hongo, pruebas de patogenicidad e identificación molecular) análisis de resultados, así como también la revisión bibliográfica y redacción del documento. Fabio Luis Dagon Bernier: toma de muestras, implementación de la metodología en laboratorio (aislamiento y purificación de cepas del hongo, pruebas de patogenicidad), toma de datos, descripción morfológica de los aislamientos, análisis estadístico y redacción del documento. Alberto Rafael Páez Redondo: planificación del

proceso investigativo, desarrollo de protocolos evaluados, orientación en la implementación del trabajo en laboratorio, análisis bibliográfico, análisis de resultados y redacción y revisión del documento.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Afanador-Kafari, L., Minz, D., Maymon, M., Freeman, S. (2003). Characterisation of *Colletotrichum* isolates from tamarillo, passiflora, and mango in Colombia and identification of a unique species from the genus. *Phytopathology*. **93**: 579-587.
- Afanador-Kafari, L., González, A., Gañan, L., Mejía, J. F., Cardona, N., Álvarez, E. (2014). Characterization of the *Colletotrichum* species causing anthracnose in Andean blackberry in Colombia. *Plant Disease*. **98** (11): 1503-1513.
- Arauz, L. (2000). Mango anthracnose: Economic impact and current options for integrated management. *Plant Disease*. **84**: 600-608.
- Akem, C.N. (2006). Mango anthracnose disease: Present status and future research priorities. *Plant Pathology Journal*. **5** (3): 266-273.
- Arnold, E., Henk, D., Eells, R., Vilgalys, R. (2007). Diversity and phylogenetic affinities of foliar fungal endophytes in loblolly pine inferred by culturing and environmental PCR. *Mycologia*, **99**(2). **33**: 185-206.
- Cannon, P. & Simmons, C. (2002). Diversity and host preference of leaf endophytic fungi in the Iwokrama Forest Reserve, Guyana. *Mycologia*, **94**(2). **33**: 210-220.
- Cannon, P. F., Damm, U., Johnston, P. R., Weir, B. S. (2012). *Colletotrichum*—current status and future directions. *Studies in mycology*. **73**: 181-213.
- Cai, L., Hide, K. D., Taylor, P. W. J., Weir, B. S., Waller, J., Abang, M. M., Zhang, J. Z., Yang, Y. L., Phoulivong, S., Liu, Z. Y., Prihastuti, H., Shivas, R. G., McKenzie, E. H. C., Johnston, P. R. (2009). A polyphasic approach for studying *Colletotrichum*. *Fungal Diversity*. **39**: 183-204.
- Cartagena, J. & Vega, D. (2001). Fruticultura colombiana. El Mango. Manual de asistencia técnica N° 43. ICA, Sección Nacional de Frutícolas. p.124.
- Carrol, G. (1988). Fungal endophytes in stems and leaves: From latent pathogen to mutualistic symbiont. *Ecology*. **69**: 2-9.
- Chiangsin, R., Wanichkul, K., Guest, D. I., Sangchote, S. (2016). Reduction of anthracnose on ripened mango fruits by chemicals, fruit bagging, and postharvest treatments. *Australasian Plant Pathology*. **45** (6): 629-635.
- Chonhenchob, V., Kamhangwong, D., Krueate, J., Khongrat, K., Tangchantra, N., Wichai, U., Singh, S.P. (2011). Preharvest bagging with wavelength-selective materials enhances development and quality of mango (*Mangifera indica* L.) cv. Nam Dok Mai #4. *J Sci Food Agric*. **91**: 664-671.
- Damm, U., Cannon, P., Woudenberg, J., Crous, P. (2012). The *Colletotrichum acutatum* species complex. *Studies in mycology*. **73**: 37-113.
- Damm, U., Barocelli, R., Cai, L., Kubo, Y., O'Connell, R., Weir, B., ... Cannon, P. F. (2010). *Colletotrichum*: Species, ecology and interactions. *IMA fungus*. **1** (2): 161-165.
- De Silva, D., Crous, P., Ades, P., Hyde, K., Taylor, P. (2017). Life styles of *Colletotrichum* and implications for plants biosecurity. *British Mycological Society*. **31**: 155-168.
- Delaye, L., García-Guzmán, G., Heil, M. (2013). Endophytes versus biotrophic and necrotrophic pathogens—are fungal lifestyles evolutionarily stable traits. *Fungal Diversity*. **60** (1): 125-135.
- Dinh, S. Q. (2002). Post-harvest loss of mango due to anthracnose and its infection biology and resistance of mango to the disease. Kasetsart University. p. 2-70.
- Dodd, J., Estrada, A., Matcham, J., Jeffries, P. (1991). The effect of climatic factors on *Colletotrichum gloeosporioides*, causal agent of mango anthracnose, in the Philippines. *Plant Pathology*. **12**: 568-575.
- Doyle, V.P., Oudemans, P.V., Rehner, S.A., Litt, A. (2013). Habitat and host indicate lineage identity in *Colletotrichum gloeosporioides* s. l. from wild and agricultural landscapes in North America. *PLoS One* **8**:e62394
- Freeman, S., Katan, T., Shabi, E. (1998). Characterization of *Colletotrichum* species responsible for anthracnose diseases of various fruits. *Plant Disease*. **82**: 596-605.
- Freeman, S., Horowitz, S., Sharon, A. (2001). Pathogenic and Nonpathogenic Lifestyles in *Colletotrichum acutatum* from Strawberry and Other Plants. *Phytopathology*. **91**: 986-991.
- Gañán, L., Álvarez, E., Zapata, J. C. (2015). Identificación genética de aislamientos de *Colletotrichum* spp. causantes de antracnosis en frutos de aguacate, banano, mango y tomate de árbol. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **39** (152): 339-347.
- Gañán, L. (2014). Identificación taxonómica de aislamientos de *Colletotrichum* spp., asociados con la antracnosis de frutas tropicales en Colombia mediante análisis filogenético multilocus. Tesis, Magister en Fitopatología, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Caldas. Manizales. Colombia. p. 26-27.
- Gamboa, M. & Bayman, P. (2001). Communities of Endophytic Fungi in Leaves of a Tropical Timber Tree (*Guarea Guidonia*: Meliaceae). *Biotropica*. **33** (2): 352-360.
- Gamboa, M. (2006). Hongos endófitos tropicales: conocimiento actual y perspectivas. *Acta Biológica Colombiana*. **11**: 3-20.
- Hernández, P., Aranguren, M., Reig, C., Fernández, D., Mesejoc, C., Martínez, A., Galán, V., Agustí, M. (2011). Phenological growth stages of mango (*Mangifera indica* L.) according to the BBCH scale. *Scientia Horticulturae*. **130**: 536-540.
- Higgins, K., Arnold, A., Coley, P., Kusar, T. (2014). Communities of fungal endophytes in tropical forest grasses: highly diverse host – and hábitat generalists characterized by strong spatial structure. *Fungal Ecology*. **8**: 1-1.
- Hyde, K. & Soyong, K. (2008). The fungal endophyte dilemma. *Fungal Diversity*. **33**: 163-173.
- Hofman, P. J., Smith, L. G., Joyce, D. C., Johnson, G. I., Meiburg, G. F. (1997). Bagging of mango (*Mangifera indica* cv. Keitt) fruit influences fruit quality and mineral composition. *Postharvest Biology and Technology*. **12** (1): 83-91.
- Hyde, K. D., Cai, L., McKenzie, E. H. C., Yang, Y. L., Zhang, J. Z., Prihastuti, H. (2009). *Colletotrichum*: A catalogue of confusion. *Fungal Diversity*. **39** (1): 1-17.

- Ismail, A. M., Cirvilleri, G., Yaseen, T., Epifani, F., Perrone, G., Polizzi, G. (2015). Characterisation of *Colletotrichum* species causing anthracnose disease of mango in Italy. *Journal of Plant Pathology*. **97** (1): 167-171.
- Jaber, R. & Salem, M. (2014). Endophyte colonization of squash by the fungal entomopathogen *Beauveria bassiana* (Ascomycota: Hypocreales) for managing zucchini yellow mosaic virus in cucurbits. *Biocontrol science and technology*. **24**: 1096-1109.
- Kamle, M., Kumar, P. (2016). *Colletotrichum gloeosporioides*: Pathogen of Anthracnose Disease in Mango (*Mangifera indica* L.). In *Current Trends in Plant Disease Diagnostics and Management Practices*. Springer, Cham. p. 207-219.
- Larran, S., Mónaco, C., Alippi, H. (2001). Endophytic fungi in leaves of *lycopersicon esculentum* Mill. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*. **17**: 181-184.
- Lima, N., Batista, M., De Moraes Jr, M., Barbosa, M., Michereff, S., Hyde, K., Camara, M. (2013). Five *Colletotrichum* species are responsible for mango anthracnose in north-eastern Brazil. *Fungal Diversity*. **61**: 81-86.
- Lu, G., Cannon, P., Reid, A., Simmons, C. (2004). Diversity and molecular relationships of endophytic *Colletotrichum* isolates from the Iwokrama Forest Reserve, Guyana. *Mycological Research*. **108** (1): 53-63.
- Mariano, R., Fernández De Lira, R., Barbosa Da Silveira, E., Menezes, M. (1997). Levantamento de fungos endofíticos e epifíticos em folhas de coqueiro no nordeste do Brasil. I. Frequência da população fúngica e efeito da hospedeira. *Agrotropica*. **9**: 127-134.
- Marshall, D., Tunali, B., Nelson, R. (1999). Occurrence of fungal endophytes in species of wild triticum. *Crop Science Society of American*. **39**: 1507-1512.
- Morales, V. & Rodríguez, M. (2009). Microbiota endofítica asociada al cultivo del mango "Haden" (*Mangifera indica* L.) en el oriente de Venezuela. En *Revista UDO Agrícola*. **9** (2): 396-398.
- Morales, V. & Rodríguez, M. (2006). Hongos endófitos en plantaciones de mango "Haden" de la planicie de Maracaibo, Venezuela. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), Maracaibo, Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. **23**: 273-282.
- Murphy, R., Doohan, M., Hodkinson, R. (2015). Persistent fungal root endophytes isolate from a wild barley species suppress seed-borne infections in a barley cultivar. *Bio-Control*. **60**: 281-292.
- Osorio, J., Martínez, E., Hio, J., Aguirre, J. (2009). Estudios de epidemiología y control no convencional de la antracnosis del mango. Informe Técnico Corpoica. Colombia. p 17.
- Otero, T., Ackerman, D., Bayman, P. (2002). Diversity and host specificity of endophytic *Rhizoctonia* – Like fungi from Tropical Orchids. *Am J Bot*. **89**: 1852-1858.
- Páez, A. (2018). Diversidad de endófitos en mango cultivar Azúcar. Tesis de doctorado. En proceso.
- Páez, A. (2003). Tecnologías sostenibles para el manejo de la antracnosis en papaya y mango. *Boletín Técnico N° 8*. CORPOICA. p. 1-18.
- Páez, A. (1997). Respuesta de cultivares de mango (*Mangifera indica* L.) a la antracnosis en la Costa Atlántica colombiana. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. **2**: 45-53.
- Pardo-De la Hoz, C. J., Calderón, C., Rincón, A. M., Cárdenas, M., Danies, G., López-Kleine, L., ..., Jiménez, P. (2016). Species from the *Colletotrichum acutatum*, *Colletotrichum boninense* and *Colletotrichum gloeosporioides* species complexes associated with tree tomato and mango crops in Colombia. *Plant Pathology*. **65** (2): 227-237. Doi: 10.1111/ppa.12410.
- Pavitra Kumari, R. & Singh, R. (2017). Anthracnose of mango incited by *Colletotrichum gloeosporioides*: A comprehensive review. *Int. J. Pure App. Biosci*. **5** (1): 48-56.
- Petrini, O. (1991). Fungal Endophytes of Tree Leaves. *Microbial Ecology of Leaves*. *Microbial Ecology of Leaves* (J. Andrews & S. Hirano, eds). p. 179-197.
- Ploetz, R. (2003). Diseases of Mango. pp. 327-363. In: R.C. Ploetz (ed.) *Diseases of Tropical Fruit Crops*. CABI Publishing. Wallingford, UK. p. 544.
- Photita, W., Lumyong, S., Lumyong, P., McKenzie, E.H.C., Hyde, K.D. (2004). Are some endophytes of *Musa acuminata* latent pathogens? *Fungal Diversity*. **16**: 131-140.
- Phouilvong, S., Cai, L., Chen, H., McKenzie, E. H., Abdelsalam, K., Chukeatirote, E., Hyde, K. D. (2010). *Colletotrichum gloeosporioides* is not a common pathogen on tropical fruits. *Fungal Diversity*. **44** (1): 33-43.
- Prusky, D. & Lichter, A. (2007). Activation of quiescent infections by postharvest pathogens during transition from the biotrophic to the necrotrophic stage. *FEMS Microbiology Letters*. **268** (1):1-8. Doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1574-6968.2006.00603.x>
- Prihastuti, H., Cai, L., Chen, H., McKenzie, E.H.C., Hyde, K.D. (2009). Characterization of *Colletotrichum* species associated with coffee berries in northern Thailand. *Fungal Diversity*. **39**: 89-109.
- Prusky, D., Alkan, N., Mengiste, T., Fluhr, R. (2013). Quiescent and necrotrophic lifestyle choice during postharvest disease development. *Annual Review of Phytopathology*. **51**: 155-176. Doi: 10.1146/annurev-phyto-082712-102349
- Rojas, E., Rehner, S., Samuels, G., Van Bael, S., Herre, E., Cannon, P., Chen, R., Pang, J., Wang, R., Zhang, Y., Peng, Y., Sha, T. (2010). *Colletotrichum gloeosporioides* s.l. associated with *Theobroma cacao* and other plants in Panamá: Multilocus phylogenies distinguish host-associated pathogens from asymptomatic endophytes. *Mycology*. **102** (6):1328-1338.
- Rubini, M., Silva-Ribeiro, R., Pomella, A., Maki, C., Wellington L. Araújo, W., Deise R. dos Santos, D., Azevedo, J. (2005). Diversity of endophytic fungal community of cacao (*Theobroma cacao* L.) and biological control of *Crinipellis pernicioso*, causal agent of Witches' Broom Disease. *International Journal of Biological Sciences*. **1**: 24-33.
- Ruiz, C. M., Gutiérrez, L. G., Umaña, G. (2003). Caracterización morfológica y bioquímica de aislamientos de *Colletotrichum* spp. y su patogenicidad en mango (*Mangifera indica* L.). *Tecnología en Marcha*. **16** (1): 55-65.
- Sangeetha, C. & Rawal, R. (2008). Nutritional studies of *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. & Sacc. The Incitant of Mango Anthracnose. *World Journal of Agricultural Sciences*. **4** (6): 717-720.
- Schena, L., Nigro, F., Pentimone, I., Ligorio, A., Ippolito, A. (2003). Control of postharvest rots of sweet cherries and table grapes with endophytic isolates of *Aureobasidium pullulans*. *Postharvest biology technology*. **30**: 209-220.

- Scot, N.** (2008). Mango anthracnose (*Colletotrichum gloeosporioides*). University of Hawaii. Department of Plant and Environmental Protection Sciences. p. 1-7.
- Stone, J., Bacon, C., White, J.** (2000). An overview of endophytic microbes: Endophytism defined. En: Bacon, C & White, J. Microbial endophytes. New York: Marcel Dekker. p. 3-29.
- Taylor, J. W., Jacobson, D. J., Kroken, S., Kasuga, T., Geiser, D. M., Hibbett, D. S., Fisher, M. C.** (2000). Phylogenetic species recognition and species concepts in fungi. Fungal genetics and biology. **31** (1): 21-32.
- Vieira, W., Michereff, S., De Moraes Jr, M., Hyde, K., Câmara, M.** (2014). Endophytic species of *Colletotrichum* associated with mango in northeastern Brasil. En. Fungal Divers. **67**: 181-202.
- Watanabe, T.** (2010). Pictorials atlas of soil and seed fungi: Morphologies of cultured fungi and key to species. 3rd edition. CRC press. p. 3-385.
- Wanderley, I., Costa, L., Cavalcanti, M.** (2012). Diversity of leaf endophytic fungi in mangrove plants of northeast Brazil. Brazilian Journal of Microbiology. **43** (3): 1165-1173.
- Weir, B.S., Johnston, P.R., Damm U.** (2012). The *Colletotrichum gloeosporioides* species complex. Stud Mycol. **73**: 115-180.
- Xiang, S. & Liang, D.** (2012). Endophytic fungal diversity: Review of traditional and molecular techniques. Mycology. **3** (1): 65-76.

Determinación de la diversidad genética de la paloma doméstica *Columba livia* (Columbidae) a partir de genes polimórficos asociados con el color del plumaje en San Antero, Córdoba, Colombia

Adrián Enrique Rodríguez-De La Barrera^{1,*}, Luis Alfonso Causil-Vargas¹, Orlando Causil-Vargas^{1,2}

¹Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia

²Departamento de Ciencias Naturales y Educación Ambiental, Facultad de Educación y Ciencias Humanas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia

Resumen

El objetivo de esta investigación fue determinar la diversidad genética de la población de la paloma doméstica *Columba livia* empleando genes polimórficos asociados con el color del plumaje en San Antero, Colombia. Entre marzo y abril del 2017 se hicieron muestreos aleatorios en cuatro subpoblaciones del municipio de San Antero ubicadas en los sitios de Calle Abajo, Calle Central, Parque Central e Iglesia Central mediante excursiones urbanas, observación directa y registros fotográficos, y se clasificaron fenotípicamente 235 palomas. Se estudiaron los marcadores autosómicos *Grizzle* (G); *Spread* (S); *Checker* (C) y *Ash-Red* (B). Los perfiles genéticos de las subpoblaciones de palomas domésticas se establecieron con los siguientes índices genético-poblacionales: las frecuencias alélicas, la diversidad genética según Nei (1972), la heterocigocidad esperada (H_e), el coeficiente de diferenciación genética (G_{st}), el flujo génico (Nm) y las distancias genéticas entre las poblaciones utilizando el programa PopGene 1.31. Los índices de fijación propuestos por Wright, F_{is} , F_{it} y F_{st} , se calcularon mediante el programa FSTAT v 2.9.3.2. Los marcadores más frecuentes fueron el *Checker* y el *Spread*, en tanto que el *Ash-Red* evidenció las menores frecuencias alélicas. En la población total hubo un alto porcentaje de homocigotos y la diferenciación genética fue baja. Se sugieren posibles efectos de selección en los marcadores *Checker* y *Spread*. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras claves: Estructura genética; Frecuencia alélica; Flujo genético; Heterocigocidad.

Determination of the genetic diversity of the domestic pigeon *Columba livia* (Columbidae) employing polymorphic genes associated with the color of the plumage in San Antero, Córdoba, Colombia

Abstract

The objective of the study was to determine the genetic diversity of the domestic pigeon *Columba livia* using polymorphic genes associated with the plumage color in San Antero, Colombia. Between March and April 2017, random samplings were carried out in four sites of the municipality of San Antero located in Calle Abajo, Calle Central, Parque Central, and Iglesia Central. During urban excursions and through direct observation and photographic records, we made the phenotypic classification of 235 pigeons. The markers studied were *Grizzle* (G), *Spread* (S), *Checker* (C), and *Ash-Red* (B). The genetic profiles of the populations of domestic pigeons were established with the following indices: allelic frequencies, Nei's genetic diversity (1972), expected heterozygosity (H_e), genetic differentiation coefficient (G_{st}), gene flow (Nm), and genetic distances between populations were estimated using the PopGene 1.31 software. We calculated the fixation indices proposed by Wright: F_{is} , F_{it} and F_{st} using the FSTAT v 2.9.3.2 program. The most frequent markers were *Checker* and *Spread* while *Ash-Red* showed the lowest values. The total population showed a high percentage of homozygotes and genetic differentiation was low. *Checker* and *Spread* markers suggested possible selection effects. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Genetic structure; Allelic frequency; Gene flow; Heterozygosity.

Introducción

La paloma doméstica *Columba livia* (Gmelin, 1789) pertenece a la familia Columbidae, la cual probablemente evolucionó mediante procesos de selección a partir de especies de aves antecesoras. A menudo denominada paloma bravía de Castilla o zuro, se la considera una especie invasora (González, *et al.*, 2018) que se asienta en hogares y se

mantiene como un ave de ornato (Mancera, *et al.*, 2013); tiene un elevado crecimiento poblacional debido a su capacidad adaptativa en los entornos de gran incidencia humana

*Correspondencia:

Adrián Enrique Rodríguez-De La Barrera; adrian.norssate@gmail.com

Recibido: 20 de noviembre de 2018

Aceptado: 11 de marzo de 2019

Editor: Alberto Gómez

(Mondocorre, *et al.*, 2014), lo que le permite desarrollarse bajo diversas condiciones urbanas (Vargas, 2016) y, probablemente, responde a cierto tipo de selección artificial (Jacquin, *et al.*, 2011).

El plumaje de la paloma doméstica presenta variaciones (Lesiss, *et al.*, 1999a), y las bases genéticas de la coloración y el plumaje se codifican mediante un sistema múltiple de alelos (Dunmore, 1968). Asimismo, existen 60 factores hereditarios que influyen en la coloración de la paloma doméstica (Gibson, 1995). Los genes que codifican la pigmentación de la melanina tienen efectos pleiotrópicos sobre otros procesos biológicos de las aves (Gasparini, *et al.*, 2009). Los procesos adaptativos bajo los cuales se fija la coloración y la melanización resultan de factores de la historia natural de las aves, por lo que se cree que las palomas de diferentes colores están adaptadas a ambientes alternativos cuya abundancia de alimentos (Roulin, 2004) y la exposición a los parásitos varían (Miranda, 2006).

Los marcadores fenotípicos asociados con la coloración son herramientas útiles para analizar los perfiles genéticos de las poblaciones naturales; la información obtenida permite inferir las relaciones genealógicas entre los individuos de una población, la valoración del flujo genético entre poblaciones, estimar el tamaño efectivo de las poblaciones y minimizar los efectos negativos de la endogamia (Eiroa, 2016).

Varios autores han reportado estudios genético-poblacionales de palomas domésticas en Colombia. En Bogotá se ha hecho la caracterización genética de la población de palomas domésticas (Pardo, *et al.*, 2015): los marcadores *Checker* y *Spread* fueron los de mayor frecuencia alélica y, asimismo, se evidenció un elevado flujo genético y bajas distancias genéticas. En Lorica, Córdoba, se evaluó la diversidad genética de las palomas utilizando genes asociados con el color (Causil, *et al.*, 2016), registrándose la escasa diferenciación genética entre las poblaciones y la posible selección natural para el marcador *Spread*. La diversidad genética implica aspectos importantes en términos de la adaptación y el mejoramiento de las especies (Díaz, *et al.*,

2004). En ese contexto, el propósito de este estudio fue analizar la diversidad genética de la paloma doméstica (*C. livia*) a partir de los genes asociados con el color del plumaje en San Antero, Córdoba.

Materiales y métodos

Área de estudio. El estudio se llevó a cabo en San Antero, municipio ubicado en la costa norte de Colombia a 9° 22' 28,711" N y 75° 45' 30,661" O, cuya temperatura promedio es de 28 °C. Se muestrearon cuatro subpoblaciones ubicadas en los sitios de Calle Abajo, Calle Central, Parque Central e Iglesia Central.

Recolección de los datos. Entre marzo y abril del 2017, se hicieron muestreos aleatorios en cuatro subpoblaciones del municipio durante excursiones urbanas, mediante la observación directa y con ayuda de registros fotográficos en horas de la mañana (de 6:00 am a 9:00 am). Se hizo una clasificación fenotípica de cada uno de los individuos adultos encontrados (n=235), atendiendo a la presencia o ausencia de los marcadores autosómicos (Tabla 1) *Grizzle* (G), *Spread* (S), *Checker* (C) y *Ash-Red* (B).

Diseño estadístico. Los perfiles genéticos de las poblaciones se calcularon con los siguientes índices genético-poblacionales: las frecuencias alélicas de cada marcador a nivel poblacional y global; las medidas de diversidad genética establecidas por Nei (1973) correspondientes a la heterocigocidad esperada (He), la heterocigocidad esperada de la población total (HT), el coeficiente de diferenciación genética (G_{st}), el flujo genético (Nm), y las distancias genéticas de Nei (1972), de las poblaciones, las cuales se estimaron utilizando el programa PopGene 1.31 (Yeh, *et al.*, 1999). La estructura genética de las poblaciones según los índices de fijación propuestos por Wright (F_{is} , F_{it} y F_{st}), se calculó mediante el programa FSTAT v 2.9.3.2 (Goudet, 2002).

Resultados

Se muestrearon 235 individuos distribuidos en cuatro subpoblaciones (Figura 1): Calle Abajo (n=42), Calle Central (n=63), Parque Central (n=83) e Iglesia Central (n=47).

Tabla 1. Descripción de los cuatro genes estudiados

Locus	Alelos	Característica
<i>Grizzle</i> (gen autosómico)	G	Mutante, produce machas blancas extendidas alrededor de la cabeza o el cuerpo de la paloma.
	g	Silvestre, sin machas blancas
<i>Spread</i> (gen autosómico)	S	Mutante, origina palomas negras.
	s	Silvestre, palomas que no son negras
<i>Checker</i> (gen autosómico)	C	Mutante, produce un patrón de manchas triangulares gris claro o azul sobre fondo oscuro en el dorso de las alas.
	c	Silvestre, sin machas triangulares
<i>Ash-Red</i> (gen ligado al sexo)	B	Mutante, produce palomas rojas.
	b	Silvestre, origina palomas que no son rojas.

Grizzle (G); *Spread* (S); *Checker* (C) y *Ash-Red* (B)

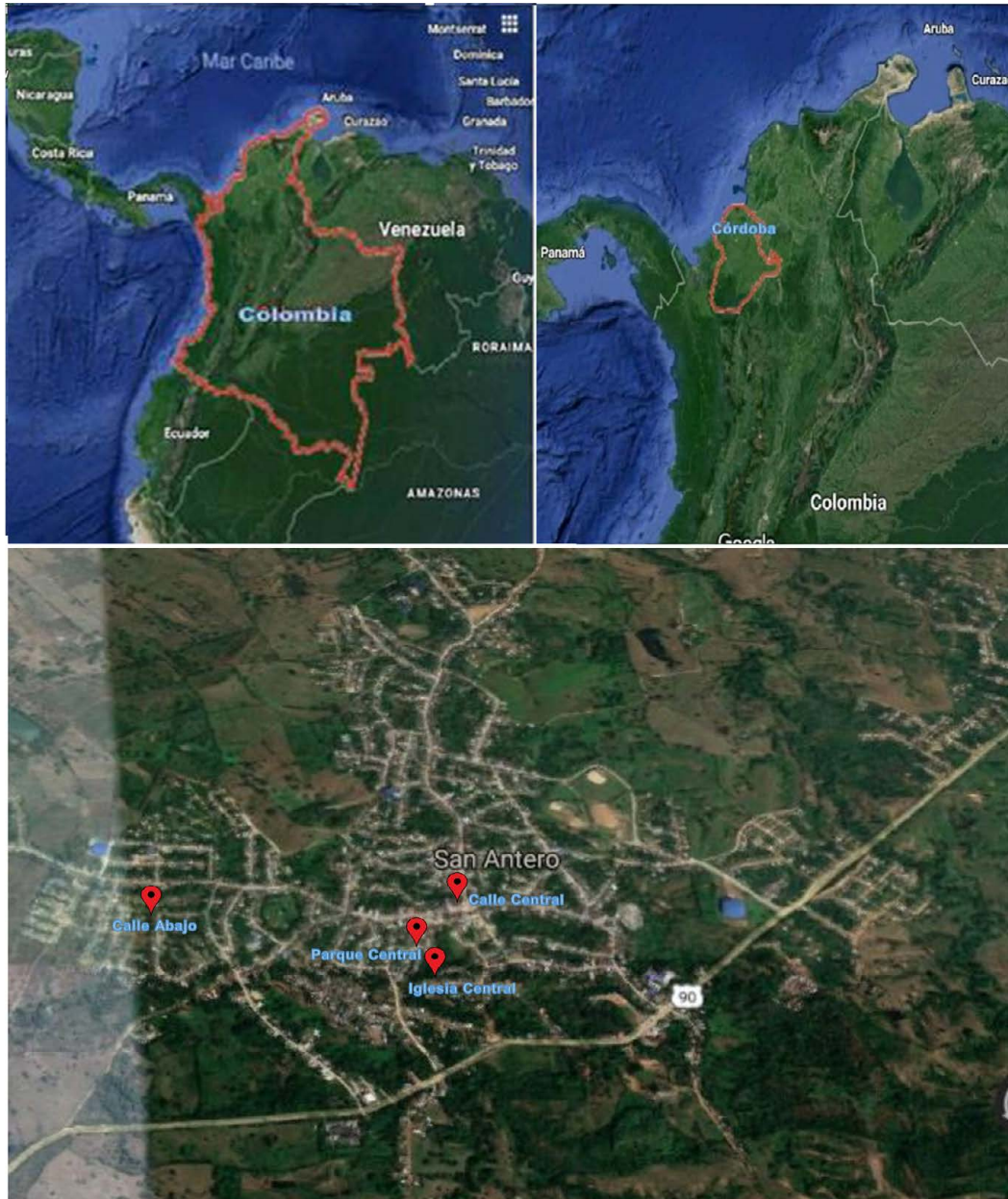


Figura 1. Subpoblaciones de palomas domésticas muestreadas en San Antero-Córdoba, Colombia.

Frecuencias alélicas. Las frecuencias alélicas para cada población (Tabla 2) evidenciaron que el marcador *Checker* ($p=0,4293$) fue el más frecuente, seguido de *Spread* ($p=0,3683$) y de *Ash-Red*, con los valores más bajos ($p=0,0729$).

Diversidad genética. La mayor heterocigocidad esperada se encontró en el marcador *Spread*, con un valor de 0,4005, y la más baja, en el marcador *Ash-Red*, con un valor de 0,1158 (Tabla 3). Los valores de la heterocigocidad observada fueron bajos: oscilaron entre un máximo de 0,1667 para el marcador *Checker* y un mínimo de 0,0278 para el *Ash-Red*. En cada marcador los valores de la variabilidad genética fueron relativamente bajos.

Coefficiente de diferenciación genética. El nivel de diferenciación genética (Tabla 4) entre las distintas subpoblaciones de palomas domésticas (*C. livia*) en la población de San Antero fue relativamente bajo según el valor promedio de F_{st} , el cual fue de 0,0634, con un índice de heterogeneidad entre poblaciones (G_{st}) igual a 0,037, lo cual indica que aproximadamente el 3,7 % de la variación revelada se debe a la diferencia entre las poblaciones y, por lo tanto, las cuatro subpoblaciones no fueron significativamente diferentes en cuanto a los marcadores estudiados.

El valor del flujo génico ($Nm=2.870$) evidenció que las poblaciones mantenían el intercambio genético, asumiéndose un total aproximado de tres migrantes por generación.

Tabla 2. Frecuencias alélicas de cada marcador en las poblaciones estudiadas

Poblaciones	Locus			
	G	S	C	B
Calle Abajo	0,2361	0,1111	0,6111	0,0694
Calle Central	0,2500	0,3750	0,2875	0,1500
Parque Central	0,2195	0,5545	0,4818	0,0445
Iglesia Central	0,2495	0,4327	0,3370	0,0277
Total	0,2387	0,3683	0,4293	0,0729

G: Grizzle; S: Spread; C: Checker; B: Ash-Red

Tabla 3. Índice de diversidad genética de Nei (1973) en cada marcador a través de la heterocigocidad esperada (He), la heterocigocidad observada (Ho) y el valor de p para cada marcador

Locus	He	Ho	p
Grizzle	0,2878	0,0278	0,1342
Spread	0,4005	0,0556	0,1261
Checker	0,3983	0,1667	0,1440
Ash-Red	0,1158	0,0278	0,1089
Promedio	0,3006	0,0695	

Tabla 4. Coeficiente de diferenciación genética (G_{ST}) y flujo génico (Nm) en San Antero

G_{ST}	Nm	p
0,037	2,870	0,0710

Cabe señalar que el valor obtenido está por encima de 1, lo que indica que el flujo génico supera los efectos de la deriva génica en las subpoblaciones y previene la diferenciación local. Ello significa que las subpoblaciones de palomas domésticas se comportaron como una sola y sugiere que para un mejor análisis y una comprensión espacio-temporal dinámica, no se debería establecer una subestructura de la población.

Estructura poblacional. Los valores positivos del F_{is} para todos los marcadores (Tabla 5) evidenciaron un exceso de homocigotos entre los individuos comparados con cada subpoblación, lo que lleva a admitir la presencia de consanguinidad dentro de las subpoblaciones, con valores que oscilan entre 0,2401 para el marcador *Spread* y 0,1125 para el marcador *Checker*. El valor promedio del F_{st} fue de 0,0634, lo que podría indicar una diferenciación genética significativa entre las poblaciones. Por último, el estadístico F_{it} evidenció un exceso de homocigotos de los individuos con respecto a la población total.

Distancias genéticas. La distancia genética (Tabla 6) entre las subpoblaciones fue baja, siendo más cercanas las subpoblaciones de Calle Central e Iglesia Central, en tanto

que las subpoblaciones de Calle Abajo y Calle Central resultaron ser las de mayor diferencia genética. La subpoblación de Calle Abajo registró el valor más alto de distancia génica en comparación con el resto de las subpoblaciones.

Discusión

Los elevados valores de las frecuencias alélicas de los marcadores *Checker* y *Spread* en este estudio concuerdan con los resultados descritos en otras investigaciones (Causil, et al., 2016; Pardo, et al., 2015). Los genes asociados con los colores melanóticos en palomas domésticas son más frecuentes en los centros urbanos, ya que, al parecer, las gónadas son más activas en épocas de menos lluvias, de manera que pueden reproducirse en mayor número en una temporada del año, en contraposición con otras aves que tienen diferentes patrones del pelaje (Hetmansky, 2008).

La mayor frecuencia de individuos melanóticos podría obedecer a cierta ventaja selectiva que tienen las palomas domésticas de coloraciones oscuras, ya que se ha reportado que son menos susceptibles de ser atacadas por parásitos hemsporidios; asimismo, serían más resistentes a ciertos patógenos (Lei, et al., 2013). Las coloraciones claras de las plumas en palomas domésticas podrían hacerlas fisiológicamente propensas a los parásitos cuando las ciudades son relativamente grandes; se cree que estos individuos más claros tienen una menor capacidad inmunitaria; por el contrario, los individuos más oscuros tienen una gran actividad inmunológica. Esta relación entre la inmunidad y la coloración con melanina podría deberse a efectos pleiotrópicos resultado de los altos niveles de la melanocortina (Jacquin, et al., 2013). Otra posible explicación se relacionaría con las expresiones fenotípicas oscuras, ya que estas tienen mayor

Tabla 5. Valores de los estadísticos F para cada marcador en la población global

Marcadores	F_{IT}	F_{ST}	F_{IS}	p
Ash-Red	0,3065	0,0020	0,1476	0,0090
Grizzle	0,1416	0,1611	0,1190	0,0071
Spread	0,2221	0,0726	0,2401	0,0051
Checker	0,0001	0,0182	0,1125	0,0061
Promedio	0,1675	0,0634	0,1548	

Tabla 6. Matriz de distancia genética (Nei, 1972) entre las poblaciones

	1	2	3	4
1	----			
2	0,1465	----		
3	0,0425	0,0356	----	
4	0,1099	0,0026	0,0200	----

1: Calle Abajo; 2: Calle Central.; 3: Parque Central; 4: Iglesia Central

resistencia al estrés y es posible que estas palomas tengan exposición perinatal a la corticosterona, lo cual depende de la condición materna, de las características del nido y de las provisiones de alimento, aspectos que, al parecer, tienen efectos organizativos y permiten que los individuos oscuros soporten mejor el estrés en los centros urbanos (Corbel, *et al.*, 2016)

Otro factor asociado a la selectividad de colores oscuros en las palomas domésticas podría deberse a la gran producción de huevos por parte de las palomas más oscuras, hecho que sería atribuible a posibles ventajas selectivas de los individuos con mayor masa corporal, lo que ocasiona un incremento en la actividad reproductiva de las palomas y, probablemente, causaría efectos selectivos de las condiciones ambientales en los genes melanóticos del plumaje (Causil, *et al.*, 2016)

El uso del hábitat puede tener un papel importante en el momento de fijar los genes melanóticos, siendo este el caso de los marcadores polimórficos. Específicamente, es posible que las plumas melanóticas tengan una mayor eficacia de desintoxicación por la intensa actividad de muda de estas aves, lo cual permite suponer que las palomas más oscuras podrían habitar zonas más contaminadas que las palomas con patrones más claros, rasgo que representaría una posible fuerza selectiva a favor de los fenotipos melanóticos entre las palomas domésticas en los centros urbanos (Chatelain, *et al.* 2014). Era de esperarse que las frecuencias alélicas se acentuaran en los marcadores más oscuros como el *Checker* y el *Spread*, pues el estudio se llevó a cabo en un municipio urbano, lo que influiría en que los genes melanóticos exhibieran patrones selectivos como la inmunidad a los parásitos, así como la ventaja fisiológica de la acción de la melanocortina y la gran producción de huevos y el consecuente aumento de estos marcadores, hecho coherente con el grado de urbanización de esta localidad.

El grado de flujo genético permite inferir que existe una fuerza que mantiene integrada la población, lo que condicionaría la persistencia de un perfil genético en la población local, de manera que los rasgos de distribución geográficas evolucionaron de forma conjunta (Cárdenas, 2012).

La reducción de heterocigotos obtenida al aplicar los distintos índices de fijación (F_{is} y F_{it}) en cada una de las subpoblaciones estudiadas evidenció que se comportan como una población, en tanto que los bajos índices de diferenciación genética revelan una débil estructuración de la diversidad genética (Vergara, 2015), hecho que sería atribuible a que las poblaciones naturales y comunicadas entre sí exhiben una menor diferenciación genética (Matallanas, 2015). El grado de diferenciación genética entre las poblaciones fue bajo ($G_{st}=0,037$). Un estudio en aves demostró que los machos se aparean con varias generaciones de su descendencia provocando una creciente similitud entre ellas (Acuña, 2016). Las palomas tienden a elegir parejas genéticamente similares, lo que ocasiona altos niveles de endogamia en la población (Jacob, *et al.*, 2016); por otra parte, es posible

que exista una correlación entre las distancias genéticas y las geográficas, pues la diferenciación genética aumenta proporcionalmente con las distancias geográficas, lo que podría implicar un número significativo de inmigrantes (Zuleta, *et al.*, 2012). Esto sugiere que los eventos selectivos conllevaron un intercambio genético que superó los efectos de la deriva genética y la distinción local (Causil, *et al.*, 2016).

Las distancias genéticas entre las cuatro subpoblaciones del estudio, especialmente la cercanía geográfica entre la subpoblación de Calle Central e Iglesia Central, se explicarían por el alto flujo genético entre ellas, ya que, al parecer, las palomas domésticas presentan mayor probabilidad de vuelo de una población cercana a otra, lo que genera en los individuos un mayor grado de confianza y probablemente es producto de su adaptación en zonas urbanas (Skandrani, *et al.*, 2016). Esto podría explicar el parecido genético de las subpoblaciones estudiadas y permite concluir que la población de palomas domésticas de San Antero tendría un mismo perfil genético-poblacional, por lo que se deberían estudiar como una sola población.

Conclusiones

Los marcadores más frecuentes fueron el *Checker* y el *Spread*, ya que, al parecer, la selección natural está favoreciendo a los individuos más oscuros por su mayor eficacia reproductiva, cierta resistencia a los parásitos y las ventajas inmunológicas producto de efectos pleiotrópicos. La población total mostró un alto porcentaje de homocigotos y a nivel de las subpoblaciones la diferenciación genética fue baja, lo cual evidencia un parentesco genético entre las palomas de los sitios estudiados debido al intercambio de genes entre estas subpoblaciones y refleja la existencia de similitudes genéticas locales.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los estudiantes de la Escuela Normal Superior Santa Teresita de Loricá, por los registros fotográficos que permitieron la realización de este trabajo.

Financiación

El estudio fue financiado con recursos propios de los autores.

Contribución de los autores

Adrián Enrique Rodríguez-De La Barrera se encargó del muestreo, redacción y análisis de manuscrito; Luis Alfonso Causil-Vargas se encargó de interpretar y analizar los diferentes métodos estadísticos aplicados en este estudio y Orlando Causil-Vargas se encargó de procesar los datos estadísticos en los softwares y tabular los datos recolectados.

Conflicto de intereses

Ninguno que declarar.

Referencias

Acuña-Rodríguez, W. (2016). Determinación de la diversidad y estructura genética de patos criollos (*Cairina moschata* L. 1758)

- de los departamentos de Lambayeque y San Martín mediante el uso de microsátélites. Universidad Nacional Mayor de San Marco, Lima, Peru. p. 57-59.
- Cárdenas, M. O. M.** (2012). Dinámica genética poblacional del pinguino magallánico, *Spheniscus magellanicus* (Forster, 1781) de isla Guafo, sur de Chile y sus relaciones filogeográficas con poblaciones del Atlántico Sur. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. p. 36-38.
- Causil-Vargas, L., Rodríguez-De La Barrera, A., Causil-Vargas, O.** (2016). Diversidad genética de palomas domésticas (*Columba livia*) en Llorca, Colombia, utilizando genes que codifican la coloración del plumaje. Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú. **27** (3): 448-457.
- Chatelain, M., Gasparini, J., Jacquín, L., Frantz, A.** (2014). The adaptive function of melanin-based plumage coloration to trace metals. *Biology Letters*. **10** (3): 20140164.
- Corbel, H., Legros, A., Haussy, C., Jacquín, L., Gasparini, J., Karimi, B., Frantz, A.** (2016). Stress response varies with plumage colour and local habitat in feral pigeons. *Journal of Ornithology*. **157** (3): 825-837.
- Díaz, R., Alfonsín, P., Abúin, M., Fernández-López, J.** (2004). Caracterización de la variabilidad genética de una población de mejora de *Juglans regia* L. Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales. **13** (3): 518-526.
- Dunmore, R.** (1968). Plumage polymorphism in a feral population of the rock pigeon. *American Midland Naturalist*. **79** (1): 1-7
- Eiroa, D.** (2016). Caracterización genética de la población de paloma rabiche (*Columba junoniae*) reintroducida en la isla de Gran Canaria. Universidad de la Laguna, Canarias, Instituto Universitario De Enfermedades Tropicales y Salud Pública de Canarias. p. 1-33.
- Gasparini, J., Bize, P., Piault, R., Wakamatsu, K., Blount, J. D., Ducrest, A. L., Roulin, A.** (2009). Strength and cost of an induced immune response are associated with a heritable melanin-based colour trait in female tawny owls. *J. Anim. Ecol.* **78**: 608-616.
- Gibson, L.P.** (1995). Genetics of Pigeons *Columba livia* (Gmelin). Plain City, USA. p. 180-187.
- González-Oreja, J. A., Zuria, I., Carbó-Ramírez, P., Charre, G. M.** (2018). Using variation partitioning techniques to quantify the effects of invasive alien species on native urban bird assemblages. *Biological Invasions*. **20** (10): 1-14.
- Goudet, J.** (2002). FSTAT 2.9. 3: A program to estimate and test gene diversities and fixation indices (updated from Goudet 1995). Lausanne: Switzerland. p. 485-486.
- Hetmański, T. & Jarosiewicz, A.** (2008). Plumage polymorphism and breeding parameters of various feral pigeon *Columba livia* gm. morphs in urban area Gdańsk, north Poland. *Pol. J. Ecol.* **56** (4): 683-691.
- Jacob, G., Prévot, A. C., Baudry, E.** (2016). Feral Pigeons (*Columba livia*) Prefer Genetically Similar Mates despite Inbreeding Depression. *PloS one*. **11** (9): e0162451.
- Jacquín, L., Lenouvel, P., Haussy, C., Ducatez, S., Gasparini, J.** (2011). Melanin-based coloration is related to parasite intensity and cellular immune response in an urban free living bird: The feral pigeon *Columba livia*. *Journal of Avian Biology*. **42** (1): 11-15.
- Jacquín, L., Récapet, C., Prévot-Julliard, A. C., Leboucher, G., Lenouvel, P., Erin, N., ... Gasparini, J.** (2013). A potential role for parasites in the maintenance of color polymorphism in urban birds. *Oecologia*. **173** (3): 1089-1099.
- Lei, B., Amar, A., Koeslag, A., Gous, T. A., Tate, G. J.** (2013). Differential haemoparasite intensity between black sparrowhawk (*Accipiter melanoleucus*) morphs suggests an adaptive function for polymorphism. *PLoS One*. **8**: (12 e8160)
- Leiss, A. & Haag-Wackernagel, D.** (1999a). Gefiederfärbungen bei der Strassentaube (*Columba livia*). *J. Ornithol.* **140**: 341-353.
- Mancera, V. M. M., Jiménez, L. C. V., Medina, D. A. B., Soler-Tovar, D.** (2013). La paloma (*Columba livia*) en la transmisión de enfermedades de importancia en salud pública. *Revista Ciencia Animal*. **6**: 177-194.
- Miranda, L.** (2006). Aislamiento e identificación de patógenos entéricos de heces de palomas en la ciudad de la Paz, Bolivia. Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Bioquímicas. p. 15-25.
- Matallanas-Peñas, B.** (2015). Análisis genético de las poblaciones españolas del cangrejo de río *Austropotamobius italicus* (Faxon, 1914). Disertación doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- Mondocorre, W., Pérez, F., Albis, N., Zeballos, M.** (2014). Estimación de la abundancia de palomas (*Columba livia*) y percepción de la ciudadanía, para su control y manejo en la ciudad de Sucre. Universidad Mayor Pontificia de San Francisco Xavier de Chusquisaca. p. 1-20.
- Nei, M.** (1972). Genetic distance between populations. *Amer Natur.* **106**: 283-292.
- Nei M** (1973) Analysis of gene diversity in subdivided populations. *Proc. Nat. Acad. Sci.* **70** (12): 3321-3323.
- Pardo, E., Cavadia, T., Alvarino, G.** (2015). Análisis de la diversidad genética de la paloma domestica (*Columba livia*) en Bogotá, Colombia, utilizando genes que codifican la coloración y diseño del plumaje. *Bistua Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, Universidad de Pamplona*. **13** (1): 35-45.
- Rincón, J., López, A., Echeverri, J.** (2013). Estructura y diversidad genética en vacas Holstein de Antioquia usando un polimorfismo del gen bGH. *Revista MVZ Córdoba*. **18** (1): 3346-3354.
- Roulin, A.** 2004. The evolution, maintenance and adaptive function of genetic colour polymorphism in birds. *Biol. Rev.* **79**: 1-34.
- Skandrani, Z., Prevot, A. C., Baldaccini, N. E., Gasparini, J.** (2016). On the interplay between phylogeny and environment on behaviour of two urban bird species, *Columba livia* and *Corvus corone* (Aves). *Italian Journal of Zoology*. **83** (1): 98-102.
- Vargas-García, J. L.** (2016). Prevalencia de *Cryptosporidium* sp. en heces de paloma doméstica (*Columba livia*) de parques y plazas de la ciudad de Huanuco y su efecto en la salud pública. Universidad de Huanuco, Huanuco, Peru. p. 8-9.
- Vergara-Pacheco, D.A.** (2015). Diversidad genética de *Phytelephas aequatorialis* Spruce en la provincia de Manabí. Tesis. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Yeh, F., Yang, R., & Boyle, T.** (1999). Microsoft Windows-based free ware for population genetic analysis (Release 1.31). University of Alberta, Edmonton. p. 1-3.
- Zuleta, T. & María, A.** (2012). Genética poblacional de la lagartija de lava endémica (*Microlophus bivittatus*) de la Isla San Cristóbal e islote Lobos, Galapagos-Ecuador, mediante microsátélites como parte de la línea base para su manejo y conservación. Tesis. Universidad de San Francisco de Quito, Colegio de postgrado, Quito, Ecuador.

Mangroves of Colombia revisited in an era of open data, global changes, and socio-political transition: Homage to Heliodoro Sánchez-Páez

Juan F. Blanco-Libreros^{1,*}, Ricardo Álvarez-León²

¹Instituto de Biología, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

²Fundación Verdes Horizontes, Manizales, Colombia

Abstract

Colombia is the only South American country with coasts in both the Pacific Ocean and the Caribbean Sea thus providing great contrasts for mangroves in terms of climatic types and geomorphic settings. For instance, mangroves are extensive along the Pacific coast due to both high annual rainfall rates and the presence of many world-class deltas. Besides, they are the habitat of the only Neotropical endemic mangrove (*Pelliciera rhizophorae*), which is also a threatened species. In contrast, mangroves are discontinuously distributed along the Caribbean coast and they are extensive in the three major deltas and a few coastal lagoons. In addition, dwarf and stunt mangroves are found in northern arid lands sprung by seasonal streams and rivers. Recent studies have highlighted the global significance of the Colombian mangroves in terms of their extension, low deforestation rates (particularly in the Pacific coast), and high reservoirs of ecosystem carbon scattered nation-wide. Nonetheless, most of the current understanding of the biogeography of our mangroves has been obtained by integrating studies independently conducted in different sites and years. The voluminous information collected by Heliodoro Sánchez-Páez and his colleagues in the largest national inventory of mangroves (MCP: Mangroves of Colombia Project, Ministry of the Environment) undertaken in the mid 1990's provides an opportunity to re-assess biogeographic hypotheses (e.g., that high rainfall promotes the increase in the importance value of red mangroves) and to explore macroecological patterns when combined with open data sets. The objective of this paper was to introduce HELIO_SP.CO v.1, an open database derived from this mangrove inventory as a homage to Heliodoro Sánchez-Páez, who passed away in 2017, as a platform for macroecological studies and benchmark for future impact assessments of climate change and land-use change on mangroves in Colombia. In addition, the contributions of the MCP were reviewed and the general geographic patterns were explored by using HELIO_SP.CO v.1. For instance, the shift of the two dominant mangrove species in Colombia across the rainfall gradient observed from Nariño to La Guajira was clearly depicted. Using WorldClim 2, we also explored the rainfall and temperature spaces where the species occur. Finally, we briefly reviewed the progress of mangrove science since 1997 and identified some challenges regarding climate change and post-armed conflict scenarios in Colombia. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Biogeography; macroecology; *Rhizophora* spp.; *Avicennia germinans*; *Laguncularia racemosa*; *Pelliciera rhizophorae*; HELIO_SP.CO v.1; Climatic space; Post-conflict.

Regreso a los manglares de Colombia en una era de datos abiertos, cambios globales y transiciones sociopolíticas: homenaje a Heliodoro Sánchez-Páez

Resumen

Colombia es el único país suramericano con costas tanto en el Océano Pacífico como el Mar Caribe, por lo cual exhibe grandes contrastes para los manglares en términos de tipos de climas y geoformas costeras. Por ejemplo, los manglares son extensos a lo largo de la costa del Pacífico debido a la alta precipitación anual y a la presencia de grandes deltas. Estos manglares son el hábitat de la única especie endémica del Neotrópico (*Pelliciera rhizophorae*), también clasificada como amenazada. En contraste, los manglares se distribuyen de forma discontinua a lo largo de la costa Caribe, siendo extensos en los tres deltas más grandes y en unas pocas lagunas costeras. Además, los manglares enanos y de baja estatura están presentes en las zonas áridas de la costa norte, bañadas por quebradas y ríos estacionales. En estudios recientes se resalta la importancia global de los manglares de Colombia en términos de su extensión, sus bajas tasas de deforestación (particularmente en la costa Pacífica) y sus grandes reservas de carbono. Sin embargo, la mayor parte de lo que actualmente sabemos de la biogeografía de los manglares colombianos se ha obtenido a partir del análisis de estudios independientes llevados a cabo en diferentes sitios y años. La voluminosa

*Corresponding autor:

Juan F. Blanco-Libreros; juan.blanco@udea.edu.co; **Received:** October 25, 2018; **Accepted:** March 2, 2019; **Editor:** Jaime Cantera

información recolectada por Heliodoro Sánchez-Páez y sus colaboradores en el mayor inventario nacional de manglares (PMC: Proyecto Manglares de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente) recopilado a mediados de la década de 1990, ofrece una oportunidad para, en combinación con datos abiertos, revisar hipótesis biogeográficas (por ejemplo, que la alta precipitación promueve el valor de importancia del mangle rojo) y explorar patrones macroecológicos. En homenaje a Heliodoro Sánchez-Páez (fallecido en el 2017), se presenta a la comunidad la base de datos HELIO_SP.CO v.1, derivada de este inventario forestal, como una plataforma para los estudios macroecológicos y línea de base para futuras evaluaciones del impacto del cambio climático y en los usos de la tierra. Se revisaron las contribuciones del PMC y se exploraron patrones geográficos generales utilizando la base de datos HELIO_SP.CO v.1. En este sentido, se describió el recambio de las dos especies dominantes a lo largo del gradiente de precipitación observado desde Nariño hasta La Guajira. Se utilizaron datos rasterizados de WorldClim 2 para explorar los espacios de precipitación y temperatura donde las especies fueron registradas. Por último, se revisó brevemente el progreso de las “ciencias del manglar” desde 1997 y se detectaron algunos de los desafíos relacionados con el cambio climático y las situaciones posteriores al acuerdo de paz en Colombia.

Palabras clave: Biogeografía; Macroecología; *Rhizophora* spp.; *Avicennia germinans*; *Laguncularia racemosa*; *Pelliciera rhizophorae*; HELIO_SP.CO v.1; Espacio climático; Postconflicto.

Introduction

For almost two decades we had been planning to review the data obtained from the largest mangrove inventory done in Colombia to date (Sánchez-Páez, *et al.*, 1997 a, b), but despite an extended abstract and exploratory analyses in theses required for graduation (Estrada-Urrea, *et al.*, 2010), the raw dataset of this inventory has remained inaccessible to the scientific community and no in-depth analysis has been performed. However, the passing of the senior forester Heliodoro Sánchez-Páez in February 12, 2017, prompted us to finish the data mining and assembling the geographical database to serve national and international researchers in an era of new scenarios (climatic, socioeconomic, and political) in Colombia that will require open access to nation-wide baseline data. Heliodoro Sánchez-Páez was the director of the National Park Division in the former *Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente* (Inderena), prior to the creation of the Colombian Ministry of the Environment in 1993. In this post, he was instrumental for the designation of various protected areas including the Salamanca Park, a mangrove landmark area in the Caribbean coast of Colombia. He also worked as a university professor and editor of a national forestry journal (*Colombia Forestal*), and most importantly, he was the leading scientist responsible for the largest national inventory of mangroves undertaken until now in the country by the Ministry of the Environment with funding from the International Tropical Timber Organization (IITO) (Sánchez-Páez, *et al.*, 1997a,b). The Mangroves of Colombia Project (MCP) was executed in two phases between 1991 and 2001 and it was key for updating the extent of mangroves of the country, empowering fishing communities, initiating pilot restoration projects, and drafting a national policy. Nearly three decades after the initiation of the MCP, we finally wrote this review paper with the following objectives: 1) to highlight the uniqueness of mangroves in Colombia and their global significance; 2) to briefly explain the major achievements of the MCP, and 3) to promote the use of the MCP databases to address the main challenges before

researchers and managers during the coming decades in a scenario of sea level rise and climate change, pervasive land-use conflicts, and coastal zone planning after the cessation of a 50 year armed conflict through the agreement signed with the largest insurgent group (*Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia*, FARC) in November 2016. For this purpose and as a tribute to Heliodoro Sánchez-Páez, we released the geographical database HELIO_SP.CO v.1: Hierarchical, Entity-based and Landscape-level Information Observatory for Mangrove SPecies in COlombia, version 1. This database contains stand density, mean diameter at breast height (DBH), and Importance Value Index (IVI) for the four most important species (*Rhizophora* spp., Rhizophoraceae; *Avicennia germinans*, Avicenniaceae; *Laguncularia racemosa*, Combretaceae, and *Pelliciera rhizophorae*; Tetrameristaceae) in nearly 100 plots located in the Colombian mainland departments (four in the Pacific coast and seven in the Caribbean coast). Sampling was conducted between November 1995 and August 1996 in both coasts. Mean and maximum tree heights were also included for the Caribbean coast. The plots extended between 1.41 and 12.23 degrees in latitude in the Northern Hemisphere (WGS84 System). This is a first version as we only included the data for trees with >15 cm in diameter. We also included a climatic dataset for the locations extracted from gridded climatic data, a current standard for studies in mangrove macroecology (Rivera-Monroy, *et al.*, 2017, Osland, *et al.*, 2018; see further descriptions in Supplementary file, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/780/3362> and data repository at <https://doi.org/10.7910/DVN/GGLRXW>). Additionally, we briefly reviewed the progress in mangrove science in Colombia since 1997 by highlighting the most significant studies.

Global significance of the mangroves of Colombia

Colombia can be described as a unique and globally significant country in terms of mangroves. It is the only country in South America with coasts in both the Pacific and the Atlantic Oceans (specifically in the Caribbean Sea), which have physiognomic differences mainly due to significantly

different annual rainfall rates (Álvarez-León, 1993). In 1992, it was estimated that there were nearly 380,000 ha of mangroves in Colombia (Zambrano-Escamilla & Rubiano-Rubiano, 1997 a, b), The most recent update of global mangrove extent placed our country in the top 20 world ranking, and in the fourth place in the Americas (Hamilton & Friess, 2018). Another recent global study on mangrove height placed the country among the top 5, reporting trees that exceed 50 m in some locations in Cauca and Nariño (Simard, *et al.*, 2019). However, prior to the late 1980s this significance was not reflected in the number of studies published nor in nation-level laws protecting this ecosystem (Álvarez-León & Álvarez-Puerto, 2016). On the contrary, degradation was commonplace in many locations due to urban sprawl, agricultural and pastoral expansion, establishment of fish and shrimp ponds, and legal and illegal logging, among other threats (Álvarez-León, 1993, Álvarez-León & Polanía, 1994, 1996). The execution of the MCP updated mangrove extent, promoted the adoption of management policies, and highlighted the importance of mangroves for biodiversity (Álvarez-León & García-Hansen, 2003). Nowadays, some mangrove areas of Colombia, particularly in the Pacific coast and the Southern Caribbean coast, have been recognized internationally as luxuriant and semi-wild areas (Castellanos-Galindo, *et al.*, 2015, Mejía-Rentería, *et al.*, 2018, López-Angarita, *et al.*, 2018), as well as world-class high biomass and carbon reservoirs (Blanco-Liberos, *et al.*, 2012, 2015, Bolívar, *et al.*, 2017). According to Hamilton & Friess (2018), 2% of the global mangrove carbon stock is found in Colombia, and 45% of this holding is located in Nariño, while another 80% can be found in the four states of the Pacific coast. Colombia also exhibits a variety of climates ranging from super humid to desert along the South-North latitudinal gradient, thus promoting the development of tall mangroves in Cauca and Nariño, in the vicinity with Ecuador, in the Pacific, and dwarf mangroves in the Guajira Peninsula, in the vicinity with the Maracaibo Gulf in Venezuela (Pinto-Nolla, 1999). Finally, the formation of the Isthmus of Panamá promoted a disjunct distribution of the Piñuelo or Tea Mangrove, *Pelliciera rhizophorae*, the only endemic species to the Neotropics, presumably under an incipient speciation process due to the genetic isolation between both basins and the small size of the local populations (Blanco-Liberos, *et al.*, 2016, Castillo-Cárdenas, *et al.*, 2015). It is also the only Neotropical species considered to be in a vulnerable conservation status (Blanco-Liberos, *et al.*, 2016, and references therein).

The 1991-2001 national inventory (MCP)

During phase 1 (1991-1995), the aim of the project was to provide the scientific baseline for preserving and managing mangroves bearing in mind that they could be sustainably used for multiple purposes by fishing communities and for the economic development of selected regions. Two large

volumes were published summarizing the diagnostics and the zoning of mangroves from each coast (Sánchez-Páez, *et al.*, 1997 a, b). Each volume contained field inventories of the floristic composition and the forest structure, as well as an impact assessment in addition to hydrologic and edaphic information. Descriptions of the major socioeconomic features were also included. The information was compiled for each of the coastal departments (the country's major administrative divisions) (Figure 1). Baseline maps were constructed at a 1:100,000 scale using INTERA RADAR images for the Pacific coast mangroves and Landsat satellite images for the Caribbean coast (Zambrano-Escamilla & Rubiano-Rubiano, 1997 a, b). Onto these maps, mangroves were preliminarily classified into four categories according to field assessments: 1) preservation, 2) multiple use, 3) recovery, and 4) production. Guidelines were provided for managing mangroves under each zoning category.

In addition to the forest inventory carried out with point-centered quadrats, permanent plots were established nationwide, but only a fraction was revisited. Ten out of 25 permanent plots established along the Caribbean coast were measured twice during the period 1996-1997 (Sánchez-Páez, *et al.*, 1998a). In the arid to desert parts of the northern coast (Magdalena and La Guajira), sapling colonization was very low while it was greater (particularly in *R. mangle*) in the semi-arid (seasonally-dry) middle coast (Bolívar and Córdoba). In the Pacific Coast, nine permanent plots out of 27 were measured twice during the period 1996-1999 (Sánchez-Páez, *et al.*, 1998 b). The red mangrove *R. mangle* (mean DBH=23.5 cm) increased 0.31 cm/year on average. In the southern part of this coast (Nariño), sapling colonization was also measured.

During phase one, pilot nursery projects (<1 yr-span) were initiated to aid restoration of degraded areas (Ulloa-Delgado, *et al.*, 1998). In the Caribbean, survival of *R. mangle* was high either in nursery (80-100%) or in field-planted propagules (67-95%) in Pasacaballos and Leticia (Bolívar), Boca Cerrada and La Caimanera (Sucre), and San Antero and Bahía de Cispatá (Córdoba) (Sánchez-Páez, *et al.*, 1998a). Growth was also measured in various species along the Caribbean. In the Pacific, survival of red mangrove was greater either when transplanted from nurseries or when directly planted in 15 restoration plots distributed along the four coastal states (Guevara-Mancera, 1998, see location in the map in page 6; Sánchez-Páez, *et al.*, 1998 b, table 5, page 57). Outstandingly, the survival of 96% of the Piñuelo mangrove (*P. rhizophorae*) seedlings was observed when transplanting from the nurseries to the field. For further detail, we recommend reading the original reports. We are not aware of the continuity of such restoration projects.

During phase two of the project (1999-2000), the aim was to describe the dynamics of mangrove growth by monitoring permanent plots for increments in tree diameter, natural recruitment, and phenology (Sánchez-Páez, *et al.*, 2000, 2004). These efforts were concentrated in

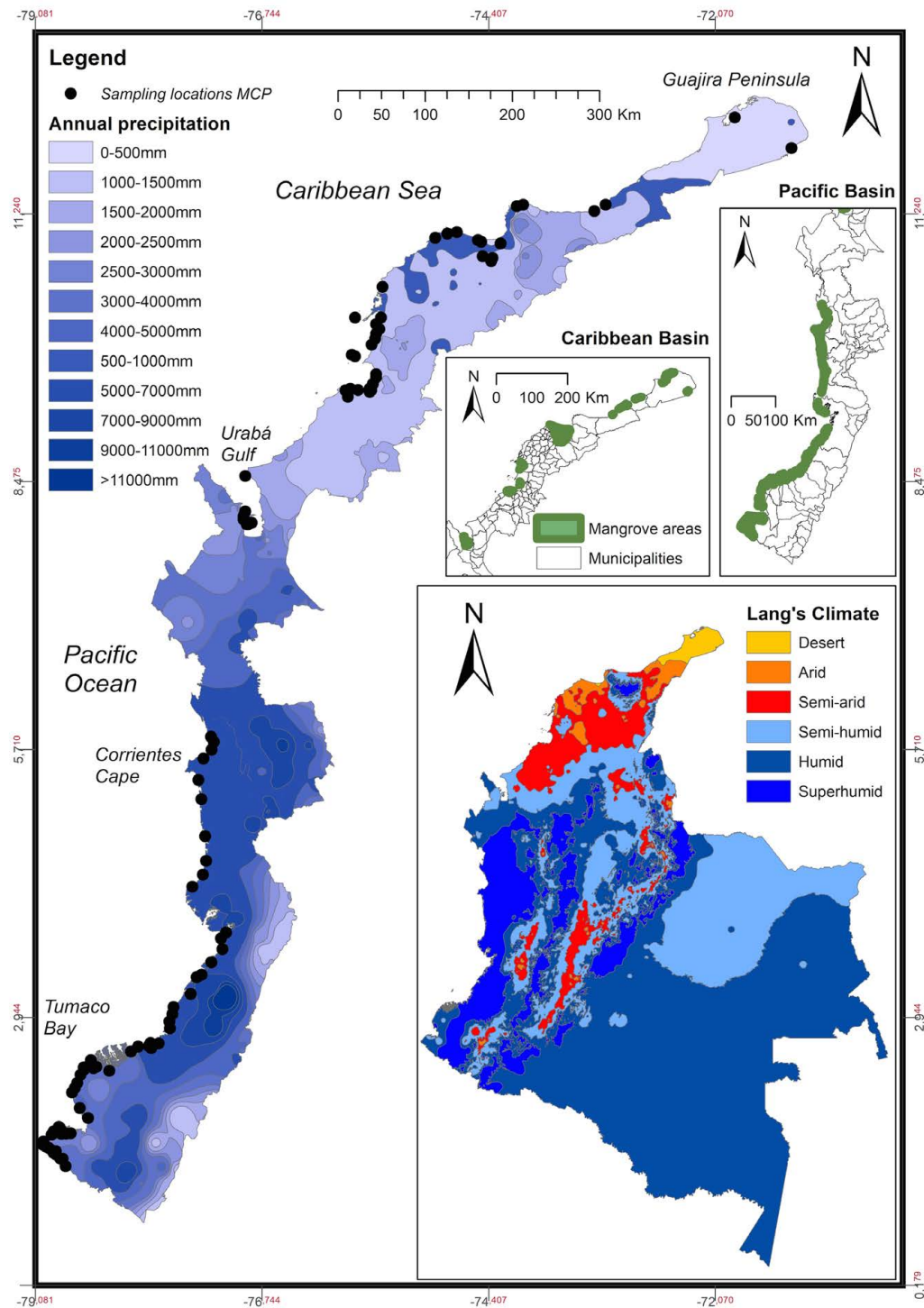


Figure 1. Distribution of sampling locations of the “Mangroves of Colombia Project” along the two Colombian coasts relative to annual precipitation. Large inset: Country map showing Caldas-Lang climate types. Small insets: Mangrove areas according to Etter’s Ecosystem Map of Colombia (1998) are shown for both coasts. Climate data from *Sistema de Información Ambiental de Colombia* (IDEAM-SIAC).

Córdoba. Pilot restoration projects were also established in partnership with local communities to provide the guidelines for successful initiatives using the four most common mangrove species. Productive projects (silviculture) were established (two in Bolívar, one in Sucre, and one in

Córdoba) with former illegal loggers. They were trained in nursery and planting techniques and they were motivated to restore degraded areas. For instance, 80 ha were planted in Canal del Dique, while channels were reopened in Cispatá Bay in order to increase fisheries. In summary, by working

alongside with the fishing communities, the MCP supported community organization, promoted environmental education, and rescued local ecological knowledge useful for mangrove silviculture and restoration (Sánchez-Páez, *et al.*, 2000, 2004). The second phase produced five books, 30 technical reports, five booklets, two videos, 90 thematic maps (1:100,000), and six presentations in national and international scientific meetings. Finally, the results from the MCP were used by the Ministry of the Environment for drafting the national mangrove policy and for issuing various ministerial resolutions that are valid to date (Álvarez-León & Álvarez-Puerto, 2016).

Usefulness of the MCP databases: The example of biogeographical and macroecological patterns

While the MCP produced voluminous technical reports and robust databases that were employed for zoning mangroves nation-wide and promoted policies for mangrove management at national and local levels, little was applied for advancing scientific knowledge. For this reason, in the present review, we outlined the major patterns based in a new analysis using Geographic Information Systems, which provides additional features for the 292,724 ha of

mangroves reported in 1992 for the Pacific coast, and the 87,230 ha for the Caribbean coast (Zambrano-Escamilla & Rubiano-Rubiano, 1997 a, b). We have redrawn part of the original data (now in HELIO_SP.CO v.1, see supplementary file, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/780/3362>) and made exploratory correlations with climatic-gridded-data (i.e., WorldClim2) (Fick & Hijmans, 2017).

Overall, Colombian mangroves were classified phytosociologically as *Rhizophorion occidentale*, but this scheme has been criticized and it is not commonly used nowadays (Saenger, 2002). This classification is supported by MCP data due to a greater IVI in *Rhizophora* spp. than in other species regardless of the basin (Figure 2 (Supplementary file, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/780/3362>, Figure 3). Actually, 75% of the sampling plots scored an IVI >100 in *Rhizophora* and could be classified as mixed-species forests while selected plots with an IVI >200 could be classified as monodominant (*sensu* Peh, *et al.*, 2011, where a single species contributes >50% of abundance). *Avicennia germinans* was the second most important species, followed by *L. racemosa* and *P. rhizophorae*. Such dominance by *Rhizophora* spp. is linked

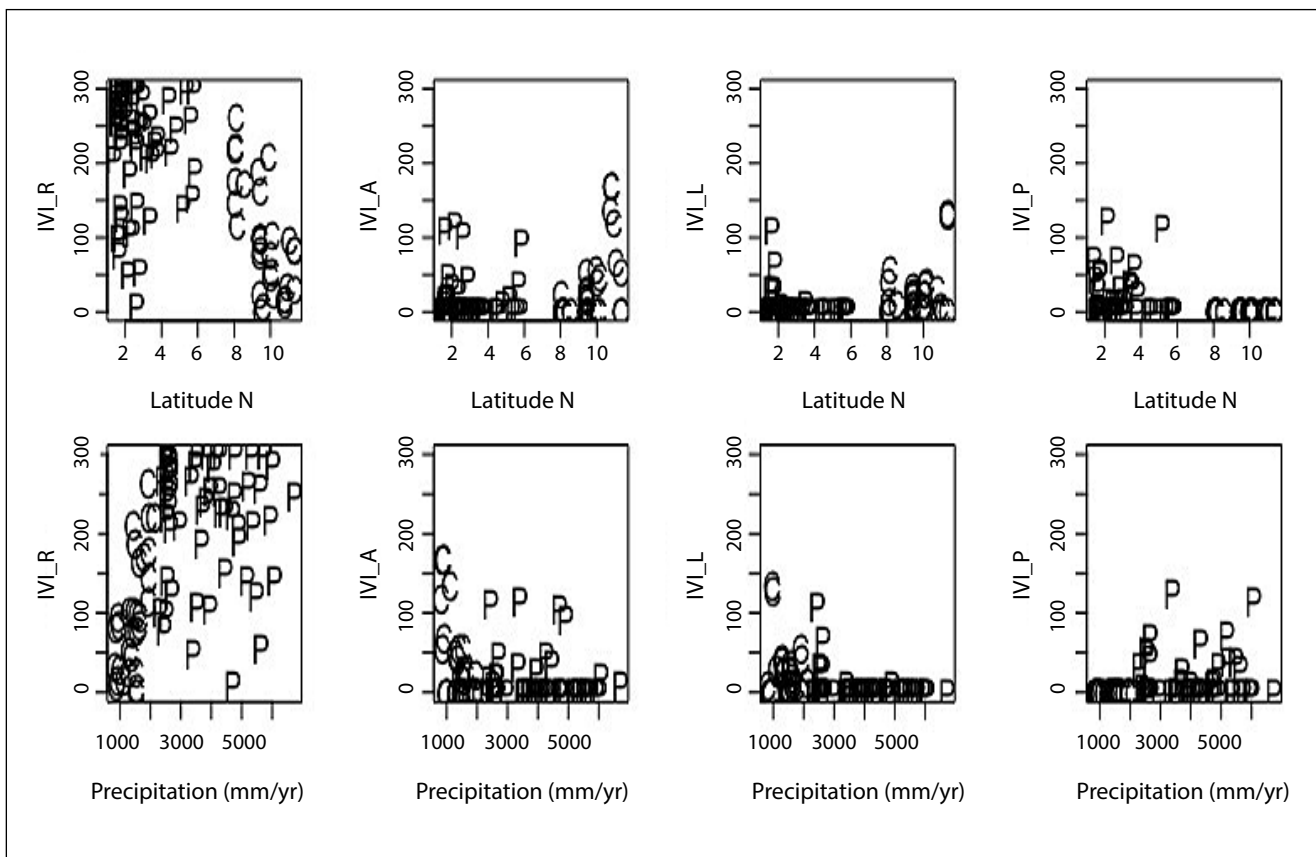


Figure 2. Geographical variation of the Importance Value Index (IVI) for *Rhizophora* (R), *Avicennia* (A), *Laguncularia* (L) and *Pelliciera* (P) relative to latitude (Lat) and total annual rainfall (Bio12 extracted from WorldClim). Basins are shown with point characters: C: Caribbean, P: Pacific. Plotting example using R statistical software

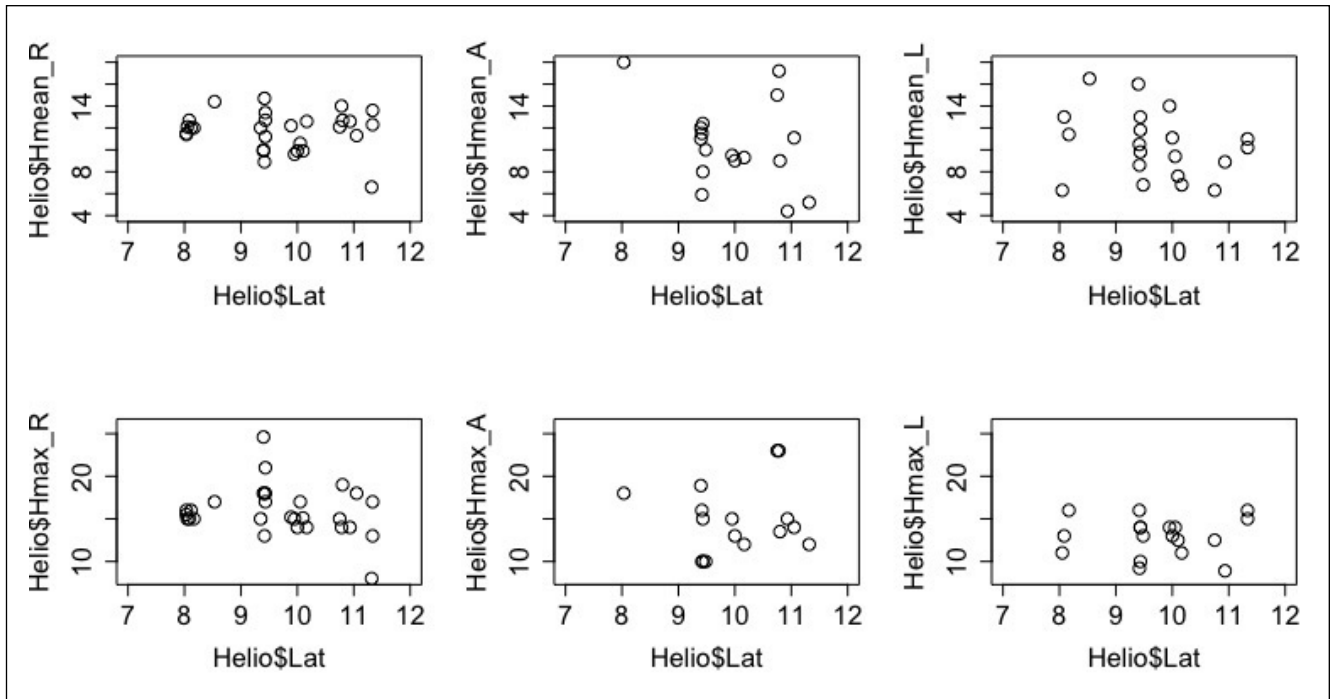


Figure 3. Mean (Hmean) and maximum (Hmax) tree height per mangrove stand relative to latitude (Lat) along the Caribbean coast. “Helio” stands for the name of the database.

to its greatest density and high mean DBH. The importance of *A. germinans* is related to the high diameter, exceeding that of *Rhizophora* in some locations.

According to the IVI, there are marked differences both floristically and structurally between the Pacific and Caribbean coasts (Figure 2). When data were separated between the Pacific and the Caribbean locations, there was a clear shift in IVI with *Rhizophora* being more important in the former and *A. germinans* in the latter (Supplementary file, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/downloadSuppFile/780/3362> and Figure 4). The IVI of *L. racemosa* was greater in the Caribbean than in the Pacific while for *P. rhizophorae* the pattern was the opposite. Moreover, along the mainland Caribbean coast, there is a well-defined gradient in a northeastern direction: while the IVI of *A. germinans* (black mangrove) increased, the IVI of *R. mangle* decreased. When the IVI was plotted against gridded-precipitation-data extracted from WorldClim (Hijmans, *et al.*, 2005, Fick & Hijmans, 2017) (Figure 2), the resulting patterns agreed with those reported in the literature based in summaries from geographically dispersed and independent studies conducted with different methods (Urrego, 2018). Consistent with an increase in aridity towards the Guajira Peninsula in limits of the Gulf of Venezuela, black mangrove stands were usually of low stature in the northernmost area (precipitation < 500 mm/year) while red mangrove stands were taller in the southernmost area, i.e., the Gulf of Urabá in the proximity to the Isthmus of Panamá dominated by a semi-humid

(seasonally wet) climate (2,500 mm/year) (See H_{mean} and H_{max} in Figure 3). The white mangrove *L. racemosa* did not show a clear geographic pattern. *Pelliciera rhizophorae* (Piñuelo mangrove) exhibited a discontinuous distribution of small populations in the southern part of the Caribbean (Bolívar, Córdoba, and Antioquia). It was proposed that populations of this species went extinct in many locations of the Southern Caribbean after the closure of the Isthmus of Panamá as a consequence of the intolerance to high salinity conditions (Blanco-Libreros, *et al.*, 2016, and references therein). Nowadays, remnant populations are present in the major river deltas: Canal del Dique, Sinú River, and Atrato River. Finally, although not included in HELIO_SP.CO v.1 due to the geographical isolation, the San Andrés and Providence Archipelago, a maritime territory close to the coast of Nicaragua (Central America), is known for the presence of highly productive (*ca.* 15 Mg/ha/yr), mixed-species stands seemingly supported by freshwater underground runoff reaching the coastal plain depressions under the karstic basement (García-Hansen, *et al.*, 2002; Sánchez-Núñez & Mancera-Pineda, 2011).

Along the Pacific Coast, extending perfectly on the latitudinal axis (South-North), mangrove species also showed a marked geographic pattern, which was more related with geomorphology than with climate (Figure 2: but notice the lack of sampling points in areas further north in the Pacific and in the Darién-Chocó region where areas with small mangroves have been reported). All species showed sharp changes in the IVI relative to Cabo

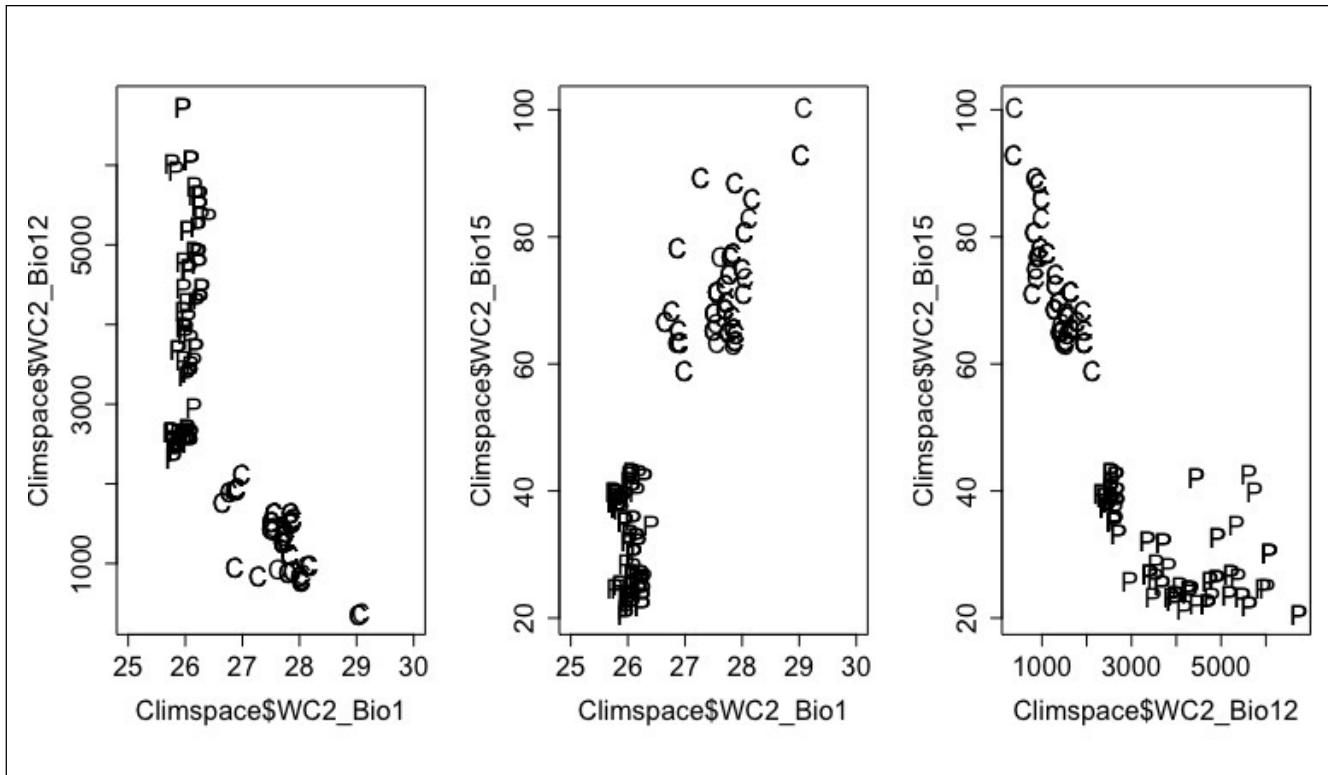


Figure 4. Climate space of mangroves in Colombian coasts (C: Caribbean; P: Pacific) using selected variables extracted from WorldClim2: Bio1 = annual mean temperature (Celsius degrees), Bio12 = annual precipitation (mm), Bio15 = precipitation seasonality (coefficient of variation)

Corrientes, a major basalt salient located at the Central part of the Pacific coast, marking the southern limit of Serranía del Baudó, a volcanic coastal relief extending to the North in the limit with Panama. It emerged nearly 3 million years before present as a consequence of the rise of the Isthmus of Panamá (O’Dea, *et al.*, 2016). Therefore, the coastal plain where mangroves develop extends less than 1-5 km to the North of Cabo Corrientes, but it broadens 10 km to the South. Moreover, freshwater runoff occurs as small streams springing from altitudes 100 to 500 m a.s.l. reaching the ocean within a few kilometers (<5-10 km). On the narrow coastal platforms north from Cabo Corrientes, *P. rhizophorae* reached the greatest IVI forming monospecific stands in the embayments receiving the largest freshwater discharge. This species is found to the south of Cabo Corrientes with a lower IVI, usually occurring together in mixed stands with other species, although small monospecific stands were also found (Pinto-Nolla, 1999; Estero Aguadulce, Buenaventura Bay, JFBL personal observations). To the north of Cabo Corrientes, the black mangrove (*A. germinans*) exhibited a very low IVI, but it increased to the south. This species was commonly found in mixed stands, but formed monospecific stands in the channels behind barrier islands located on the front of the deltaic fans of the major southern Pacific rivers. The red mangrove *Rhizophora* spp. exhibited the largest IVI along the Pacific coast, but differences were evident relative

to Cabo Corrientes. In the northern coast, it was lower because the species was found as a narrow (low stature) fringe surrounding *P. rhizophorae* stands. On the contrary, in the southern coast, *Rhizophora* spp. was found forming extensive, monospecific or mixed species forests covering the deltaic islands of major rivers. They were also found upstream as riverine mangroves or as fringe mangroves surrounded by rocky cliffs in major embayments favored in both cases by the meso- to macro-tidal regime. It is discussed that the tallest and most extensive red mangrove stands are found in the Mira River, close to the border with Ecuador. The white mangrove *L. racemosa* did not show a geographic pattern similarly as in the Caribbean.

The WorldClim2 data (Fick & Hijmans, 2017) extracted for MCP locations (see Dataset 2 in HELIO_SP.CO v.1) depict the interesting climatic framework for mangrove species occurrence and development (Figure 4). They also provided a more continuous figure of the north-south, east-west, arid to super-humid climatic gradient along the Colombian coast than that offered by the limited coverage of the *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales* (IDEAM) climatic stations because other sources were also employed. Using bi-dimensional climatic spaces (“Climspace” in Figure 4) which combine Bio1 (mean annual temperature), Bio12 (total annual pre-cipitation), and Bio15 (precipitation seasonality), it was clear that there are differences between

the coasts, but also that gradients within each of them vary depending on the variable. Total precipitation is correlated with the mean annual temperature at a national scale, but more markedly along the Caribbean. It is also correlated with precipitation seasonality. Along the Pacific, there is variability in both rainfall descriptors, but not in mean annual temperature. Therefore, such patterns are the template to study the effects of the current climate on mangrove species distribution, individual ecophysiology, population dynamics, community assembly, and ecosystem function. It is also an opportunity to explore region-dependent consequences of future climate changes in terms of precipitation magnitude and variability and of temperature. As an example, we illustrate here current and pre-2001 climatic spaces for mangroves species using HELIO_SP.CO v.1 (Figure 5). *Rhizophora* spp. was broadly reported, particularly along the Pacific, but it did not occur above 28,5 °C in the Caribbean. The occurrence of *A. germinans* was less frequent across the climatic space, but it was not limited by temperature, which suggests the interplay of site-specific variables such as sediments, geomorphology, and biotic interactions, among others. A similar pattern was observed in *L. racemosa* that scored a lower number of occurrences, but dispersed within the whole breadth of the climatic space suggesting the importance of other drivers. Considering the occurrence of trees with a DBH >15 cm, *P. rhizophorae* was not present in the Caribbean, which points to gaps in the completeness of the database and the scarcity of populations along this coast, as discussed previously, and is consistent with historical biogeographic drivers. Nonetheless, its occurrence along a wide spectrum of annual rainfall across the Pacific suggests the interactions

with other local factors. Although an in-depth explanation of these patterns is beyond the scope of this paper, the lack of correlation between climatic variables and occurrences of *Avicennia* and *Laguncularia* could be explained either by a greater importance of local scale drivers (e.g., geomorphic settings, anthropogenic disturbance regime) or by an actually lower limitation of climate variables within the geographical extent in Colombia. On the contrary, *Rhizophora* spp. seems to be the only species affected by aridity in the northern Caribbean coast. At hemispheric and global scales, species occurrences are clearly correlated with climatic variables, particularly at their limits of distribution (Rivera-Monroy, *et al.*, 2017).

Interesting patterns would surely emerge at national and regional scales when considering other variables such as density, DBH, and height so we expect that the MCP database, partially available in HELIO_SP.CO v.1 would be a useful resource for biogeographical and macroecological analyses when combined with climatic, geologic and land-use databases (see the example for Colombian terrestrial forests in Álvarez-Dávila, *et al.*, 2017). It is an urgent need to incorporate the use of open databases for Colombian mangroves because those for terrestrial forests such as ForestGeo (Anderson-Teixeira, *et al.*, 2015) and a wide range of taxonomic groups such as BioTime (Dornelas, *et al.*, 2018) are proving to be instrumental to understand the ecological consequences of climate change and other anthropogenic drivers. Under the current environmental change trends in Colombia, it is important to update the national mangrove inventory and establish long-term monitoring programs in specific sites.

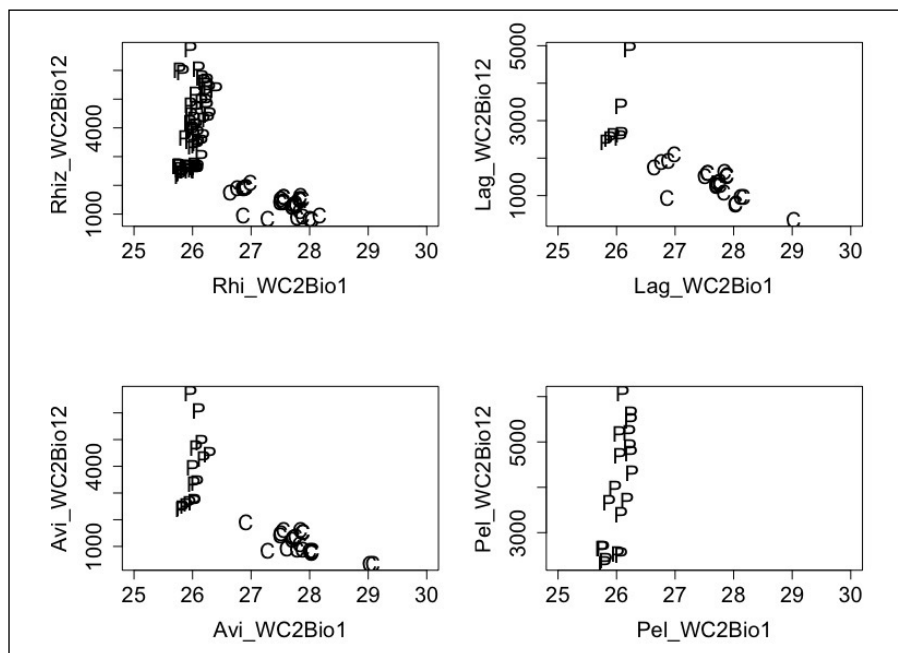


Figure 5. Biplots of WC2Bio1 (annual mean temperature, Celsius degrees) and WC2Bio12 (annual precipitation, mm) indicating occurrences of each mangrove species in Colombian coasts (C: Caribbean; P: Pacific)

Progress in research and management, 1997-2017

A bibliography of mangrove information was compiled and published for the first time in 1997 as part of the MCP (Álvarez-León, 1997) and the compilation was continued after 1997 in order to assess the progress. Additionally, a high number of papers in national and international journals and various books, unpublished reports, undergraduate and post-graduate theses were included. However, only a fraction of these reports, which provide useful historical background, have been published in national and international journals. At a quick glance, it is easy to note the increasing number of mangrove studies in Colombia: 119 in 1984 a, 160 in 1984 b, 438 in 1992, 1,114 in 1997, and 1,226 in 2016 (Álvarez-León, 1984a, 1984b, 1992, 1997, 2016) mainly on biodiversity assessments, fisheries, land-use conflicts, and climate change. Álvarez-León (2003) also summarized the advances in restoration and management. More recently, the legal framework and other aspects of mangrove management have also been summarized (García & Polanía-Vorenberg, 2007; Uribe-Pérez & Urrego-Giraldo, 2009; Sierra-Correa & Cantera-Kintz, 2015; Álvarez-León & Álvarez-Puerto, 2016). The largest mangrove areas in the Colombian continental Caribbean region are found in Ciénaga Grande de Santa Marta (Rivera-Monroy, *et al.*, 2006), Cispatá Bay (Agudelo, *et al.*, 2015), and the Gulf of Urabá (Blanco-Libreros, *et al.*, 2012, Urrego, *et al.*, 2014), which continue to be preferred sites for research projects. In the Pacific coast, Málaga Bay (partially protected as part of the Uramba National Natural Park and the *Distrito de Manejo Integrado La Plata*) has been a place of recent advances in mangrove science (Castellano-Galindo, *et al.*, 2013; Riascos, *et al.*, 2018). Finally, despite its isolation from the Colombian mainland and its distinctive mangrove ecology drivers, San Andrés Island continues to be an active research site (Sierra-Rozo, *et al.*, 2009; Polanía-Vorenberg, *et al.*, 2015). Further updates of mangrove research performed across the country by the *Universidad Nacional de Colombia* can be found in Polanía-Vorenberg, *et al.* (2015).

Regarding mangrove management, zoning was definitively established as the main tool for all coastal Colombian departments (Ministry of the Environment Resolutions No. 1602, December 21st, 1995; No. 0020, January 9th, 1996; No. 0257, March 26th, 1997, No. 0924, October 16th, 1997; 0233, March 29th, 1999) (Álvarez-León & Álvarez-Puerto, 2016). Since 2001 all department-level environmental agencies were urged to provide a fine scale zoning. Such zoning updated the mangrove area in Colombia to 285,050 ha in 2011 (Caribbean: 90,170 ha; Pacific: 194,880 ha) (<http://www.minambiente.gov.co>) (INVEMAR, 2014). A decade later, many of the initial zonings have been modified to some extent to solve land-use conflicts, to lease port activities and other coastal infrastructure developments, and to declare coastal protected areas. The zoning in the Department of Antioquia was the first to be updated supported by a new

methodology based on GIS advances (Ministry of the Environment and Sustainable Development Resolution 005, January 2017). This methodology was recently included as part of the standards for the mandatory update of mangrove zoning nation-wide (Resolution 1263, July 2018). The *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "Benito Vives de Andreis"* (INVEMAR), the Colombian advisory research institution for marine and coastal ecosystems, recently launched two new online platforms for managing mangroves: The Colombian geographic information system for mangroves (*Sistema de Información para la Gestión de los Manglares en Colombia* – SIGMA, <http://sigma.invemar.org.co>) and the tool for monitoring and surveillance of mangroves (EGRETA, <http://cinto.invemar.org.co/egreta>). In this sense, it would be useful to integrate HELIO_SP.CO v.1 to such platforms.

Major challenges ahead

Both coasts in Colombia are facing challenges related with climate change and socioeconomic development. First, mangroves are threatened by sea-level rise (Blanco-Libreros, 2016, and references therein). This issue is especially severe in the Caribbean coast where various major cities such as Cartagena and the surrounding mangroves are being flooded due to sea-level rise in interaction with storm surges and coastal infrastructure (Andrade-Amaya, *et al.*, 2017). In addition, there are various erosion hotspots threatening both coastal infrastructure and mangroves, for example, in portions of Córdoba and Antioquia (Correa & Vernet, 2004; Blanco-Libreros, 2016). In the Pacific coast, the southern part in the proximity to the border with Ecuador is threatened by relative sea-level rise induced by local and regional subsidence of the coast (López, *et al.*, 2008). In addition, there are land-use conflicts particularly along the Caribbean region and in general in the proximity to major port cities nation-wide. For instance, the ecological monitoring of land-use changes along the coast of Turbo (Antioquia), located in the southwestern end of the Caribbean coast, has provided the evidence of changes in ecosystem integrity from population to landscape variables as the consequence of cumulative anthropogenic disturbances such as illegal logging and clearing, conversion to pasturelands, and the placement of infrastructure such as powerlines in interaction with natural disturbances such as coastal erosion and sedimentation (Figure 6) (Blanco-Libreros, *et al.*, 2013; Blanco-Libreros & Estrada-Urrea, 2015; Blanco-Libreros, 2016). Such processes have induced change rates ranging between -1,2 and 0,8 %/year (Blanco-Libreros & Estrada-Urrea, 2015; Blanco-Libreros, 2016).

In this context, the inclusion of the MCP databases in decision-making processes will be useful for regional planning and adaptation to climate change. This has become an urgent task particularly in the Pacific coast after the peace agreement with FARC was signed in 2016, as it designated areas for agricultural-based development programs

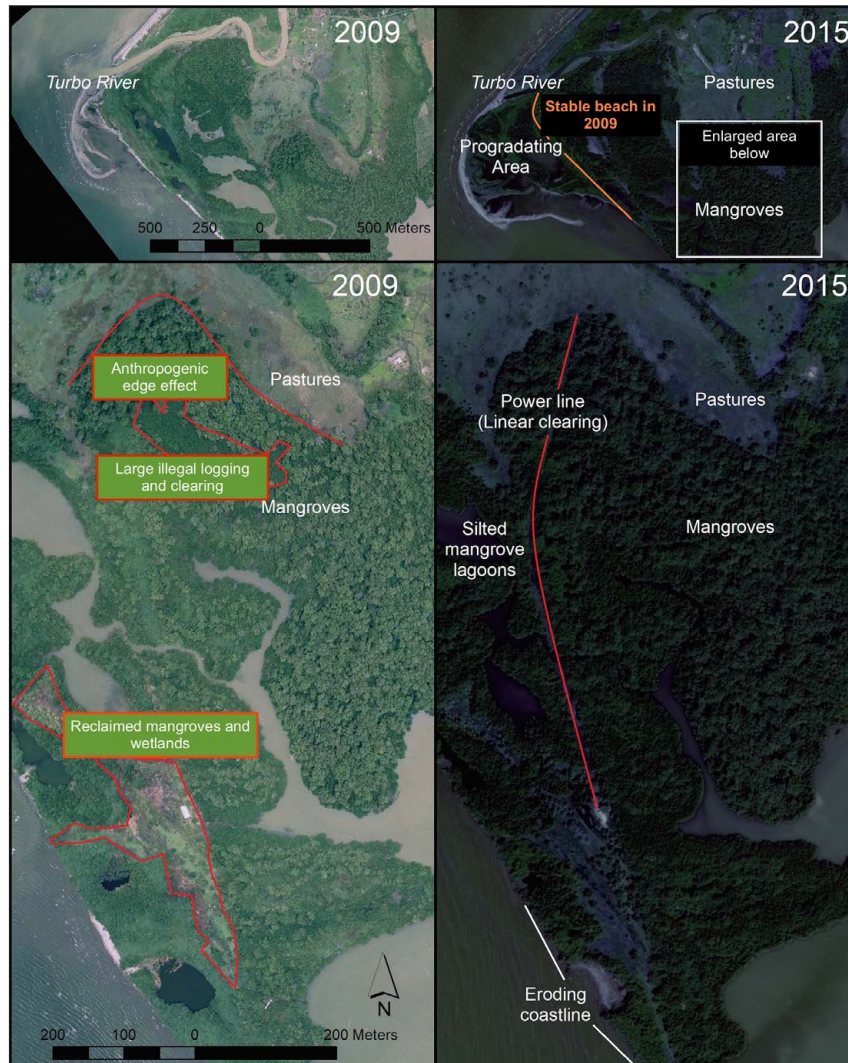


Figure 6. Cumulative anthropogenic and natural disturbances in El Uno Bay (Turbo, Antioquia), a coastal lagoon in the Southwestern Caribbean. See sharp pasture-to-mangrove edges and clearings in 2009, indicating an anthropogenic landscape. Note cumulative changes in 2015: Areas of progradation and erosion and installment of a power line producing permanent linear clearing. 2009: Orthophotographic mosaic (resolution: 30 cm). 2015: Worldwiew satellite image (resolution: 1 m).

in several rural areas near the coast or upstream to major deltas and mangrove areas (in Nariño: Tumaco, Francisco Pizarro, Mosquera, La Tola, as well as others in Cauca and Valle del Cauca) (**Agencia para la Renovación del Territorio - ART, 2017**), which would entail a change in the socioeconomic scenario. Extensive parts of the Pacific coastal landscape have seemingly experienced low rates of deforestation or even reached a steady coexistence state of agricultural cover and native forests (**López-Angarita, et al., 2018, Mejía-Rentería, et al., 2018**). In contrast, despite the peace treaty, oil spills from bombings by remnant dissident groups may continue to affect mangroves in the Tumaco Bay and deforestation might advance into areas formerly dominated by FARC as has been already documented for upland forests and protected natural areas (**Baptiste, et al., 2017, Salazar, et al., 2018, Armenteras,**

et al., 2018). In the Caribbean coast, the extensive mangrove area in the Urabá region in Antioquia would be affected by the socioeconomic changes expected in the post-conflict period associated with both the designation of territory-centered development plans (*Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial, PDET*) (**ART, 2017**) and the operation of international ports (Puerto Antioquia in Bahía Colombia, Turbo, http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/resoluciones/2012/res_0032_250112.PDF). Therefore, it is necessary to have a baseline of the state of mangroves and other coastal wetlands and to build a monitoring network similar to the one proposed for terrestrial forests (**Sierra, et al., 2017, Salazar, et al., 2018**). Such baseline may be drawn by using open, department- and nation-wide data (such as those included in HELIO_SP.CO v.1) and other initiatives involving more MCP data. The network of sampling plots

deployed during the MCP could be also used either as the blueprint for defining future monitoring networks or as control points for remotely sensed inventories given that field data and allometric equations would be readily available for validation (Simard, *et al.*, 2008). In addition, this network would be also helpful in designating field sites for nationwide mangrove zone updating and to estimate deforestation rates or stand growth (Ministry of the Environment, Resolution 1263, July 2018).

Finally, by committing to achieve the Aichi Convention Conservation Targets, the Colombian Government has promised to increase the protected natural areas in both extent and number. Accordingly, two new protected areas recently declared under a co-management scheme included extensive mangrove areas: the regional district of integrated management in Bajo Baudó (Chocó) and the national one in Cabo Corrientes (Nariño). Additional conservation areas could be declared using co-management schemes, particularly in carbon-rich mangroves (blue carbon) and areas providing a variety of ecosystem services to coastal livelihoods. For instance, the growing volume of research in Cispatá Bay (Córdoba) and the Atrato River delta (Antioquia) has resulted in identifying such blue carbon-based opportunities for conservation and socioeconomic development of fishing communities (Blanco-Liberos, *et al.*, 2015; Yepes, *et al.*, 2016; Bolívar, *et al.*, 2018). The major long-term large-scale monitoring program on mangroves in Colombia, located in Ciénaga Grande de Santa Marta, has proven the importance of using big datasets for addressing management-oriented questions (e.g., climate warming and water-use change) (Rodríguez-Rodríguez, *et al.*, 2016; Jaramillo, *et al.*, 2018). Surely, solving other challenges, yet to be identified by scientists, resource managers, and urban and regional planners, would benefit from using open datasets.

Conclusion

The major national mangrove inventory undertaken in Colombia to date (MCP) has made important contributions in terms of technical reports, management policy guidelines, and preliminary zoning of mangrove areas nation-wide. Moreover, it has promoted the update of mangrove inventories and the zoning at the department level and it has also stimulated research programs in particular geographic areas (e.g., in Cispatá and Urabá). Equally important, the MCP produced large datasets that have served for specific purposes, which should be appreciated, reviewed, and used to advance in mangrove science and management in the coming years. In the present study, we resorted to the HELIO_SP.CO v.1 database for information on stand-level variables for more than 100 sites along Colombia's mainland coasts collected between 1995 and 1996 clearly describing climate-related latitudinal gradients in species IVI and height. We expect that this database may be instrumental for addressing macroecological and biogeographical questions and hypotheses. In combination with other open datasets,

the HELIO_SP.CO v.1 might also be useful for addressing applied questions and for supporting decision-making processes related to mangrove conservation and planning in the coastal zone under the country's new climatic and political scenarios. It is also expected that HELIO_SP.CO v.1 and future outgrowths would help to face the challenges and opportunities for Colombia as part of global mangrove conservation efforts. We also suggest that other datasets generated by researchers since 2000 would be made available to the scientific community. Together with the baseline provided by the MCP, such datasets could help to render an updated view of mangrove trends and conservation in Colombia and to identify target areas for establishing monitoring programs.

Supplementary information

See Supplementary Material in: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSupFile/780/3362>

Acknowledgments

To Heliodoro Sánchez-Páez and the many participants in the different stages of the MCP for collecting, entering and processing these valuable datasets. JFB acknowledges funding for different projects over the years to support data entry, validation of the MCP data, and to gather evidences of natural and anthropogenic changes in the Gulf of Urabá mangroves (Antioquia). We also thank the *Universidad de Antioquia* research committee (CODI) for funding satellite imagery and verification of recent dynamics in Turbo (Antioquia) in the context of the projects “*Estrategia de Sostenibilidad para el grupo ELICE*” and “*Fragmentación del manglar por la instalación de un tendido eléctrico: evidencias desde la evaluación de un manglar sub-urbano (bahía El Uno, Turbo)*”. The authors greatly appreciate the comments provided by the two anonymous reviewers that helped to improve the manuscript.

Conflicts of interest

None.

Author's contributions

Both authors conceived the manuscript. JFBL wrote an initial manuscript and obtained input and final approval from RAL. JFBL led data entry, curation and assembly of the final database. RAL provided the historical background and additional data from grey literature related to the project “Mangroves of Colombia”.

References

- Agencia para la Renovación del Territorio (ART). (2017). Mapa del Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial

- (PDET). Accessed on: 28 de noviembre, 2018. Available at: http://www.renovacionterritorio.gov.co/especiales/especial_PDET/mapa.html
- Agudelo, C.M., Bolívar, J., Polanía-Vorenberg, J.H., Urrego-Giraldo, L.E., Yepes, A., Sierra, A.** (2015). Estructura y composición florística de los manglares de la Bahía de Cispatá, Caribe colombiano. *Rev. Biol. Trop.* **63**: 1137-1147.
- Álvarez-Dávila, E., Cayuela, L., González-Caro, S., Aldana, A.M., Stevenson, P.R., Phillips, O., et al.** (2017). Forest biomass density across large climate gradients in northern South America is related to water availability but not with temperature. *PLoS ONE*. **12**: e0171072. Doi: 10.1371/journal.pone.0171072
- Álvarez-León, R.** (1984a). Sinopsis sobre el conocimiento de los ecosistemas de manglar en Colombia. (Primera revisión). In: Álvarez-León, R. (coordinador) Reunión Técnica para el Diseño de un Proyecto Especial sobre Bioecología del Manglar OEA / COLCIENCIAS / INVEMAR, Santa Marta (Mag.) Colombia, junio 27-29 de 1984, p.1-17.
- Álvarez-León, R.** (1984b). Sinopsis sobre el conocimiento de los ecosistemas de manglar en Colombia. (Segunda revisión). In: Yanine-Díaz, D. (editor) Mem. Sem. Reg. Ordenación Integrada de las Zonas de Manglar FAO / INDERENA, Cali (Valle) -Tumaco (Nar.) Colombia, noviembre 19-23 de 1984, p.1-31.
- Álvarez-León, R.** (1992). Sinopsis sobre el conocimiento de los ecosistemas de manglar en Colombia. (Tercera revisión). In: Lacerda, L.D. (coordinador) Mem. Workshop on Conservation and Sustainable Utilization of the Mangrove Forest in Latin America and Africa Regions ITTO / ISME / UFF, Niteroi (R.J.) Brazil, mayo 28-30 de 1984, p.1-51.
- Álvarez-León, R.** (1993). Mangrove ecosystems in Colombia. In: L. D. Lacerda (editor). Conservation and Sustainable Utilization of Mangrove Forest in Latin America and Africa Regions, ITTO / ISME Project PD 114/90 (F). ISME-Tech. Reports (2), p. 75-113.
- Álvarez-León, R.** (1997). Bibliografía sobre los ecosistemas de manglar en Colombia. (Cuarta revisión). In: Álvarez-León, R. & Páez-Parra, F.E. (editores.) *Proy. PD 171 / 91 Rev. (F) Fase 1 Conservación y Manejo para el Uso Múltiple y el Desarrollo de los Manglares en Colombia, MMA/OIMT.* Santa Fe de Bogotá D. C. Inf. Técnico, 9: 112 p. + 5 anexos, 2 mapas.
- Álvarez-León, R.** (2003). Los manglares de Colombia y la recuperación de sus áreas degradadas: revisión bibliográfica y nuevas experiencias. *Rev. Madera y Bosques.* **9**: 3-25.
- Álvarez-León, R.** (2016). Sinopsis de las investigaciones realizadas en los ecosistemas de manglar de Colombia, entre 1997 y 2016. II Seminario-Taller Internacional de Estuarios & Manglares: “Fuentes de desarrollo humano en las zonas costeras e insulares. Herramientas para su estudio & manejo”. Universidad del Valle. Cali (Valle) Colombia, Marzo 24 al 26 de 2015.
- Álvarez-León, R. & Polanía-Vorenberg, J.H.** (1994). Manglares, lagunas costeras y estuarios del Caribe colombiano. In: J.J. Escobar-Ramírez & J.R. Cantera-Kintz (editors). *Memorias. Taller de Expertos sobre el Estado del Conocimiento y Lineamientos para una Estrategia Nacional de Biodiversidad en los Sistemas Marinos y Costeros, CCO / ENB / COLCIENCIAS.* Minca (Mag.) Colombia, agosto 3-5 de 1994. 311 p.
- Álvarez-León, R. & Polanía-Vorenberg, J.H.** (1996). Los manglares del Caribe colombiano: síntesis de su conocimiento. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **20**: 447-464.
- Álvarez-León, R. & García-Hansen, I.** (2003). Biodiversity associated with mangrove in Colombia. *ISME / GLOMIS Electronic Journal.* **3**: 1-2.
- Álvarez-León, R. & Álvarez-Puerto, J.R.** (2016). Legislación colombiana relacionada con los ecosistemas de manglar. *UFC- Arq. Cien. Mar.* **49**: 115- 131.
- Anderson-Teixeira, K., Davies, S.J., Bennett, A.C., González-Akre, E.B., Muller-Landau, H.C., Wright, S.J., et al.** (2015). CTFS-ForestGEO: A worldwide network monitoring forests in an era of global change. *Glob. Change Biol.* **21**: 528-549.
- Andrade-Amaya, C.A., Ferrero-Ronquillo, A.J., León-Rincón, H., Mora-Páez, H., Carvajal-Perico, H.** (2017). Sobre cambios en la línea de costa entre 1735 y 2011 y la subsidencia en la bahía de Cartagena de Indias, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **41**: 94-106.
- Armenteras, D., Schneider, L., Dávalos, L.M.** (2018). Fires in protected areas reveal unforeseen costs of Colombian peace. *Nature Ecol. Evol. Nature Ecology & Evolution.* **3**: 20-23. Doi: 10.1038/s41559-018-0727-8
- Baptiste, B., Pinedo-Vásquez, M., Gutiérrez-Vélez, V.H., Andrade, G.I., Vieira, P., Estupiñán-Suárez, L.M., Londoño, M.C. Laurance, W., Ming-Lee, T.** (2017). Greening the peace in Colombia. *Nature Ecol. Evol.* **1**: 3. Doi: 10.1038/s41559-017-0102
- Blanco-Libreros, J.F.** (2016). Cambios globales en los manglares del golfo de Urabá (Colombia): entre la cambiante línea costera y la frontera agropecuaria en expansión. *Actual. Biol.*, **38**: 53-70.
- Blanco-Libreros, J.F., Estrada-Urrea, E.A., Ortiz-Acevedo, L., Urrego, L.E.** (2012). Ecosystem-wide impacts of deforestation in mangroves: The Urabá Gulf (Colombian Caribbean): Case study. *ISRN Ecology.* **2012**: 1-14.
- Blanco-Libreros, J.F., Tabora-Marín, A., Amortegui-Torres, V., Arroyave-Rincón, A., Sandoval, A., Estrada-Urrea, E.A. et al.** (2013). Deforestación y sedimentación en los manglares del golfo de Urabá: síntesis de los impactos sobre la fauna macrobéntica e íctica en el delta del río Turbo. *Gestión y Ambiente.* **16**: 19-36.
- Blanco-Libreros, J.F. & Estrada-Urrea, E.A.** (2015). Mangroves on the edge: Anthrome-dependent fragmentation influences ecological condition (Turbo, Colombia, Southern Caribbean). *Diversity.* **7**: 206-228.
- Blanco-Libreros, J.F., Ortiz-Acevedo, L.F., Urrego, L.E.** (2015). Reservorios de biomasa aérea y de carbono en manglares del Golfo de Urabá (Caribe Colombiano). *Actual. Biol.* **37**: 131-141.
- Blanco-Libreros, J.F., Estrada-Urrea, E.A., Pérez-Montalvo, R., Tabora-Marín, A., Álvarez-León, R.** (2016). Influencia antrópica en el paisaje de las poblaciones de *Pelliciera rhizophorae* (Ericales: Tetrameristaceae) más sureñas del Caribe (Turbo, Colombia). *Rev. Biol. Trop.* **64**: 79-94.
- Bolívar, J.M., Gutiérrez-Vélez, V.H., Sierra, C.A.** (2018). Carbon stocks in aboveground biomass for Colombian mangroves with associated uncertainties. *Reg. Stud. Mar. Sci.* **18**: 145-155.
- Castellanos-Galindo, G.A. & Krumme, U.** (2013). Tidal, diel and seasonal effects on intertidal mangrove fish in a high-rainfall area of the Tropical Eastern Pacific. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **494**: 249-265.

- Castellanos-Galindo, G.A., Cantera, J.R., Saint-Paul, U., Ferrol-Schulte, D.** (2015). Threats to mangrove social-ecological systems in the most luxuriant coastal forests of the Neotropics. *Biodivers. Conserv.* **24**: 701-704. Doi: 10.1007/s10531-014-0827-y
- Castillo-Cárdenas, M.F., Ramírez-Silva, J., Sanjur, O.I., Toro-Perea, N.** (2015). Evidence of incipient speciation in the Neotropical mangrove *Pelliciera rhizophorae* (Tetrameristaceae) as revealed by molecular, morphological, physiological and climatic characteristics. *Bot. J. Linn. Soc.* **179**: 499-510.
- Correa, I.D.N & Vernette, G.** (2004). Introducción al problema de la erosión litoral de Urabá (sector Arboletes-Turbo) costa Caribe colombiana. *Bol. Invest. Mar. Cost.* **33**: 7-28.
- Dornelas, M., Antão, L.H., Faye Moyes, F., Amanda E. Bates, A.E., Anne E. Magurran, A.E., Adam, D., Asem A., Akhmetzhanova, A.A., et al.** (2018). BioTIME: A database of biodiversity time series for the Anthropocene. *Global Ecol. Biogeogr.* **27**: 760-786.
- Estrada-Urrea, E. A., Blanco-Libreros, J.F., Álvarez-León, R.** (2010). Patrones estructurales de los manglares en el golfo de Urabá y su relación bio-geográfica con el Caribe y Pacífico de Colombia. pp. 169-174. In: INVEMAR-ACIMAR (eds.) Libro de resúmenes extendidos XIV Seminario Nacional de Ciencias y Tecnología del Mar (SENALMAR). Serie de Publicaciones Especiales INVEMAR No. 21. Santa Marta (Mag.) Colombia.
- Fick S.E. & Hijmans R.J.** (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Internat. J. Clim.* **37**: 4302-4315.
- García, C. & Polanía-Vorenberg, J.H.** (2007). Marco conceptual para productos no maderables del bosque en manglares de Colombia. *Gestión y Ambiente.* **10**: 169-178.
- García-Hansen, I., Gaviria-Chiquazuque, J., Prada-Triana, M.C., Álvarez-León, R.** (2002). Producción de hojarasca de los manglares de la Isla de San Andrés, Caribe colombiano. *Rev. Biol. Trop.* **50**: 273-291.
- Guevara-Mancera, O.A.** (1998). Manual para la restauración de los bosques de manglar en áreas degradadas del Pacífico colombiano. Ministerio del Medio Ambiente de Colombia, Asociación Colombiana de Reforestadores, Organización Internacional de Maderas Tropicales. Proyecto PD. 171/91 Rev. 2 (F) Fase II (Etapa I). Santa Fé de Bogotá. 16 p.
- Hamilton, S. & Friess, D.A.** (2018). Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012. *Nature Clim. Change.* **8**: 240-244.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A.** (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Internat. J. Clim.* **25**: 1965-1978.
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR.** (2014). Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia: Año: 2013. Serie de Publicaciones Periódicas No. 3. Santa Marta. 192 p.
- Jaramillo, F., Licero, L., Ahlen, I., Manzoni, S., Rodríguez-Rodríguez, J.A., Guittard, A., et al.** (2018). Effects of hydroclimatic change and rehabilitation activities on salinity and mangroves in the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Wetlands.* **38**: 755-767.
- López, S.A., Mora-Páez, H. Monroy, C.A., Restrepo, J.D., Restrepo, J. C., Rodríguez-Rubio, E.** (2008). Nivel relativo del mar en la costa pacífica sur de Colombia: variabilidad, tendencias e implicaciones en la dinámica deltaica. *Bol. Geol.* **42**: 53-66.
- López-Angarita, J., Tilley, A., Hawkins, J.P., Pedraza, C., Roberts, C.M.** (2018). Land use patterns and influences of protected areas on mangroves of the Eastern tropical Pacific. *Biol. Conserv.* **227**: 82-91.
- Mejía-Rentería, J.C., Castellanos-Galindo, G., Cantera-Kintz, J.R., Hamilton, S.E.** (2017). A comparison of Colombian Pacific mangrove extent estimations: Implications for the conservation of a unique Neotropical tidal forest. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **212**: 233-240.
- O'Dea, A. Lessios, H. A., Coates, A.G., Eytan, R.I., Restrepo-Moreno, S.A., Cione, A.L., et al.** (2016). Formation of the Isthmus of Panama. *Sci. Adv.* **2**: e1600883. Doi: 10.1126/sciadv.1600883
- Osland, M., Gabler, C.A., James, B. Grace, J.B., Day, R.H., Meagan L., McCoy, M.L., McLeod, J.L., et al.** (2018). Climate and plant controls on soil organic matter in coastal wetlands. *Glob. Change Biol.* **00**: 1-19. <https://doi.org/10.1111/gcb.14376>
- Peh, K.S.H., Lewis, S.L., Lloyd, J.** (2011). Mechanisms of monodominance in diverse tropical tree-dominated systems. *J. Ecol.* **99**: 891-898.
- Pinto-Nolla, F.H.** (1999). Sucesión y fisionomía de los manglares de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **23**: 141-161.
- Polanía-Vorenberg, J.H., Urrego-Giraldo, L.E., Agudelo-Palacio, C.M.** (2015). Recent advances in understanding Colombian mangroves. *Acta Oecol.* **63**: 82-90.
- Riascos, J.M., Cantera-Kitz, J.R., Blanco-Libreros, J.F.** (2018). Growth and mortality of mangrove seedlings in the wettest Neotropical mangrove forests during ENSO: Implications for vulnerability to climate change. *Aquat. Bot.* **147**: 34-42.
- Rivera-Monroy, V. H., Twilley, R.R., Mancera-Pineda, J.E., Alcántara-Eguren, A., Castañeda-Moya, E., Casas-Monroy, O., et al.** (2006). Aventuras y desventuras en Macondo: rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Rev. Ecotropicos.* **19**: 72-93.
- Rivera-Monroy, V.H.** (2017). Advancing mangrove macroecology. In: Rivera-Monroy V.H., Lee, S. Y., Kristensen, E., Twilley, R.R. (editors.) *Mangrove Ecosystems: A global biogeographic perspective.* Springer International Pub. AG. p: 347-380.
- Rodríguez-Rodríguez, J.A., Mancera-Pineda, J.E., Rodríguez, J.M.** (2016). Validation and application of an individual based restoration model for tree mangrove species in Ciénaga Grande de Santa Marta. *Caldasia.* **38**: 285-299.
- Saenger, P.** (2002). *Mangrove ecology, silviculture and conservation.* Springer Science, Dordrecht. 360 p.
- Sánchez-Núñez, D.A. & Mancera-Pineda, J.E.** (2011). Flowering patterns in three Neotropical mangrove species: evidence from a Caribbean island. *Aquat. Bot.* **94**: 177-182.
- Sánchez-Páez, H., Álvarez-León, R., Pinto-Nolla, F.H., Sánchez-Alfárez, A.S., Pino-Renjifo, J.C., García-Hansen, I., Acosta-Peñaloza, M.T.** (1997a). Diagnóstico y zonificación preliminar de los manglares del Caribe de Colombia. In: Sánchez-Páez, H. & Álvarez-León, R. (editors.) *Proy. PD 171 / 91 Rev. (F) Fase 1. Conservación y Manejo para el Uso Múltiple y el Desarrollo de los Manglares en Colombia, MMA/OIMT.* Santa Fe de Bogotá D. C. (Colombia). p: 1-511.

- Sánchez-Páez, H., Álvarez-León, R., Guevara-Mancera, O.A., Zamora-Guzmán, A., Rodríguez-Cruz, H., Bravo-Pazmiño, H.E.** (1997b). Diagnóstico y zonificación preliminar de los manglares del Pacífico de Colombia, *In: Sánchez-Páez, H. & Álvarez-León, R.* (eds.) *Proy. PD 171 / 91 Rev. (F) Fase 1. Conservación y Manejo para el Uso Múltiple y el Desarrollo de los Manglares en Colombia, MMA/OIMT. Santa Fe de Bogotá D. C. (Colombia)*, 343 p.
- Sánchez-Páez, H., Ulloa-Delgado, G.A., Álvarez-León, R.** (Editors) (1998a). *Conservación y uso sostenible de los manglares del Caribe Colombiano. Proy. PD 171 / 91 Rev. (F) Fase 1. Conservación y Manejo para el Uso Múltiple y el Desarrollo de los Manglares en Colombia, MMA / OIMT. Santa Fe de Bogotá D. C. (Colombia)*. 212 p.
- Sánchez-Páez, H., Guevara-Mancera, O. A., Álvarez-León, R.** (Editors) (1998b). *Conservación y uso sostenible de los manglares del Pacífico Colombiano. Proy. PD 171 / 91 Rev. (F) Fase 1. Conservación y Manejo para el Uso Múltiple y el Desarrollo de los Manglares en Colombia, MMA / OIMT. Santa Fe de Bogotá D. C. (Colombia)*. 178 p.
- Sánchez-Páez, H., Ulloa-Delgado, G.A., Álvarez-León, R.** (Editors) (2000). *Hacia la recuperación de los manglares del Caribe de Colombia. Proy. PD 171 / 91 Rev. 2 (F) Fase 2, Etapa 2. Conservación y Manejo para el Uso Múltiple y el Desarrollo de los Manglares en Colombia, MMA/OIMT. Santa Fe de Bogotá D. C. (Colombia)*. 294 p.
- Sánchez-Páez, H., Ulloa-Delgado, G.A., Tavera-Escobar, H.A.** (2004). Manejo integral de manglares por comunidades locales, Caribe de Colombia. Proyecto OD 60/01 REV.1 (F): "Manejo sostenible y restauración de los manglares por comunidades locales del Caribe Colombiano". Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial-CONIF-OIMT. Santa Fe de Bogotá D. C. 335 p.
- Sierra, C.A., Mahecha, M., Poveda, G., Álvarez-Dávila, E., Gutiérrez-Vélez, V.H., Reuf, B., et al.** (2017). Monitoring ecological change during rapid socio-economic and political transitions: Colombian ecosystems in the post-conflict era. *Environ. Sci. Pol.* **76**: 40-49.
- Salazar, A., Sánchez, A., Villegas, J.C., Salazar, J.F., Ruiz-Carrascal, D., Sitch, S., et al.** (2018). The ecology of peace: Preparing Colombia for new political and planetary climates. *Front. Ecol. Environ.* **16**: 1-7.
- Sierra-Correa, P.C. & Cantera-Kintz, J.R.** (2015). Ecosystem-based adaptation for improving coastal planning for sea-level rise: A systematic review for mangrove coasts. *Marine Policy.* **51**: 385-393.
- Sierra-Rozo, O., Mancera-Pineda, J.E., Santos-Martínez, A.** (2009). Velocidad de descomposición de la hojarasca en diferentes sustratos de manglar durante la época de lluvias en San Andrés isla, Caribe colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.* **38**: 59-84.
- Simard, M., Rivera-Monroy, V.H., Mancera-Pineda, J.E., Castañeda-Moya, E., Twilley, R.R.** (2008). A systematic method for 3D mapping of mangrove forests based on Shuttle Radar Topography Mission elevation data, ICESat/GLAS waveforms and field data: Application to Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Remote Sens. Environ.* **112**: 2131-2144.
- Simard, M., Fatoyinbo, L., Smetanks, C., Rivera-Monroy, V.H., Castañena-Moya, E., Thomas, N., Stocken, T.V.** (2019). Mangrove canopy height globally related to precipitation, temperature and cyclone frequency. *Nature Geoscience.* **12**: 40-45.
- Ulloa-Delgado, G.A., Rodríguez-Cruz, H., Gil-Torres, W., Pino-Rengifo, J.C.** (1998). Manual sobre técnicas de vivero y restauración de áreas de manglar del Caribe Colombiano. Ministerio del Medio Ambiente de Colombia, Asociación Colombiana de Reforestadores, Organización Internacional de Maderas Tropicales. Proyecto PD. 171/91 Rev. 2 (F) Fase II (Etapa I). Santa Fé de Bogotá. 24 p.
- Uribe-Pérez, J. & Urrego-Giraldo, L.E.** (2009). Gestión ambiental de los ecosistemas de manglar aproximación al caso colombiano. *Gestión y Ambiente.* **12**: 57-72
- Urrego, L.E.** (2018). Cananguchales y manglares: humedales forestales de las zonas bajas tropicales, tan semejantes como contrastantes. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **42**: 80-95.
- Urrego, L.E., Molina, E.C., Suárez, J.** (2014). Environmental and anthropogenic influences on the distribution, structure, and floristic composition of mangrove forests of the Gulf of Urabá (Colombian Caribbean). *Aquat. Bot.* **114**: 42-49.
- Yepes, A., Zapata, M., Bolívar, J., Monsalve, A., Espinosa, S.M., Sierra-Correa, P.C., Sierra, A.** (2016). Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the Caribbean mangroves in Colombia. *Rev. Biol. Trop.* **64**: 913-926.
- Zambrano-Escamilla, C.H. & Rubiano-Rubiano, D.J.** (1997a). Memoria de los mapas de los bosques de manglar de la costa Pacífica colombiana, 1969, 1996, y multi-temporal. Inf. Técnico 8. *In: Álvarez-León, R. & Páez-Parra, F.E.* (editors). PD 171/91 Rev. 2 (F) Fase I. *Conservación & Manejo para el Uso Múltiple y el Desarrollo de los Manglares de Colombia, MMA / OIMT / ACOFORE. Santa Fe de Bogotá D. C. (Colombia)*.
- Zambrano-Escamilla, C.H. & Rubiano-Rubiano, D.J.** (1997b). Memoria de los mapas de los bosques de manglar del Caribe colombiano: 1996. Inf. Técnico 11. *In: Álvarez-León, R. & Páez-Parra, F.E.* (editors). PD 171/91 Rev. 2 (F) Fase I. *Conservación & Manejo para el Uso Múltiple y el Desarrollo de los Manglares de Colombia, MMA/OIMT/ ACOFORE. Santa Fe de Bogotá D. C. (Colombia)*.

Aspectos ecológicos de la comunidad fitoperifítica en el río Anchique, cuenca andina colombiana

✉ Kelly Huertas-Farías*, ✉ Yessica Tatiana-Parra, ✉ Gladys Reinoso

Grupo de Investigación en Zoología – GIZ, Universidad del Tolima.

Resumen

El fitoperifiton contribuye significativamente a la dinámica de los ecosistemas, ya que oxigena el agua, aporta materia orgánica y proporciona abrigo y alimento a los organismos acuáticos. En ese contexto, el presente estudio se orientó a determinar su dinámica en el río Anchique, cuenca andina colombiana de gran relevancia. Los muestreos se hicieron en cuatro puntos localizados a lo largo del río en temporadas meteorológicas contrastantes mediante la metodología de raspados de superficie en dos sustratos naturales (roca y tronco). Se registró una densidad relativa de 5.070 organismos/cm² distribuidos en cinco divisiones, nueve clases y 59 géneros, siendo la división Bacillariophyta la más abundante. La estación E1 presentó los valores más altos de diversidad efectiva ($q:0$, $q:1$ y $q:2$), mientras que la E4 registró los valores más bajos. El sustrato de roca presentó las mayores densidades relativas. Se encontró una relación inversa entre el caudal y la densidad relativa de los organismos, con altas densidades relativas en los meses de pocas precipitaciones y menores en los meses de intensas precipitaciones. Se concluyó que las temporadas meteorológicas y el grado de intervención antrópica son algunos de los factores relevantes en la composición y estructura de la comunidad fitoperifítica en la cuenca del río Anchique. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Fitoperifiton; Río Anchique; Ecología; Composición; Parámetros fisicoquímicos.

Ecological aspects of the phytoperiphytic community in the Anchique River, Colombian Andean basin

Abstract

Phytoperifiton contributes significantly to the dynamics of the ecosystem since it oxygenates the water and provides organic matter, shelter, and nourishment to aquatic organisms. In this context, we conducted the present study to determine its dynamics in the Anchique River, an important Colombian Andean basin. The samplings were carried out in four points located along the river in contrasting weather seasons using the methodology of surface scraping on two natural substrates (rock and trunk). We registered a relative density of 5,070 organisms/cm² distributed in five divisions, nine classes and 59 genera of which the Bacillariophyta division was the most abundant. Station E1 presented the highest values of richness, diversity, and dominance, while E4 recorded the lowest values. The rock substrate presented the highest relative densities. We found an inverse relationship between the flow and the relative density of the organisms with high relative densities during the months of low rainfall and the lowest values during the months of high rainfall. We concluded that the meteorological seasons and the degree of anthropic intervention are some of the relevant factors in the composition and structure of the phytoperiphytic community in the Anchique River basin. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Phytoperiphyton; Anchique River; Structure; Composition; Physicochemical parameters.

Introducción

Los ríos son ecosistemas dulceacuícolas de gran relevancia, ya que albergan una abundante y diversa biota en la que se destaca la comunidad de algas perifíticas, las cuales son productoras primarias dominantes en los cursos de agua (Gómez, *et al.*, 2009), presentan altas tasas de renovación y poseen estrategias oportunistas que les permiten establecerse con éxito en diversos hábitats (Goring & Biggs, 1996). Su importancia se atribuye a su capacidad para capturar la energía lumínica, a su papel como fuente de alimento de varios organismos acuáticos y a su

transformación en compuestos orgánicos, característica que la posiciona en un nivel trófico importante (Roldán, 1992; Biggs & Smith, 2002).

Las algas perifíticas, principalmente las diatomeas, se caracterizan por su sensibilidad específica a una variedad de condiciones ecológicas, físicas y químicas en los arroyos y

*Correspondencia:

Kelly Huertas-Farías, huefar@hotmail.com

Recibido: 21 de agosto de 2018

Aceptado: 13 de marzo de 2019

Editor: Sandra Baena Garzón

ríos (Lobo, *et al.*, 2016), por lo tanto, pueden usarse para el monitoreo de la contaminación ambiental mediante la determinación de sus diferentes grados de tolerancia a partir de los valores tróficos (Lobo, *et al.*, 2015), ya que responden de manera rápida a diferentes tensores ambientales y se establecen de forma fija en un sustrato (Masseret, *et al.*, 1998; Wu, 1999; Smith & Smith, 2001; Harding, *et al.*, 2005; Arcos & Gómez, 2006).

Debido a las dinámicas antropogénicas, el deterioro de los recursos hídricos es progresivo y pone en riesgo la biota que albergan. La expansión de la frontera agrícola y ganadera, el establecimiento y puesta en marcha de industrias de gran producción y la creciente densidad de la población humana, entre otros, han sido los factores más determinantes en la transformación del paisaje, pues afectan negativamente la estructura, la función y la composición de los ecosistemas lóticos mediante la alteración de sus características físicas y ambientales con la consecuente pérdida de su biodiversidad (Rivera, *et al.*, 2010; Smucker & Vis, 2011).

De ahí la necesidad de realizar estudios sobre los ecosistemas acuáticos, su dinámica y la relación entre su diversidad y la capacidad de adaptación de las diferentes especies a los cambios estructurales o fisicoquímicos de origen natural o antropogénico, cuyo conocimiento es una herramienta relevante para comprender los mecanismos de respuesta de las comunidades ante posibles alteraciones del ambiente (Patrick, 1988; Rivera & Donato, 2008).

Dada la importancia del río Anchique para las poblaciones del municipio de Natagaima en el departamento del Tolima, pues constituye su principal fuente hídrica, y del papel del fitoperifiton en la dinámica de los ecosistemas dulceacuícolas, se propuso la presente investigación para evaluar la estructura y la composición de las microalgas perifíticas en esta importante cuenca andina. Los resultados obtenidos son un aporte importante para futuros estudios taxonómicos y de bioindicación y constituyen una información necesaria para el diseño de planes y programas de manejo y conservación de la cuenca, incluida su biota fitoperifítica. Además, establecen la línea de base de la taxonomía de las algas perifíticas en Colombia y contribuyen a determinar el estado ecológico de las cuencas andinas colombianas dando cuenta de su abundancia, densidad y diversidad.

Materiales y métodos

Área de estudio. Se seleccionaron cuatro estaciones de muestreo ubicadas a lo largo de la cuenca del río Anchique (E1: 03°33'11,7"; E2: 03°33'40,0"; E3: 03°35'10,1"; E4: 03°34'28,7" N, y E1: 75°09'49,7"; E2: 75°08'31,2"; E3: 75°07'54,2"; E4: 75°05'59,1" O), entre los 415 y los 333 m s.n.m. y con una distancia lineal entre ellas de 3 km aproximadamente (Figura 1). La estación E1 se ubica en la parte alta de la cuenca, caracterizada por ser un cuerpo de agua con poco caudal y alta incidencia de material alóctono; las estaciones E2 y E3 son balnearios y puntos empleados

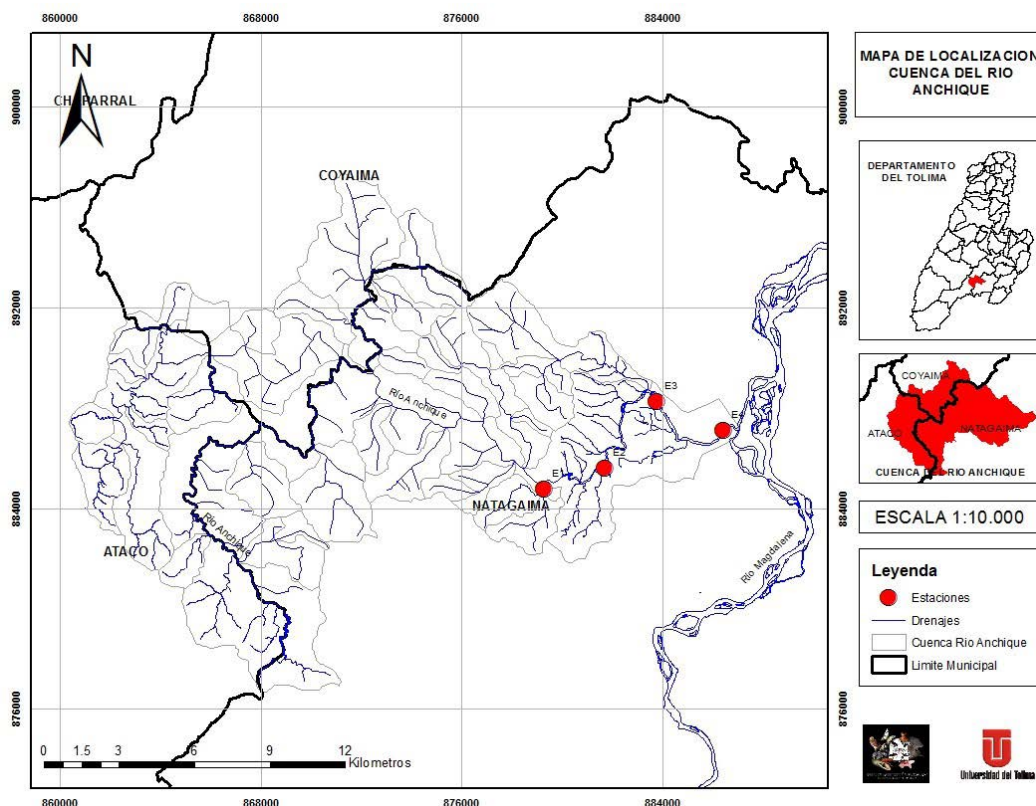


Figura 1. Estaciones de muestreo en el río Anchique, cuenca andina colombiana

para lavar, en tanto que la estación E4 está en un punto de menor altitud muy intervenido, pues es un paso vehicular y de ganado. Se hicieron cinco muestreos durante un ciclo hidrológico: desde mayo del 2015 hasta julio del 2016, y se tomó la información de los registros históricos y de los últimos 20 años de las lluvias hechos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en la cuenca.

Toma de muestras biológicas. Para la recolección del material perifítico se seleccionaron dos tipos de sustratos naturales en inmersión (roca y tronco) en cada estación de muestreo mediante raspados de superficie en un área de 10 cm² de cada sustrato con la ayuda de cepillos plásticos según la metodología recomendada por **Tümping & Friedrich** (1999). Las muestras se fijaron con una solución preservante de formol al 10 % y lugol siguiendo la metodología recomendada por **Weber** (1968).

Los individuos se contaron usando la fórmula propuesta por **Hauer & Lambert** (2007) en la cual la densidad equivale al número de individuos por área de superficie (cm²). Para la identificación taxonómica de las algas se siguieron las claves de **Needham & Needham** (1978), **Kramer & Lange-Bertalot** (1979), **Streble & Krauter** (1987), **Lopretto & Tell** (1995), **Ramírez** (2000), **Wehr & Sheat** (2003) y **Bellinger & Sigee** (2011), así como las indicaciones de las publicaciones de **Martínez & Donato** (2003), **Díaz-Quirós & Rivera-Rondón** (2004), y **Bicudo & Meneses** (2006). Además, como respaldo de la determinación taxonómica de las algas se emplearon las bases de datos electrónicas Algaebase y Diatombase (**Guiry & Guiry**, 2013; **Kocielek, et al.**, 2016).

Análisis bacteriológicos y fisicoquímicos. Se hicieron mediciones *in situ* de la temperatura del agua y del ambiente, de la profundidad y del ancho y la velocidad de la corriente; las descripciones geomorfológicas del cuerpo de agua y las características de la zona ribereña se registraron en fichas de campo. Posteriormente, se recolectaron muestras de agua superficial y en contra de la corriente en frascos plásticos con capacidad para 2.000 ml. Se analizaron el pH, la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), el oxígeno disuelto (mg O₂/l), la turbidez (UNF), la alcalinidad total y la dureza (mg CaO₃/l), los nitratos (mg NO₃ /l), los fosfatos (mg PO₄ /l), los sólidos totales (mg/l), la demanda química de oxígeno (DQO: mg O₂ /l) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅: mg O₂ /l), el fósforo total (P) y los sulfatos (mgSO₄/l) (**American Public Health Association - APHA, American Water Works Association - AWWA, Water Environment Federation - WEF**, 2012). Para la determinación de los parámetros bacteriológicos, se tomaron muestras de agua superficialmente y en contra corriente en frascos de vidrio con capacidad para 300 ml, las cuales se rotularon y preservaron en frío para el posterior análisis de coliformes totales (UFC/100 ml) y fecales (UFC/100ml) en el laboratorio de análisis químico LASEREX de la Universidad del Tolima (**Roldán**, 1992; **Ramírez & Viña**, 1998; **Roldán & Ramírez**, 2008) (Tabla 1).

Análisis de variables fisicoquímicas. Se utilizó la prueba de análisis de normalidad de Shapiro Wilks para evaluar la distribución de las variables fisicoquímicas a nivel espacial y temporal y, posteriormente, el análisis de varianza no paramétrico de Kruskal Wallis para determinar la existencia de diferencias significativas a nivel temporal y espacial. Las pruebas se hicieron con el programa estadístico InfoStat (**Di rienzo, et al.**, 2013).

Análisis de correlación canónica. Se hizo el análisis de correlación canónica (ACC) para establecer la existencia y el grado de asociación entre las variables fisicoquímicas y la comunidad fitoperifítica del río Anchique con el programa Canoco, versión 4.5 (**Braak & Smilauer**, 2004).

Análisis estadísticos. Se determinó la densidad relativa a partir del número de individuos recolectados de cada género y su relación con el número total de individuos de la muestra; para establecer la diversidad se aplicó la serie de los números efectivos de Hill (1973). Se hizo un análisis de Shapiro Wilks para evaluar la distribución normal en los datos. Para la comparación de las medias de estos índices ecológicos se empleó un ANOVA de una vía para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los índices evaluados. Se utilizó la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher para comparar entre muestreos y estaciones. Se aplicó el índice de similaridad de Bray Curtis para establecer una medida de la diferencia entre las abundancias de cada género en las diferentes estaciones de muestreo (**Brower & Zar**, 1984). En el análisis

Tabla 1. Métodos analíticos para el cálculo de parámetros químicos

Parámetros	Método analítico
pH	Potenciométrico/pH métrico
Conductividad eléctrica	Potenciométrico/conductimétrico
Oxígeno disuelto	Yodométrico
Porcentaje de saturación de oxígeno	Yodométrico
Turbidez	Espectrofotométrico/UV-Vis
Alcalinidad total	Electrodo selectivo/neutralización
Dureza	Electrodo selectivo/complexiométrico
Nitratos	Espectrofotométrico/UV
Fosfatos	Espectrofotométrico/Vis
Sólidos totales	Gravimétrico/evaporación
Demanda química de oxígeno (DQO)	Reflujo cerrado y volumetría
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	Incubación y electrometría
Fósforo total	Espectrofotométrico/Vis
Sulfatos	Espectrofotométrico/Vis
Coliformes totales	Filtración por membrana
Coliformes fecales	Filtración por membrana

de escalamiento multidimensional no métrico (*non-metric multidimensional scaling*, NMDS) se implementó la distancia de Bray Curtis con el paquete Primer-6 (Clarke & Gorley, 2006) para evaluar el ensamblaje de las comunidades fitoperifíticas a nivel temporal y por sustratos.

Resultados

Se obtuvo una densidad total de 5,070 organismos/cm² distribuidos en cinco divisiones, nueve clases, 24 órdenes, 43 familias y 59 géneros (Tabla 2). La división Bacillariophyta registró la mayor densidad relativa (59,88 %), seguida de Charophyta (16,24 %), en tanto que Euglenophyta tan solo registró un 0,07 % de representatividad (Figura 2). A nivel de género, *Synedra* tuvo la mayor densidad relativa (19,08 %), seguido de *Surirella* (12,3 %), *Navicula* (9,52 %), *Cosmarium* (9,6 %), *Cymbella* (7,13 %) y *Oscillatoria* (6,92 %), en tanto que géneros como *Desmidium*, *Diploneis* y *Euastrum* registraron las densidades más bajas (0,03 %).

A nivel espacial la estación que presentó la mayor densidad relativa fue la E1 (nacimiento) con 36,31 %, seguida de E3 (puente) con 26,60 %, E2 (balneario) con 25,23 % y,

por último, la E4 (desembocadura) con 11,84 %. En cuanto a la temporalidad es de resaltar que el mes de diciembre de 2015 fue el que presentó la mayor densidad relativa, con 27,47 %, seguido del mes de julio de 2015, con 27,24 %, es decir, en los meses de pocas precipitaciones, en tanto que en los meses con altas precipitaciones se presentaron las menores densidades relativas: 6,83 % en abril y 22,50 % en julio de 2016 (Figura 3).

En general, el sustrato de roca registró la mayor densidad relativa, con un promedio de 58,48 %, y el sustrato de tronco tuvo una de 41,51 %. Ambos sustratos obtuvieron una composición fitoperifítica cercana en cuanto al número de taxones, con 47 géneros en la roca y 46 en los troncos.

Variables fisicoquímicas. La mayoría de los datos fisicoquímicos evidenciaron normalidad (Shapiro Wilks: $p > 0,05$), con excepción de los sólidos totales y los fosfatos en los muestreos, así como la turbidez, el porcentaje de saturación de oxígeno y el pH en las estaciones. Por otra parte, el análisis del ANOVA y la prueba de Kruskal Wallis no evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre los parámetros fisicoquímicos ($p > 0,9999$).

Tabla 2. Composición taxonómica y densidad de las microalgas perifíticas en la cuenca del río Anchique

Filo	Orden	Género	Densidad	Densidad relativa
Bacillariophyta	Bacillariales	<i>Nitzschia</i>	252,08	4,97
	Coccinodiscales	<i>Cocconeis</i>	9,62	0,19
		<i>Actinocyclus</i>	5,77	0,11
	Cymbellales	<i>Cymbella</i>	361,76	7,13
		<i>Gomphonema</i>	34,64	0,68
		<i>Rhoicosphenia</i>	11,55	0,23
	Fragilariales	<i>Fragilaria</i>	25,02	0,49
	Licmophorales	<i>Synedra</i>	967,89	19,09
	Melosirales	<i>Hyalodiscus</i>	34,64	0,68
		<i>Melosira</i>	5,77	0,11
	Naviculales	<i>Amphipleura</i>	5,77	0,11
		<i>Caloneis</i>	9,62	0,19
		<i>Diploneis</i>	1,92	0,04
		<i>Frustulia</i>	40,41	0,80
		<i>Gyrosigma</i>	61,58	1,21
		<i>Luticola</i>	1,92	0,04
		<i>Navicula</i>	482,98	9,53
		<i>Pinnularia</i>	44,26	0,87
		<i>Rhopalodia</i>	34,64	0,68
	Rhopalodiales	<i>Rhopalodia</i>	34,64	0,68
Surirellales	<i>Surirella</i>	631,15	12,45	
Tabellariales	<i>Tabellaria</i>	1,92	0,04	
	<i>Tetracyclus</i>	7,70	0,15	
Thalassiophysales	<i>Amphora</i>	3,85	0,08	

Charophyta	Desmidiáles	<i>Closterium</i>	55,80	1,10	
		<i>Cosmarium</i>	486,83	9,60	
		<i>Desmidium</i>	1,92	0,04	
		<i>Euastrum</i>	1,92	0,04	
		<i>Gonatozygon</i>	150,09	2,96	
		<i>Micrasteria</i>	13,47	0,27	
		<i>Penium</i>	5,77	0,11	
		<i>Staurastrum</i>	1,92	0,04	
		Zygnematales	<i>Ancylonema</i>	19,24	0,38
			<i>Cylindrocystis</i>	5,77	0,11
			<i>Mesotaenium</i>	1,92	0,04
			<i>Mougeotia</i>	1,92	0,04
			<i>Netrium</i>	34,64	0,68
			<i>Roya</i>	9,62	0,19
			<i>Spirogyra</i>	23,09	0,46
<i>Spirotaenia</i>	9,62		0,19		
Chlorophyta	Chlorellales	<i>Oocystis</i>	26,94	0,53	
	Sphaeropleales	<i>Ankistrodesmus</i>	3,85	0,08	
		<i>Hydrodictyon</i>	7,70	0,15	
		<i>Scenedesmus</i>	48,11	0,95	
	Trebouxiales	<i>Botryococcus</i>	300,18	5,92	
	Ulotrichales	<i>Ulothrix</i>	1,92	0,04	
Cyanobacteria	Synechococcales	<i>Merismopedia</i>	26,94	0,53	
	Chroococcales	<i>Aphanothece</i>	1,92	0,04	
		<i>Chroococcus</i>	5,77	0,11	
		<i>Gloeocapsa</i>	1,92	0,04	
		<i>Microcystis</i>	305,95	6,03	
	Nostocales	<i>Anabaena</i>	63,50	1,25	
		<i>Anabaenopsis</i>	7,70	0,15	
		<i>Calothrix</i>	3,85	0,08	
	Oscillatoriales	<i>Gleotrichia</i>	1,92	0,04	
		<i>Lyngbya</i>	1,92	0,04	
		<i>Oscillatoria</i>	386,77	7,63	
		<i>Phormidium</i>	7,70	0,15	
	spirulinales	<i>Spirulina</i>	1,92	0,04	
	Euglenophyta	Euglenales	<i>Trachelomona</i>	3,85	0,08
5	23	59	5070,38	100,00	

Variables químicas. Entre las variables asociadas con concentraciones de partículas disueltas en esta cuenca (turbidez, sólidos totales y oxígeno disuelto), la turbidez presentó los mayores valores en las estaciones E2, E3 (106 y 103 UNT), en tanto que en la estación E1 se presentó el menor valor (2,55 UNT). El oxígeno disuelto fue mayor en las estaciones E1 (53,45 mg/L), E2 (59,42 mg/L) y E3 (59,46 mg/L), y en la estación E4 se presentó un menor valor (49,0 mg/L).

Las variables relacionadas con el proceso de óxido-reducción registraron los mayores valores de DQO y nitratos en las estaciones E3 y E4, en la estación E2 se registraron altos valores de fosfatos, y en la estación E1 se presentó el mayor valor de DBO_5 .

Con respecto al proceso de mineralización, en la estación E1 se registraron los mayores valores de pH (8,18), conductividad eléctrica (416 μ S/cm), alcalinidad

(171 mg de CaCo₃/l) y dureza (367 mg de CaCo₃/l), en tanto que en las estaciones E2 y E3 se presentaron los menores valores.

Variables físicas. En las estaciones E2 y E3 se presentó la mayor velocidad de la corriente, con 0,70 y 0,64 m/s, respectivamente, así como los valores más altos de caudal (E2: 2,37 m³/s y E3: 1,31 m³/s), ancho (E2: 19 m y E3: 9,86 m) y profundidad (E2: 0,18 m y E3: 0,21m), en tanto que en las estaciones E1 y E4 se registraron los valores más bajos en esas variables.

Parámetros bacteriológicos. Los valores obtenidos para coliformes fecales en las épocas de muestreo en el río Anchique oscilaron entre 98 UFC/100 ml y 12.100 UFC/100 ml. En promedio, el mayor valor lo registro el muestreo cinco (julio de 2016) (2774,5 UFC/100 ml), el cual coincidió con la temporada de bajas precipitaciones. El muestreo dos (julio de 2015) reflejó pocos coliformes fecales (1.000 UFC/100 ml), lo que coincidió con días de lluvia, mas no con una temporada completa. Según el Decreto 1594 de 1984, los valores promedios de coliformes totales y fecales en los muestreos realizados en la cuenca del río Anchique estaban dentro de los valores aceptables para el uso del agua con fines recreativos.

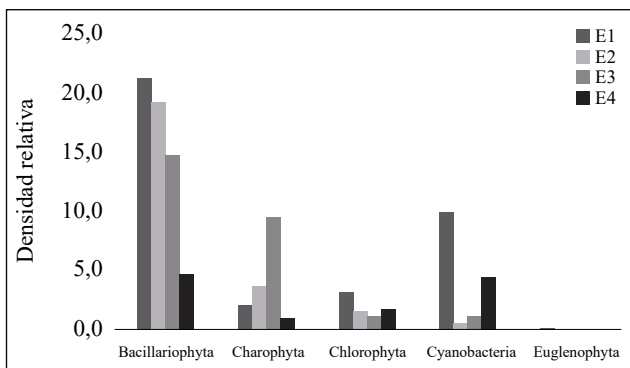


Figura 2. Densidad relativa de las divisiones del fitoperifiton presentes en las diferentes estaciones de muestreo

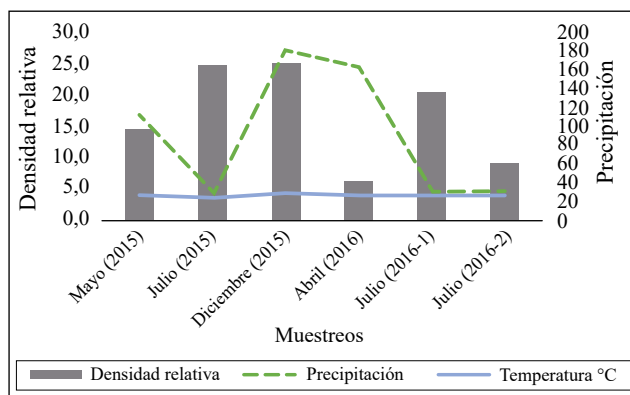


Figura 3. Climadiagrama de las condiciones hidroclimáticas en la cuenca del río Anchique

En cuanto a la variable de los coliformes totales, los valores oscilaron entre 1.400 UFC/100 ml y 6.700.000 UFC/100 ml. En el muestreo cinco (julio de 2016), se registró el mayor valor en promedio (1.950.000 UFC/100 ml). El menor valor para esta variable se registró en el muestreo dos (julio de 2015), con 4.250 UFC/100 ml.

Números efectivos. Los números de diversidad de Hill, o números efectivos, indicaron que, a nivel espacial y tem-poral, en la estación E1 se registró el mayor número de géneros (medida de riqueza, q: 0), con 44, en tanto que en la estación E4 se presentó el menor número con 27. A nivel temporal, en el muestreo dos (julio de 2015) se registró la mayor riqueza, con 44 géneros, y en el muestreo cuatro (abril de 2016), la menor, con 22 géneros. En cuanto a la medida de diversidad (q:1), que incluye todos los géneros y sus abundancias relativas, en la estación E1 se presentó una diversidad igual a la que tendría una comunidad teórica de 12 géneros. Por su parte, en las estaciones E2, E3 y E4 se registró una diversidad igual a la que tendría una comunidad de 11, 10 y 11 géneros efectivos, respectivamente. Al expresar estas equivalencias, fue evidente que en la estación E1 se registró 1,09 más diversidad de géneros que en la estación E2, 1,1 más que en las estaciones E2 y E4 y 1,2 más que en la E3. En la estación E3 se presentó el 83,3 % de la diversidad registrada en la E1.

A nivel temporal, la mayor diversidad de órdenes (q: 1) se registró en el muestreo dos (julio de 2015), con 14 géneros efectivos, y en el muestreo cinco se reportó la menor diversidad, con ocho géneros, es decir, tan sólo el 57,14 % de la diversidad presente en el muestreo dos. En cuanto a la medida de diversidad de los órdenes (q: 2), la mayor diversidad se registró en la estación E1, con siete géneros, en tanto que en las estaciones E2 y E3 se registró la menor diversidad, con seis géneros efectivos, y compartió el 85,71 % de la diversidad registrada en la E1. A nivel temporal, el muestreo dos (julio de 2015) presentó la mayor diversidad de órdenes (q: 2), con nueve géneros efectivos, mientras que el muestreo cinco presentó la menor diversidad, con tan solo cinco géneros (Figura 4).

Análisis estadístico. Debido a que los datos biológicos no presentaron normalidad (Shapiro Wilks, p<0,05), se hizo un análisis no paramétrico a nivel espacial y temporal en el cual se evidenció que las estaciones presentaron diferencias estadísticamente significativas entre sí (Kruskal Wallis: p<0,05). A nivel temporal no se registraron diferencias estadísticamente significativas (Kruskal Wallis: p<0,05). En este sentido, la prueba de comparación de diferencia mínima significativa de Fisher evidenció que los muestreos presentaron diferencias estadísticas significativas entre sí (p<0,05).

Los valores del índice de similitud de Bray Curtis revelaron que las estaciones E2 y E3 estaban más relacionadas, pues compartían el 64 % de los taxones, y que la estación E1 estaba relacionada con las estaciones E2 y E3 al compartir un 43 % con la E2 y un 37 % con la E3. La estación E4 presentó un menor grado de similitud con las demás

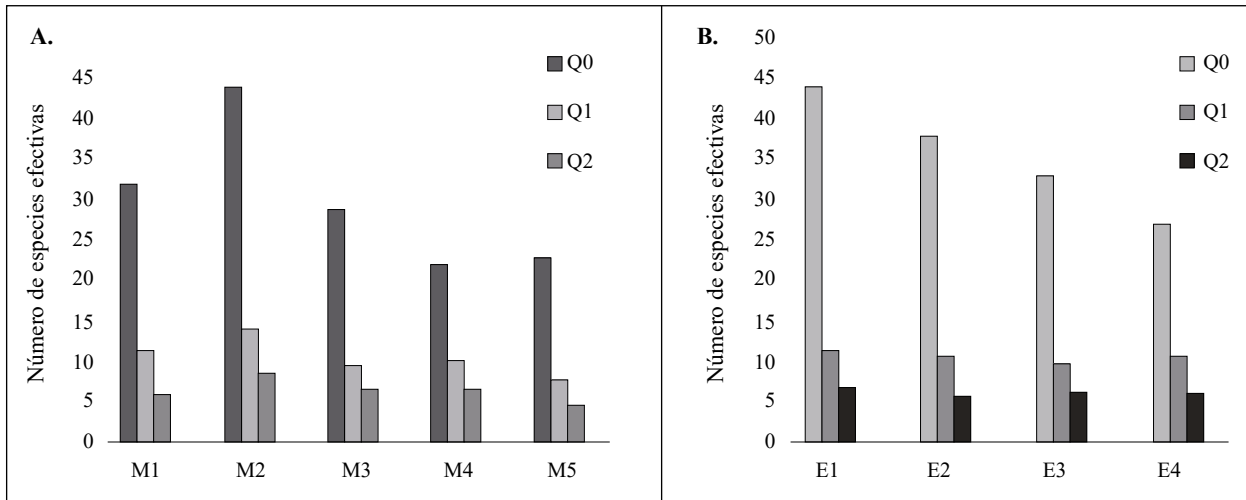


Figura 4. Índices de diversidad de Hill en las diferentes estaciones de muestreo y meses evaluados en la cuenca del río Anchique. (A) Estaciones; (B) Meses

estaciones, pues compartía el 26 %, el 32 % y el 31 % de su comunidad con las estaciones E1, E2 y E3, respectivamente. Según el análisis de escalamiento multidimensional no métrico, no hubo un ensamblaje claro en la composición de las comunidades con las variables de tipo de sustrato, estación y muestreo. Con el análisis de similitud (*analysis of similarities*, ANOSIM) no se encontraron diferencias significativas en las variables de tipo de sustrato, muestreos y estaciones ($p > 0,05$).

En cuanto a la relación de las variables biológicas, se evidenció que a nivel espacial el porcentaje de saturación de oxígeno, el pH y la temperatura del agua tuvieron, al parecer, algún grado de relación con los datos biológicos (prueba de Monte Carlo: $p < 0,05$). A nivel espacial, la estación E1 estaba muy relacionada con la variable del pH, mientras que la estaciones E2 y E3 parecían relacionarse con el porcentaje de oxígeno disuelto, pues los géneros *Staurastrum*, *Luticola*, *Ankistrodesmus*, *Spirulina*, *Cosmarium* y *Desmidium* presentaron relaciones cercanas ($p < 0,05$). Al parecer en la estación E4 se estableció una mayor relación con los nitratos, los coliformes totales y los fecales (Figura 5), en los géneros *Mycrocystis* y *Gyrosigma* ($p < 0,05$).

A nivel temporal, el muestreo tres (diciembre de 2015) se relacionó con los géneros *Luticola*, *Penium*, *Fragilaria*, *Merymopedia*, *Mesotaenium* y *Cosmarium* y con la variable de turbidez (Monte Carlo: $p < 0,05$); los muestreos uno (mayo de 2015) y cinco (julio de 2016-1) tuvieron una mayor relación entre sí y compartieron géneros como *Staurastrum*, *Euastrum*, *Trachelomonas*, *Spirotaenia* y *Anabaena* y con las variables de coliformes totales, de coliformes fecales y de nitratos ($p < 0,05$). Algunos muestreos como el dos (julio de 2015) no evidenciaron relaciones con las variables fisicoquímicas (Figura 5). A nivel temporal se evidenció algún grado de relación con la profundidad, los coliformes totales, el caudal y la temperatura del agua ($p < 0,05$).

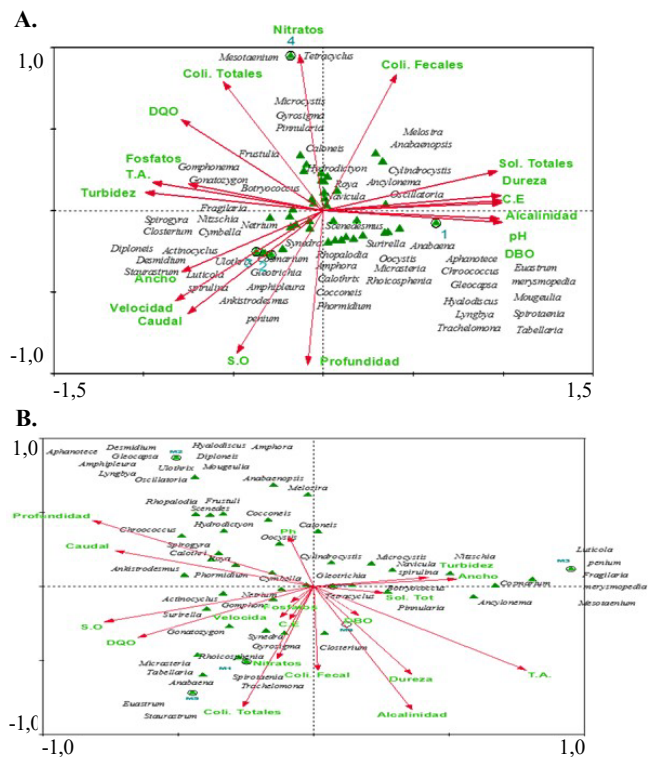


Figura 5. Análisis de correlación canónica entre las variables biológicas y las variables fisicoquímicas. (A) Estaciones; (B) Meses

Discusión

A nivel estructural, en todos los muestreos la división Bacillariophyta fue la más abundante y la Euglenophyta, la de menor abundancia. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Montoya & Ramirez (2007), Bustamante, et al. (2008), Silva, et al. (2008), Pedraza & Donato (2011) y Gordillo & Reinoso (2013) en cuanto a que estas divisiones

tuvieron una representatividad similar. Es muy probable que los organismos pertenecientes al filo Euglenophyta se encuentren de forma ocasional, ya que son característicos de ambientes con alto contenido de materia orgánica de origen natural, flujos y ambientes lénticos (Vilches, Casco, Giorgi, 2016), condiciones que se atribuyen principalmente a la estación E1, en donde la poca velocidad de la corriente y el material alóctono aportado por la vegetación ribereña crean las condiciones propicias para su establecimiento. La gran abundancia de la división Bacillariophyta podría estar relacionada con la segregación de estructuras mucilaginosas (*Cymbella*, *Amphora*, *Cocconeis*, *Gomphonema*, entre otros) que les permiten adherirse a diferentes sustratos y, así, mantenerse en las corrientes propias de un sistema lóxico (Pinilla, 1998). Las diatomeas presentan diferentes tipos de movimientos según su morfología: las pennadas con rafe presentan movimientos espasmódicos, en tanto que la mayoría de las diatomeas céntricas y pennadas sin rafe rotan sobre un mismo punto, características que pueden generar procesos de deriva en la comunidad según cuán resistente sea su tipo de movimiento y adhesión (Allan, 1995). Además, tienen material silíceo en su pared celular (frústula), característica que les otorga mayor resistencia a cambios fisicoquímicos del medio (Bellinger & Sigeo, 2011).

Los géneros de diatomeas *Synedra* y *Navicula* presentaron altas abundancias y densidades relativas en todos los muestreos y en la mayoría de las estaciones; asimismo, el género *Cosmarium* fue representativo de la división Chlorophyta y el *Oscillatoria*, de las cianobacterias, resultados que fueron similares a los obtenidos por Gualtero & Trilleras (2001) en la represa de Prado. Estos autores establecieron que las mayores densidades poblaciones en la comunidad de algas estaba representada por las diatomeas, las clorofíceas y las cianofíceas, y que sus altas densidades podrían estar relacionadas con la naturaleza orgánica de diatomeas como *Synedra* y *Navicula*, las cuales presentan una frústula resistente (Bellinger & Sigeo, 2011). Además, son géneros generalistas y cosmopolitas (Novelo, 2012), al igual que *Cosmarium* y *Oscillatoria*, caracterizados por ser cosmopolitas y por hacer parte natural de las comunidades de rocas en los ríos (Bellinger & Sigeo, 2011).

El orden de riqueza (q:0) refleja que la riqueza fitoperifítica disminuye a medida que se avanza aguas abajo en el río; la medida de diversidad (q:1) evidencia el mismo comportamiento, siendo la estación E1 la que presentó la mayor diversidad, seguida de la estación E2, en tanto que hubo valores similares en las estaciones E3 y E4. Estos resultados evidenciarían cierto grado de intervención antrópica a medida que la altura disminuye, debido a que en sistemas con altas descargas y alteración del flujo, la diversidad y la riqueza tienden a disminuir (Clausen & Biggs, 1996).

Las estaciones E2 y E3 registraron una gran relación entre sí, con un 70 % de similitud, lo cual estaría asociado con la cercanía de cada punto y el grado similar de intervención antrópica, ya que estas dos estaciones son de uso recreativo y doméstico. Las estaciones E1 (nacimiento)

y E4 (desembocadura) presentaron la mayor disimilitud entre ellas, sin embargo, la estación E4 (desembocadura) se diferenció de las demás, quizás porque esta zona presenta una gran influencia ganadera y vehicular a lo largo de su cauce, factores que modifican la química natural del agua y generan cambios en las dinámicas naturales de las comunidades perifíticas (Rivera, et al., 2010; Smucker & Vis, 2011; Castro & Pinilla, 2014).

Cabe resaltar que en este estudio, el análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) demostró ser poco confiable en cuanto a su interpretación, probablemente por la diferencia en la naturaleza de las muestras tomadas, ya que los datos fisicoquímicos reflejaron una calidad de agua puntual, mientras que los datos biológicos fueron producto de cambios anteriores en la dinámica del cuerpo de agua, lo generó sesgo en los datos. En general, no se evidenció ningún tipo de asociación entre las comunidades biológicas y las variables ambientales.

Conclusiones

Se estableció que, a nivel temporal y espacial, hubo influencia del régimen hidrológico sobre las variables de porcentaje de saturación de oxígeno, pH, temperatura del agua, profundidad, coliformes totales y caudal en la cuenca del río Anchique, variables que pueden incidir de forma directa o indirecta en el desarrollo de las comunidades fitoperifíticas.

A nivel temporal, la densidad y el número de géneros encontrados se vieron influidos, en parte, por la dinámica hidrológica del cuerpo del agua. Se registró la mayor densidad de perifiton en épocas de aguas bajas, siendo la temporada climática un dinamizador de la biota fitoperifítica del río.

Es importante hacer futuras investigaciones para evaluar el papel del perifiton en la dinámica trófica del ecosistema, así como para analizar su respuesta frente a eventos de perturbación natural a partir de sus rasgos funcionales, lo cual ofrecería una base para llevar a cabo biomonitoreos de estrés hídrico con las consecuentes implicaciones para la conservación y los planes y programas de manejo.

Agradecimientos

A la Universidad del Tolima, al Grupo de Investigación en Zoología y a todo el equipo técnico del macroproyecto del río Anchique, por su apoyo incondicional en campo.

Contribución de los autores

Kelly Huertas-Farías contribuyó en las salidas de campo, la determinación de las muestras y el análisis de datos; Gladys Reinoso corrigió el documento, y asesoró de forma continua en el proceso de determinación y tratamiento de las muestras; Yessica Tatiana-Parra colaboró con el análisis estadístico y con revisiones continuas de los procesos de cuantificación.

Conflicto de intereses

Ninguno.

Referencias

- Allan, D.** (1995). *Stream Ecology Structure and Function of Running Waters* (primera edición). Netherland: Kluwer Academic Publishers. p. 388.
- Allan, D., Castillo, M.** (2007). *Stream Ecology Structure and Function of Running Waters* (segunda edición.). Netherland: Springer. p. 436.
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.** (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water*. American Public Health Association, 22^a edición. Washington, United States: Academic Press. p. 1496.
- Arcos, M. & Gómez, A. C.** (2006). Microalgas perifíticas como indicadores del estado de las aguas de un humedal urbano: Jaboque, Bogotá D.C, Colombia. *NOVA*. **4**: 60-79.
- Bellinger, E. G. & Sigee, D. C.** (2011). *Freshwater algae: identification and use as bioindicators*. Oxford, UK: Wiley-Blackwell. p. 290.
- Bicudo, C. & Menezes, M.** (2006). Géneros de algas de aguas continentales do Brasil (chave para identificação e descrições). Segunda edición. Brazil: Editora Rima. p. 489.
- Biggs, B. J. & Smith, R. A.** (2002). Taxonomic Richness of Stream Benthic Algae: Effects of Flood Disturbance and Nutrients. *Society of Limnology and Oceanography*. **47** (4): 1175-1186.
- Braak, C. J., Smilauer, P.** (2004). *Canoco Reference Manual and CanoDraw for Windows User's guide: Software for Canonical Community Ordination* (version 4.5). Ithaca, New York: Microcomputer Power.
- Brower, J. E. & Zar, J. H.** (1984). *Field and laboratory methods for general ecology*. Dubuque, Iowa: Wm. C. Brown Co. p. 226.
- Bustamante, C. A., Dávila, C. A., Torres, S. L., Ortiz, J. F.** (2008). Composición y abundancia de la comunidad de fitoperifiton en el Río Quindío. *Rev.Invest.Univ.Quindío*. **20**: 15-21.
- Castro, D., Pinilla, G.** (2014). Periphytic diatom index for assessing the ecological quality of the Colombian Andean urban wetlands of Bogotá. *Limnetica*. **33** (2): 297-312.
- Clarke, K. & Gorley, R.** (2006). *PRIMER v6: User Manual/ Tutorial*. PRIMER-E, Plymouth, 192 p.
- Clausen, B. & Biggs, R.** (1996). Relationships between benthic biota and hydrological indices in New Zealand streams. *Freshwater biology*. **38** (2): 327-342.
- Di Rienzo, M., Balzarini, A., Cazanoves, L., González, M., Tablada, W., Guzmán, Robledo, W.** (2013). *InfoStat*. Software estadístico. Manual de usuario. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina: Grupo InfoStat. FCA.
- Díaz-Quirós, C. & Rivera-Rondón, C. A.** (2004). Diatomeas de pequeños ríos andinos y su utilización como indicadores de condiciones ambientales. *Caldasia*. **26**: 381- 394.
- Gómez, N., Donato, J., Adoni, G., Guash, H., Mateo, P., Sabater, S.** (2009). La biota de los ríos: los organismos autótrofos. En Elosegui, A., Sabater, S. (Editores), *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Bilbao: Fundación BBVA. p. 85-96.
- Gordillo, J. & Reinoso, F.** (2013). *Composición y estructura de la comunidad fitoperifítica de la cuenca del río Alvarado-Colombia*. Tesis de pregrado. Ibagué. Colombia: Universidad del Tolima. p. 126.
- Goring, D. G. & Biggs, B. J. F.** (1996). The effect of velocity and turbulence on the growth of periphyton in a cobble-bed stream: The 5-stone experiment. In 2nd IAHR International Symposium on Habitat Hydraulics: A239-A250.
- Gualtero, D. M. & Trilleras, J. M.** (2001). Estudio de la comunidad perifítica del embalse de Prado. Ibagué. Colombia: Universidad del Tolima. p. 193.
- Guiry, M.D. & Guiry, G.M.** (2019). *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Fecha de consulta: junio a diciembre de 2016. Disponible en: <http://www.algaebase.org>
- Harding, W.R., Archibald, C.G. Taylor, J.C.** (2005). The relevance of diatoms for water quality assessment in South Africa: A position paper. *Water SA*. **31** (1): 41-46.
- Hauer, R. & Lamberti, A.** (2007). *Methods in Stream Ecology*. USA: Academic Press. p. 506.
- Hill, M.O.** (1973). Diversity and Evenness: A Unifying Notation and Its Consequences. *Ecology*. **54**: 427-432.
- Krammer, K. & Lange-Bertalot, H.** (1997). *Bacillariophyceae 2. Bacillariaceae, Ephithemianaceae, Surirellaceae. Sussuaseflora von Mitteleuropa*. **2**: 1-611.
- Kociolek, J.P., Balasubramanian, K., Blanco, S., Coste, M., Ector, L., Liu, Y., Kulikovskiy, M., Lundholm, N., Ludwig, T., Potapova, M., Rimet, F.** (2016). *DiatomBase*. Fecha de consulta: junio a diciembre de 2016. Disponible en: <http://www.diatombase.org>
- Lobo, E. A., Heinrich, C. G., Schuch, M., Wetzel, C. E., Ector, L.** (2016). Diatoms as bioindicators in rivers. *River Algae*. **1**: 245-271.
- Lobo, E. A., Heinrich, C. G., Schuch, M., Heinrich, C.** (2015). Development of the Trophic Water Quality Index (TWQI) for subtropical temperate Brazilian lotic systems. *Environ Monit Asses*. **187**: 1-13.
- Lopretto, E. & Tell, G.** (1995). *Ecosistemas de aguas continentales*. Argentina: Ediciones Sur, 1401 p.
- Martínez, L. & Donato, J. C.** (2003). Efectos del caudal sobre la colonización de algas en un río de alta montaña tropical (Boyacá, Colombia). *Caldasia*. **25** (1): 337-354.
- Masseret, E., Amblard, C., Bourdier, G.** (1998). Changes in the structure and metabolic activities of periphytic communities in a stream receiving treated sewage from a waste stabilization pond. *Water Research*. **32** (8): 2299-2314.
- Montoya, M. & Ramírez, J. J.** (2007). Variación estructural de la comunidad perifítica colonizadora de sustratos artificiales en la zona de ritral del río Medellín, Colombia. *Revista de biología tropical*. **55**: 585-593.
- Needham, J.G. & Needham, P. R.** (1978). *Guía para el estudio de seres vivos de agua dulce*. Traducción adaptada para España y América. Barcelona, España: De reverté. p. 131.
- Novelo, E.** (2012). *Cyanoprokaryota*. Fascículo 90 Serie: Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Editor. R. Medina. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. p. 96.
- Patrick, R.** (1988). Importance of diversity in the functioning and structure of riverine communities. *Society of Limnology y Oceanography*. **33** (6): 1304-1307.
- Pedraza, E., Donato, J.** (2011). Diversidad y distribución de diatomeas en un arroyo de montaña de los Andes colombianos. *Caldasia*. **33**: 177-191.
- Pinilla, G.** (1998). *Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia*. Santa fe de Bogotá, Colombia: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Centro de Investigaciones. p. 67.

- Pizarro, H. & Alemanni, M. E.** (2005). Variables físico-químicas del agua y su influencia en la biomasa del perifiton en un tramo inferior del río Luján. *Asociación Argentina de Ecología*. **15**: 73-88.
- Ramírez, J.** (2000). Fitoplancton de agua dulce: bases ecológicas, taxonómicas y sanitarias. Colombia: Editorial Universidad de Antioquia. p. 207.
- Ramírez, G. & Viña, G.** (1998). *Limnología colombiana*. Cap. 4, Sistemas Lóticos. Caracterización físicoquímica II. Bogotá, Colombia: Exploration Company. p. 293.
- Rivera, C. & Donato, J.** (2008). Influencia de las variaciones hidrológicas y químicas sobre la diversidad de diatomeas bénticas. En: Donato, J. (Editores) *Ecología de un río de montaña de los Andes colombianos (río Tota, Boyacá)*. Bogotá D.C, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. p. 83-102.
- Rivera, C.A., Zapata, A.M., Pérez, D., Morales, Y., Ovalle, H., Álvarez, J.P.** (2010). Caracterización limnológica de humedales de la planicie de inundación del río Orinoco. Orinoquía, Colombia. *Acta biológica colombiana*. **15** (1): 145-166.
- Roldán, G.** (1992). *Fundamentos de limnología neotropical*. Colombia. Universidad de Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia. p. 529.
- Roldán, G., Ramírez, J.** (2008). *Fundamentos de Limnología neotropical*. (2.a ed.) Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia. p. 440.
- Silva, A. M., Sili, C., Torzillo, G.** (2008). Cyanoprocaryota y microalgas (Chlorophyceae y Bacillariophyceae) bentónicas dominantes en ríos de Costa Rica. *Revista Biología Tropical*. **56**: 221-235.
- Smith, R. & Smith, T.** (2001). *Ecología*. 4a edición. Madrid, España: Addison Wesley. p. 642.
- Smucker, N. & Vis, M.** (2011). Acid mine drainage affects the development and function of epilithic biofilms in streams. *Journal of North American Benthology Society*. **30** (3): 728-738.
- Streble, H., Krauter, D.** (1987). *Atlas de los microorganismos de agua dulce. La vida en una gota de agua*. Barcelona, España. Ediciones Omega, S.A. p. 372.
- Tümping, W. & Friedrich, G.** (1999). *Methoden der Biologischen Wasseruntersuchung 2. Biologische Gewässeruntersuchung*. **2**: 310-331.
- Vilches, C., Casco, M., Giorgi, A.** (2016). El perifiton como indicador de contaminación difusa: el caso de la cuenca superior del río Reconquista (Buenos Aires, Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*. **51** (4): 579-595.
- Weber, C.** (1968). The preservation of phytoplankton grab samples. *Transactions of the American Microscopical Society*. **87**: 70-81.
- Wehr, J.D. & Sheath, R.G.** (2003). *Freshwater Algae of North America: Ecology and Classification*. USA, Academic Press. p. 1066.
- Wu, J.T.** (1999). A generic index of diatom assemblages as bioindicator of pollution in the Keelung River of Taiwan. *Hydrobiologia*. **397**: 79-87
- Zapata, A. M. & Donato, J. C.** (2005). Cambios diarios de las algas perifíticas y su relación con la velocidad de corriente en un río tropical de montaña (río Tota-Colombia). *Limnetica*. **24**: 327-338.

Distribución espacial y temporal de Elmidae (Insecta: Coleoptera) y su relación con los parámetros fisicoquímicos en el río Ocoa, Meta, Colombia

Ivonne Alexandra Aguilera-Giraldo¹, Jesús Manuel Vásquez-Ramos^{2,*}

¹ Grupo de Investigación en Gestión Ambiental Sostenible (GIGAS), Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquia Colombiana (ICAOC), Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia

² Grupo de Investigación, Evaluación, Manejo y Conservación de Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros (GIREHPES), Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquia Colombiana (ICAOC), Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia

Resumen

Los élmidos (Coleoptera) son organismos acuáticos de distribución mundial. Sus formas inmaduras y adultas ocupan una amplia gama de sustratos y hábitats, y son un grupo diverso. Este estudio tuvo como objetivo determinar la distribución espacial y temporal de los Elmidae, y su relación con los parámetros fisicoquímicos en el río Ocoa. Se establecieron 15 estaciones de muestreo y se revisaron 210 muestras de macroinvertebrados recolectadas en un sustrato de roca-guijarro utilizando una red Surber (250 μm) en dos periodos hidrológicos contrastantes (de baja y alta precipitación), correspondientes a octubre de 2014 y febrero de 2015. Se obtuvieron 37 organismos (larvas y adultos) de nueve géneros de Elmidae: *Heterelmis*, *Huleechius*, *Macrelmis*, *Astrolimnius*, *Microcyloepus*, *Neoelmis*, *Hexacyloepus*, *Cylloepus*, *Notelmis* y *Phanocerus*, de los cuales siete corresponden a nuevos registros para la región de la Orinoquia colombiana. En el periodo de baja precipitación hubo una mayor representatividad, con 35 registros de nueve géneros, en tanto que en el periodo de alta precipitación hubo una marcada disminución de la riqueza, con dos registros solamente, correspondientes a dos géneros. En general, la abundancia de Elmidae fue baja a lo largo del río, y en las estaciones ubicadas en el sector que atraviesa la ciudad de Villavicencio, con mayor deterioro del hábitat, se registró la menor abundancia y en algunas no se registraron élmidos. Los efectos ambientales de la urbanización, como la contaminación por materia orgánica y la proliferación de coliformes debida al vertimiento de aguas residuales, fueron los principales factores determinantes de la disminución de la riqueza y la abundancia de estos organismos. Esta es la primera exploración de Elmidae en la zona y contribuye al conocimiento ecológico de la fauna de coleópteros en cuencas urbanas de la Orinoquia colombiana. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Bioindicador; Coleoptera; Elmidae; Cuenca urbana; Orinoco.

Spatial and temporal distribution of Elmidae (Insecta: Coleoptera) and its relationship with physicochemical parameters in the Ocoa river, Meta, Colombia

Abstract

The riffle beetle (Coleoptera) are aquatic organisms of worldwide distribution. Their immature and adult forms occupy a wide range of substrates and habitats and they are a diverse group. Our study aimed to determine the spatial and temporal distribution of the family Elmidae and its relationship with physicochemical parameters in the Ocoa River. We established 15 sampling stations and reviewed a total of 210 samples of macroinvertebrates collected in the rock-pebble substrate using Surber nets (250 μm) in two contrasting hydrological periods (low and high rainfall): October 2014 and February 2015. We obtained 37 organisms (larvae and adults) from nine genera of Elmidae: *Heterelmis*, *Huleechius*, *Macrelmis*, *Astrolimnius*, *Microcyloepus*, *Neoelmis*, *Hexacyloepus*, *Cylloepus*, *Notelmis* and *Phanocerus*, of which seven corresponded to new records for the Colombian Orinoquia region. During the low rainfall period, the representation was higher, with 35 records of nine genera, while during the high rainfall period, there was a marked decrease in richness, with only two records corresponding to two genera. In general, the abundance of Elmidae was low along the river; the stations located in the sector crossing the city of Villavicencio, with a more deteriorated habitat, harbored the lowest abundance and in some, no riffle beetles were registered. The environmental effects of urbanization, such as contamination by organic matter and the growth of coliform bacteria due to wastewater discharges, were the main determinants of the decrease in the richness and abundance of these organisms. The present study is the first exploration of Elmidae in the zone and contributes to the ecological knowledge of Coleoptera fauna in urban basins of the Colombian Orinoquia. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Bioindicator; Coleoptera; Elmidae; Urban basin; Orinoco.

*Correspondencia:

Jesús Manuel Vásquez Ramos; jvasquez@unillanos.edu.co; **Recibido:** 3 de febrero de 2019; **Aceptado:** 15 de marzo de 2019;
Editor: Elizabeth Castañeda

Introducción

Los élmidos son escarabajos acuáticos de amplia distribución, con cerca de 1.500 especies descritas a nivel mundial que se distribuyen en 149 géneros (Slipinski, *et al.*, 2011). Pertenecen al orden Coleoptera, el cual incluye cerca de 18.000 especies netamente acuáticas, distribuidas en aproximadamente 30 familias (Jäch & Balke, 2008). En el Neotrópico la familia Elmidae tiene una amplia distribución y está representada por dos subfamilias: Elmidae, con 385 especies y 36 géneros, y Larainae, con 50 especies y 11 géneros (Manzo, 2013).

La diversidad de este grupo probablemente se deba a que ocupa un amplio espectro de microhábitats en ambientes lóticos y en algunos lénticos (White & Roughley, 2008), pues las larvas y los adultos pueden colonizar sustratos como plantas acuáticas, barro, raíces, troncos, piedras, hojarasca y, también, los márgenes de ecosistemas acuáticos o lo que se conoce comúnmente como el hábitat ripario (Ferreira-Jr, *et al.*, 2014; Salles & Ferreira-Jr, 2014).

Durante su ciclo de vida, la mayoría de los élmidos se alimentan principalmente de algas y detritos (Brown, 1987) y presentan de cuatro a ocho estadios larvales seguidos de un estadio de pupa y el de adulto, aunque con diferencias entre las subfamilias Elminae y Laraine (Brown, 1987; White & Roughley, 2008). Son importantes en las cadenas tróficas de los ecosistemas acuáticos porque procesan la materia orgánica y, en alguna medida, son fuente de alimento de peces y aves acuáticas (Brown, 1987; White & Roughley, 2008).

En los últimos años, la investigación sobre los Elmidae neotropicales ha aumentado, no solo por su diversidad, sino por su potencial como bioindicador, pues las larvas y los adultos de la mayoría de las especies se encuentran en aguas corrientes bien oxigenadas y presentan baja tolerancia a la contaminación orgánica, lo que permite la formulación de índices de calidad ambiental en muchas corrientes neotropicales (Von Ellenrieder, 2007; Archangelsky, *et al.*, 2009; Gutiérrez-Fonseca, 2010; Manzo, 2013; Braun, *et al.*, 2014; Lozano, 2014; González-Córdoba, *et al.*, 2015a).

En Colombia el estudio taxonómico y ecológico del orden Coleoptera ha sido muy escaso en comparación con el de otros órdenes de insectos como Ephemeroptera y Trichoptera (Roldán, 2016). Aunque se han publicado varios trabajos sobre este orden (González-Córdoba, *et al.*, 2015a), su complejidad taxonómica y su poca abundancia no han fomentado el interés por estudiarlo. En el último año han aparecido algunos aportes con un alto rigor taxonómico que han enriquecido el conocimiento ecológico, taxonómico y de distribución de géneros y especies de la familia Elmidae en la regiones andina y pacífica, y en la Orinoquia (González-Córdoba, *et al.*, 2015a, b, 2016a,b, 2019); sin embargo, deben aunarse esfuerzos para estudiar la riqueza genérica y de especies de la familia en otras regiones del país (González-Córdoba, *et al.*, 2016b).

Específicamente en la Orinoquia, González-Córdoba, *et al.* (2015b, 2019) han registrado cinco especies (*Neolimnius palpalis*, Hinton 1939, *Pilielmis apama*, Hinton 1971, *Hintonelmis opis*, Hinton 1971, *Hintonelmis sul*, Hinton 1971 y *Stegoelmis stictoides*, Spangler 1990) y siete géneros (*Hexacylloepus*, *Microcyllloepus*, *Neoelmis*, *Stegoelmis*, *Xenelmis*, *Gyrelmis* e *Hyntonelmis*). Teniendo en cuenta la multiplicidad de ecosistemas acuáticos, la variación altitudinal y las diferentes afectaciones antrópicas de esta región, existe la posibilidad de muchos hallazgos. En este contexto, el presente estudio se llevó a cabo en el área urbana y suburbana del río Ocoa, subcuena del río Orinoco en Colombia, con el objetivo de determinar la distribución espacial y temporal de la familia Elmidae (Coleoptera) y establecer posibles relaciones de los géneros registrados con algunas variables físicas y químicas del agua, para así aportar al conocimiento de este grupo en la región de la Orinoquia.

Metodología

Área de estudio. Los muestreos se llevaron a cabo en un rango de altura de 241 a 532 m s.n.m. en un área urbana y suburbana de la cuenca hidrográfica del río Ocoa, con un área de 28.290 ha, ubicada en el municipio de Villavicencio, Colombia. El río nace en la vereda Samaria a 1.155 m s.n.m. y desemboca en el río Guatiquía, en el sector de Murujuy, a 225 m s.n.m. Al norte, la cuenca está delimitada por las estribaciones de la cordillera Oriental y la cuenca del río Guatiquía; al oriente con el municipio de Puerto López; por el sur con las cuencas de Caños Negros, Quenane, Pachaquiaro y Chocho, y por el occidente, con el río Guayuriba (Torres-Mora, *et al.*, 2015).

Material biológico. El material biológico se recolectó en el marco del proyecto “Identificación de alternativas de manejo ambiental de los ríos Guayuriba y Ocoa y caños Quenane y Quenanito de la cuenca alta del río Meta, basado en estrategias educativas, investigativas y de proyección social”, objeto del convenio marco de colaboración No. 5211592 suscrito entre la Universidad de Los Llanos y Ecopetrol.

Los muestreos se hicieron en dos periodos hidrológicos (de altas precipitaciones y de bajas precipitaciones), correspondientes a octubre de 2014 y febrero de 2015, en 15 estaciones a lo largo del río seleccionadas teniendo en cuenta la accesibilidad al lugar y la actividad antrópica (Tabla 1). En cada estación se tomaron siete muestras en sustrato rocoso con redes Surber (250 μ m de ojo de malla, 30x30 cm) y, posteriormente, se fijaron con alcohol (70 %).

El material así dispuesto se trasladó al Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquia (ICAOC) y mediante el uso de estereoscopios los élmidos se limpiaron, se separaron y se determinaron hasta el mínimo nivel taxonómico posible empleando las claves de Archangelsky, *et al.* (2009), Manzo (2005), y González-Córdoba, *et al.* (2015b), y con el apoyo de consultas a los expertos.

Parámetros fisicoquímicos. Se midieron *in situ* siete variables: pH (unidades de pH), oxígeno disuelto ($\text{mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$),

Tabla 1. Estaciones de muestreo establecidas en el río Ocoa

Estación	Nombre	Coordenadas		Altitud m s.n.m.	Tipo de afectación	Vegetación riparia	Uso del suelo
		N	O				
1	Confluencia q/da Blanca y río Ocoa	04°05'13,3"	73°42'32,6"	532	Vertimientos domésticos de fincas, casas aledañas	Árboles, arbustos y herbáceas	Residencial y ganadería
2	San Luis de Ocoa	04°04'45,8"	73°42'18,2"	504	Vertimientos domésticos de caseríos, empresas avícolas y uso para recreación	Árboles, arbustos y herbáceas	Residencial
3	Puente Caído	04°06'13,5"	73°37'58,9"	419	Vertimientos residenciales e industriales de aceiteras, termoeléctrica, empresas piscícolas, plantas de sacrificio de pollos, lavados de automóviles y porquerizas	Árboles, arbustos y gramíneas	Residencial
4	Antes de Caño buque	04°06'19,6"	73°37'25,3"	420	Vertimientos residenciales, industriales y lavaderos de autos	Árboles, arbustos y herbáceas	Residencial
5	Caño Buque	04°06'44,8"	73°37'05,2"	415	Vertimientos residenciales y desechos que recoge caño Buque en el casco urbano de Villavicencio	Árboles, arbustos y herbáceas	Residencial
6	Puente Chorillano	04°06'42,98"	73°36'20,5"	399	Vertimientos de urbanizaciones, lavaderos de automóviles y restaurantes o asaderos	Árboles y arbustos	Residencial
7	Antes de Caño La Cuerera	04°06'42,3"	73°34'19,4"	381	Vertimientos residenciales e industriales	Árboles, arbustos y gramíneas	Residencial
8	Caño Cuerera	04°06'50"	73°34'20"	381	Vertimientos de urbanizaciones e industrias; cerca de esta estación quedaba un depósito de basuras	Árboles, arbustos y herbáceas	Residencial
9	Posterior a caño La Cuerera	04°06'41,0"	73°34'14,4"	377	Vertimientos residenciales, industriales y lixiviados de un antiguo relleno sanitario	Árboles, arbustos y herbáceas	Residencial
10	Antes de Caño Maizaro	04°06'30,5"	73°33'43,8"	374	Vertimientos domésticos de fincas cercanas al cauce y actividades de ganadería	Árboles, arbustos y herbáceas	Residencial y agrícola
11	Caño Maizaro	04°06'30"	73°30'40"	345	Vertimientos domésticos y desechos por llantas, plásticos, colchones, papeles, entre otros, provenientes de la ciudad	Árboles, arbustos y herbáceas	Agrícola, residencial y ganadería
12	Posterior a caño Maizaro	04°06'32,9"	73°30'39,2"	345	Vertimientos domésticos e industriales y actividades de ganadería cercanas al río.	Árboles, arbustos y herbáceas	Agrícola y ganadería
13	Vertimiento de Ecopetrol-Apiay	04°06'48,4"	73°22'50,0"	259	Vertimientos domésticos e industriales y vertimiento de aguas asociadas a actividades de explotación de hidrocarburos	Árboles, arbustos y herbáceas	Agrícola e industrial
14	Alcaraván	04°06'59,0"	73°21'31,8"	276	Vertimientos domésticos e industriales y modificaciones en el cauce por paso de carros	Árboles, arbustos y gramíneas	Agrícola
15	Bocas del Ocoa	04°07'48,8"	73°15'30,1"	241	Vertimientos domésticos de fincas aledañas, y de diferentes cultivos y captación de agua para cultivo de palma de aceite	Árboles, arbustos y gramíneas	Agrícola

porcentaje de saturación de oxígeno (% SAT. O₂), temperatura (° C), conductividad eléctrica (μS.cm⁻¹), caudal (m³s⁻¹) y velocidad de la corriente (m.s⁻¹). En el laboratorio se midieron 28 parámetros correspondientes a: aceites y grasas, amonio, arsénico, bicarbonatos, cadmio, cobre, cromo, demanda química de oxígeno (DQO - mgO₂.L⁻¹), demanda biológica de oxígeno (DBO₅ - mgO₂.L⁻¹), fenoles totales, fósforo total (mgP.L⁻¹), hidrocarburos aromáticos policíclicos, hidrocarburos totales, hierro, mercurio, níquel, nitratos (mgNO₃.L⁻¹), nitritos (mgNO₂.L⁻¹), nitrógeno total, ortofosfatos, pesticidas organoclorados, pesticidas organofosforados, plomo, sólidos totales disueltos (STD - ppm), sulfatos, turbidez (UNT), tensoactivos y zinc, así como dos parámetros bacteriológicos: coliformes fecales y coliformes totales.

Análisis de datos. Se calculó la abundancia relativa de cada género a nivel espacial y temporal. Para determinar la representatividad del muestreo de élmidos se utilizó la diversidad asintótica estimada de la riqueza (Chao, et al., 2014; Chao & Chiu, 2016) con el paquete iNEXT (Hsieh, et al., 2019) en el programa RStudio (RStudio Team, 2015). La relación entre los élmidos y las variables físicas, químicas y bacteriológicas se estableció mediante un análisis de correspondencia canónica (ACC) usando el programa CANOCO 4.56 (Braak & Smilauer, 2002; Leps & Smilauer, 2003), dado el comportamiento unimodal de los datos; además, con el fin de determinar si las variables ambientales explicaban la distribución de élmidos a lo largo del río, se hizo una prueba de permutación de Montecarlo con 499 iteraciones (Leps & Smilauer, 2003). Dichos análisis se hicieron únicamente con la información de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos del periodo de baja precipitación; en el periodo de alta precipitación se registraron muy pocos taxones y, por ende, no se pudo hacer este análisis.

Asimismo, se empleó el índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO) (Ramírez, et al., 1997) para determinar si la expansión urbana y la contaminación por aguas residuales reflejadas en el oxígeno disuelto (%), la demanda biológica de oxígeno y los coliformes totales tenían un efecto sobre la riqueza y la abundancia de la familia Elmidae.

Resultados

Se recolectaron 37 organismos pertenecientes a la familia Elmidae: 36 de la subfamilia Elminae y uno de Larainae. Los géneros más abundantes fueron *Huleechius* (nueve individuos), *Cylloepus* (siete individuos) y *Macrelmis* (seis individuos), y los menos representativos, con tan solo un individuo, fueron *Astrolimnius*, *Heterelmis*, *Notelmis* y *Phanocerus* (Tabla 2). En cuanto a la diversidad asintótica estimada para q0 a nivel espacial, se encontró que la representatividad del muestreo fue suficiente, pues estuvo entre 66 y 100 % (Tabla 3).

Durante los meses de febrero y marzo (baja precipitación) se registró la mayor abundancia (94,59 %) y riqueza (nueve géneros), en tanto que en el mes de julio (alta precipitación) se registraron dos individuos (5,40 %) de los géneros *Heterelmis* y *Microcylloepus* (Tabla 2).

La estación 1 presentó la mayor riqueza, con cuatro géneros (*Huleechius*, *Neoelmis*, *Cylloepus* y *Notelmis*), seguida de las estaciones 3 y 15, con tres géneros. En siete estaciones (6, 7, 8, 9, 11, 12 y 13) no se registraron organismos de la familia y el género más frecuente a lo largo del río fue *Huleechius*, que se registró en cuatro de las 15 estaciones (Tabla 4).

En cuanto a la distribución altitudinal, la mayor riqueza se presentó entre los 415 y 532 m s.n.m., con ocho de los diez hallados. El género con mayor distribución fue *Microcylloepus* (420, 374 y 276 m s.n.m.), en tanto que

Tabla 2. Composición y abundancia de la familia Elmidae

Familia	Subfamilia	Género	Periodo aguas bajas		Periodo aguas altas	
			n	Abundancia relativa (%)	n	Abundancia relativa (%)
Elmidae	Elminae	<i>Heterelmis</i>	0	0,00	1	50
		<i>Huleechius</i>	9	28,13	0	0
		<i>Macrelmis</i>	6	18,75	0	0
		<i>Astrolimnius</i>	1	3,13	0	0
		<i>Microcylloepus</i>	4	3,13	1	50
		<i>Neoelmis</i>	3	9,38	0	0
		<i>Hexacylloepus</i>	3	9,37	0	0
		<i>Cylloepus</i>	7	21,87	0	0
		<i>Notelmis</i>	1	3,12	0	0
		Larainae	<i>Phanocerus</i>	1	3,12	0
		Total:	35	100,00	2	100

Tabla 3. Diversidad asintótica estimada de la riqueza para el ensamblaje de Elmidae a nivel espacial. Las estaciones no incluidas no registraron ningún género

Estación	Observada	Estimada	Esfuerzo de muestreo (%)	EE	LI	LS
1	4,00	5,78	69,23	3,36	4,16	23,89
2	2,00	2,00	100,00	0,46	2,00	3,60
3	3,00	4,50	66,67	2,87	3,13	20,08
4	1,00	1,00	100,00	3,12	1,00	2,55
5	1,00	1,00	100,00	0,20	1,00	1,46
10	1,00	1,00	100,00	3,12	1,00	2,55
14	2,00	2,00	100,00	4,61	2,00	3,67
15	3,00	3,00	100,00	5,04	3,00	4,67

EE: error estándar; LI: límite inferior; LS: límite superior

Hexacylloepus, *Notelmis* y *Phanocerus* se registraron en una estación a 276, 532 y 276 m s.n.m., respectivamente (Tabla 4).

De las 28 variables físicas, químicas y bacteriológicas medidas *ex situ* tan solo 19 registraron cambios a lo largo del río (Tabla 5); en el resto, los valores estuvieron por debajo del límite de detección, por lo que se excluyeron del análisis. Es importante resaltar que variables como el pH y la temperatura exhibieron una reducida variación a lo largo

de las estaciones, en tanto que los ortofosfatos, la turbidez, los coliformes totales, el oxígeno disuelto (%) y la DBO₅, entre otros, presentaron coeficientes de variación muy altos (Tabla 5, Figura 1). Según el índice de contaminación por materia orgánica, las estaciones 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 11 presentaron pésima calidad del agua (Figura 1).

Tabla 4. Distribución espacial y riqueza de géneros de la familia Elmidae

Estación	Altitud m s.n.m.	Géneros								Riqueza (S)	
		<i>Huleechius</i>	<i>Heterelmis</i>	<i>Microcyloepus</i>	<i>Macrelmis</i>	<i>Austrolimnius</i>	<i>Neaelmis</i>	<i>Hexacylloepus</i>	<i>Cyloepus</i>		<i>Notelmis</i>
1	532	X					X	X	X		4
2	504	X						X			2
3	419	X			X	X					3
4	420			X		X					2
5	415	X	X								2
6	399										0
7	381										0
8	381										0
9	377										0
10	374			X							1
11	345										0
12	345										0
13	259										0
14	276			X				X			2
15	241				X		X		X		3

Tabla 5. Medidas de tendencia de los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos

Parámetro	Media aritmética	Coefficiente de variación
Temperatura (°C)	26,33	0,07
Oxígeno disuelto (%O ₂)	43,59	0,93
pH (unidades de pH)	6,84	0,15
Conductividad eléctrica (uS/cm)	219,76	0,61
Sólidos disueltos totales (ppm STD)	111,40	0,53
Turbidez (UNT)	17,78	0,70
Bicarbonatos (mg/L CaCO ₃)	61,07	0,77
Nitratos (mg/L NO ₃ ⁻)	0,68	1,70
Nitritos (mg/L NO ₂ ⁻)	0,08	1,61
Amonio (mg/L NH ₄ ⁺)	4,48	1,67
Ortofosfatos (mg/L PO ₄ ³⁻)	8,09	2,92
Sulfatos (mg/L SO ₄ ²⁻)	20,94	0,56
Coliformes totales (NMP/100ml)	11124502,70	2,09
DBO _{5-20°C} (mg/L O ₂)	25,47	1,67
DQO (mg/L O ₂)	63,53	1,08
Tensoactivos aniónicos (mg/L)	1,20	1,64
Zinc (mg/L Zn)	0,17	1,75
Hierro (mg/L Fe)	1,50	0,42
Caudal (m ³ /s)	2,68	0,47

DBO: demanda biológica de oxígeno

DQO: demanda química de oxígeno

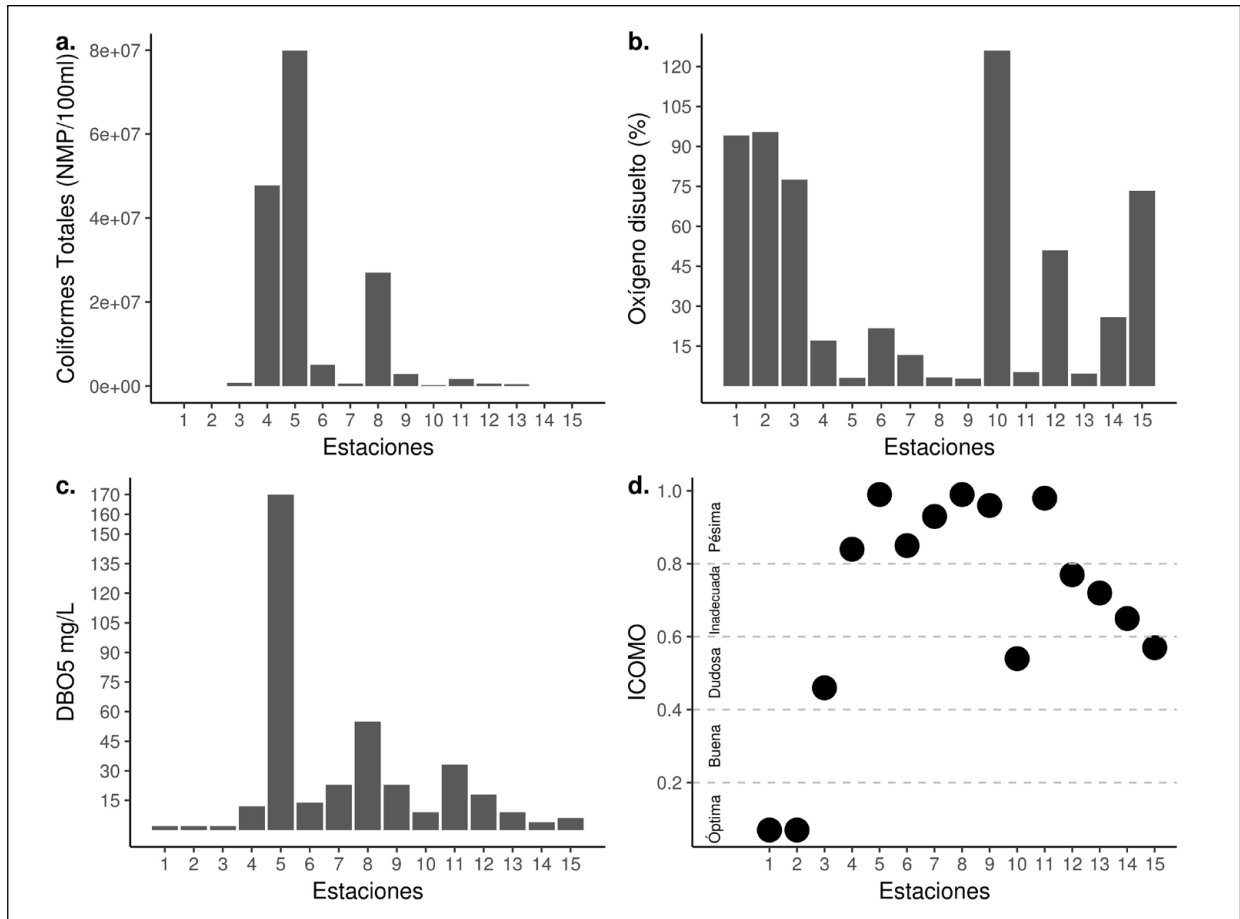


Figura 1. Valores de los registros de **a.** coliformes totales, **b.** oxígeno disuelto (%), **c.** DBO₅, y **d.** índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO), a lo largo de los diferentes puntos de muestreo

Según el análisis de correspondencia canónica (ACC), los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos explicaron el 61 % de la variabilidad biológica durante el periodo de aguas bajas. Las variables con mayor aporte fueron los nitratos, la temperatura, el hierro, los nitritos y el pH, sin embargo, ninguna fue lo suficientemente significativa para explicar el comportamiento de la familia Elmidae en el río Ocoa (prueba de Monte Carlo para el primero y todos los ejes canónicos: $F=0,000$; $p=1,00$).

A partir del diagrama de ordenación se pudo establecer que los géneros *Huleechius*, *Notelmis* y *Neoelmis* se asociaron con las estaciones 1, 2 y 5 y a parámetros como los coliformes totales, la DBO₅, la DQO, los sulfatos y el amonio. *Microcylloepus* se relacionó principalmente con las estaciones 10 y 14, pero no se asoció claramente con ningún parámetro fisicoquímico. Los géneros *Phanocerus*, *Astrolimnius*, *Macrelmis* y *Hexacylloepus* se vincularon con las estaciones 3 y 15 y con la variable de turbidez, aunque la longitud del vector fue poca. Se observó una relación inversa entre el cuadrante I (hierro, nitratos, nitritos, temperatura y pH) con respecto al cuadrante III (DBO, DQO, amonio, coliformes totales y sulfatos) (Figura 2).

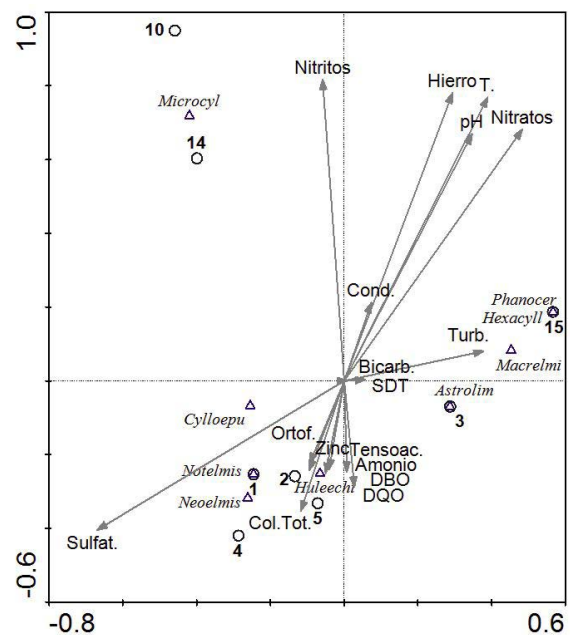


Figura 2. Diagrama de ordenación del análisis de correspondencia canónica (ACC) de los géneros de la familia Elmidae

Discusión

Todos los diez géneros de Elmidae encontrados en la cuenca del río Ocoa se encuentran registrados para Colombia en estudios realizados en los departamentos del Valle del Cauca, Antioquia, Norte de Santander, Chocó, Tolima y Caquetá, entre otros (Castellanos & Serrato, 2008; Posada-García, *et al.*, 2008; Passos, *et al.*, 2010; Llano, 2012; Aguirre-Pabón, *et al.*, 2012; Sondermann, 2013; Zúñiga, *et al.*, 2014; Segura, *et al.*, 2013; González-Córdoba, *et al.*, 2015a, b, 2016 a, b; Mosquera-Murillo & Córdoba-Aragón, 2015). En lo que respecta a la región de la Orinoquia, en el departamento de Arauca se han registrado 11 géneros (González-Córdoba, *et al.*, 2015a), de los cuales siete se registraron nuevamente en el presente estudio (*Heterelmis*, *Huleechius*, *Macrelmis*, *Astrolimnius*, *Microcyloopus*, *Cyloopus*, *Phanocerus*), y cuatro no se encontraron (*Hexanchorus*, *Onychelmis*, *Pseudodisersus* y *Xenelmis*). En Vichada se reportaron recientemente los géneros *Hintonelmis* y *Stegoelmis* (González-Córdoba, *et al.*, 2019), y en Meta se conocen diez géneros; Passos, *et al.*, (2010) y Segura, *et al.*, (2013) reportaron los géneros *Disersus* y *Stegoelmis*; González-Córdoba, *et al.*, (2015 a,b) registraron *Pilielmis*, *Neolimnius*, *Hexacyloopus*, *Microcyloopus*, *Neoelmis* y *Xenelmis*, y González-Córdoba, *et al.*, (2019) reportaron *Gyrelmis* e *Hintonelmis*. En este trabajo se suman siete nuevos registros, lo que aumenta a 17 los géneros hallados en el departamento del Meta: *Austrolimnius*, *Heterelmis*, *Cyloopus*, *Huleechius*, *Macrelmis*, *Notelmis* y *Phanocerus*.

Estos registros evidencian que la riqueza genérica de Elmidae con inventario en los ríos de la región es amplia. Por ejemplo, en el río San Juan, departamento de Chocó, inicialmente Mosquera-Murillo & Córdoba-Aragón (2015) registraron cinco géneros (*Heterelmis*, *Cyloopus*, *Phanocerus*, *Macrelmis*, *Disersus*) y, posteriormente, González-Córdoba, *et al.* (2016b) ampliaron a 11 los géneros de Elmidae registrados (*Austrolimnius*, *Hexacyloopus*, *Hexanchorus*, *Microcyloopus*, *Neocyloopus*, *Neoelmis*). Algo parecido ocurrió en el Valle del Cauca, con muestras de los ríos Anchicayá, Cauca, Dagua y San Juan, y en las regiones naturales andina y pacífica, donde se documentaron 16 géneros en total (González-Córdoba, *et al.*, 2015b). Lo anterior permite concluir que los esfuerzos orientados a registrar la diversidad en corrientes tropicales constituye un aporte efectivo al estudio de la fauna de insectos acuáticos dado que aún se desconoce gran parte de estos organismos en la Orinoquia y no hay información publicada o disponible.

Todavía son muchos los estudios necesarios sobre las fuentes hídricas de la región y el departamento, lo que implica que debe haber una gran riqueza por descubrir, sobre todo si se tiene en cuenta que con el estudio de una sola cuenca urbana se registraron diez géneros, de los cuales siete no se habían registrado antes en el departamento. En este sentido, es previsible que haya un aumento considerable de los registros de Elmidae si se llevan a cabo estudios en las

seis grandes cuencas de la región de la Orinoquia: Arauca, Tomo, Vichada, Meta, Guaviare e Inírida, pues conforman un amplio mosaico de ambientes acuáticos naturales y reflejan la gran riqueza de los ecosistemas acuáticos y terrestres (Lasso, *et al.*, 2014; Osorio-Ramírez, *et al.*, 2015).

La gran abundancia y la riqueza del ensamblaje de élmidos en el periodo de aguas bajas puede deberse a las condiciones propicias para el establecimiento de los organismos: la ausencia de cambios bruscos en la estructura física del cauce (sustratos) y una oferta variada y estable de microhábitats (Arias-Díaz, *et al.*, 2007; Lozano, 2014; Serna, *et al.*, 2015; Vásquez, *et al.*, 2014). Sin embargo, es necesario tener presente que la biota acuática soporta diferentes efectos adversos a lo largo de la cuenca (Terneus, *et al.*, 2012; Bielmyer-Fraser, *et al.*, 2017; Martins, *et al.*, 2017; Moreno, *et al.*, 2017; Van, *et al.*, 2017), por ejemplo, la transformación del paisaje con la construcción de vías debida al desarrollo económico en la Orinoquia, y el enriquecimiento orgánico debido a la urbanización, la agricultura y la industrialización (Caicedo, 2016; Mora-Fernández, *et al.*, 2015; Santana, 2010; Slava, 2015), lo que podría favorecer la aparición de organismos adaptados a estas condiciones. Estos efectos son evidentes durante la sequía (Auble, *et al.*, 1994), lo que refleja que hay ensamblajes específicos frente a los diferentes afectaciones a lo largo del río, aumentando así la riqueza general (Bandyopadhyay & De, 2017).

Por otra parte, en el periodo de aguas altas los patrones de lluvia se manifiestan de manera intensa y prolongada, cambiando abruptamente la estructura física del cauce, los microhábitats y la biota (Arias-Díaz, *et al.*, 2007; Vásquez-Ramos, *et al.*, 2010; Terneus, *et al.*, 2012; Aguirre-Pabón, *et al.*, 2012; Serna, *et al.*, 2015), lo cual se reflejó en la disminución de la riqueza de Elmidae con el registro de tan solo dos géneros capaces de soportar estas condiciones: *Microcyloopus* y *Heterelmis*.

Las características de cada una de las estaciones son de vital importancia para la estructura de los ensamblajes de coleópteros en los ecosistemas lóticos, pues factores como la altura, la intervención antrópica, la vegetación de ribera y la disponibilidad de sustratos, entre otros, determinan los ensamblajes (Velásquez & Miserendino, 2003; Caupaz-Flórez, *et al.*, 2006; Giraldo, *et al.*, 2014). En el presente estudio se encontró que las estaciones con mayor intervención antrópica y deterioro del hábitat exhibieron la menor abundancia o la ausencia de élmidos (estaciones 6 a 13). Algunos tramos dentro del casco urbano de Villavicencio reciben vertimientos de origen industrial, urbano y minero, entre otros, que podrían alterar la estructura y la composición de las comunidades de macroinvertebrados (Gamboa, *et al.*, 2008; Lozano, 2014; Martins, *et al.*, 2017).

En ese contexto, los géneros reportados se restringieron a ocho de las 15 estaciones, en especial en los primeros tramos del río. La mayor riqueza genérica se evidenció en las estaciones 1 (532 m s.n.m.) y 15 (241 m s.n.m.), lo cual puede atribuirse a que presentaban el menor número de

afectaciones ambientales y de agentes contaminantes, ya que correspondían a zonas rurales de población reducida, cuyos arroyos son de aguas limpias y presentan una gran oferta de microhábitats, aspectos que favorecen el establecimiento de los coleópteros. Además, los primeros y últimos tramos aún conservan el margen ribereño, por lo que el bosque de ribera sería un componente fundamental de la biota del ambiente acuático y del terrestre, y todos los procesos que se derivan de su interacción (Naiman, *et al.*, 1993; Vidon, *et al.*, 2010).

En las estaciones 1, 2, 3, 4, 5, 14 y 15, se registraron 36 individuos debido a una menor presión antrópica inicial sobre el río y al proceso de recuperación en los tramos más bajos cuando el río ha superado la ciudad y sus aportes de materia orgánica y contaminantes para pasar a zonas donde el uso del suelo es principalmente agrícola (Tabla 1).

Algunos tensores ambientales, como la elevada frecuencia de vertimientos domésticos provenientes de la ciudad, las fincas y las casas aledañas, generalmente tienden a disminuir la riqueza de los organismos acuáticos (Figuroa, *et al.*, 2003). En las estaciones donde no se registraron élmidos (6, 7, 8, 9, 11, 12 y 13), tales afectaciones fueron evidentes y los valores del índice de contaminación por materia orgánica fueron altos (0,7 unidades, calificación “pésima” e “inadecuada”), debido principalmente al alto contenido de coliformes totales, los cuales están estrechamente asociados con la descarga de aguas residuales de las urbanizaciones (Osorio-Ramírez, *et al.*, 2015), condición que parece incidir de manera directa en los elevados niveles de la DBO₅ y la DQO.

Según Roldán (1999), en situaciones extremas de contaminación orgánica solo se encuentran microorganismos. Además, se ha documentado que factores como el tipo de perturbación antrópica, la naturaleza física del cuerpo de agua y sus condiciones fisicoquímicas, tienen un papel crucial en la determinación de la densidad y riqueza de insectos acuáticos en las corrientes (Fossati, *et al.*, 2001; Allan, 2004; Vásquez, *et al.*, 2014). Parámetros como la altitud, el pH del agua, la concentración de oxígeno y la conductividad, así como el uso del suelo, son variables a las cuales los macroinvertebrados acuáticos a menudo responden positiva o negativamente (Ometo, *et al.*, 2000; Arias, *et al.*, 2007).

En los últimos años se han llevado a cabo varios trabajos sobre el orden Coleoptera (García & Fernández, 1994; Santiago-Fragoso & Sandoval-Manrique, 2001; Dos Santos, *et al.*, 2011; Epele & Archangelsky, 2012; Manzo, 2013; González-Córdoba, *et al.*, 2015 a,b, 2016 a,b, 2019; Mosquera-Murillo & Córdoba-Aragón, 2015), que han permitido abrir caminos de investigación orientados a establecer su potencial como indicadores de la calidad del agua. En el estudio de Dos Santos, *et al.*, (2011) se concluyó que la familia Elmidae es sumamente sensible a la contaminación y Arias, *et al.*, (2007) relacionaron la presencia de estos organismos con la baja tolerancia a la materia orgánica y las altas concentraciones de oxígeno. En el presente estudio se encontraron asociaciones puntuales entre

Huleechius, *Notelmis* y *Neoelmis* y las bajas concentraciones de amonio, coliformes totales, sulfatos y DBO₅, todas ellas indicativas de afectación por vertimientos urbanos (McGrane, 2016) y por actividades agrícolas y ganaderas (Bis, *et al.*, 2000; Figuroa, *et al.*, 2003; Egler, *et al.*, 2012; McGrane, 2016).

Ello permitiría suponer que estos géneros no soportan tales condiciones físicas y químicas del agua y que, además, su presencia dependería de la oferta de alimento, los microhábitats y la estabilidad del sustrato dentro de la corriente. Es importante destacar que en las estaciones 1, 2, 3, 4, 5 y 15, en las que se registraron estos organismos, el amonio estuvo por debajo de 0,1 mg.L⁻¹, en tanto que en las restantes el valor fue superior, probablemente por el uso de fertilizantes nitrogenados y la disposición de excretas y de desechos municipales e industriales (Pacheco, *et al.*, 2002).

Asimismo, estos géneros se asociaron con valores bajos de sulfatos, los cuales se presentaron principalmente en las primeras y últimas estaciones, y fueron abundantes en varias de ellas. Los sulfatos en el agua pueden provenir de aguas residuales industriales (Severiche & González, 2012) o por drenajes mineros ricos en sulfatos. Zhao, *et al.*, (2017) encontraron que concentraciones superiores a 100 mgL⁻¹ representaban un alto riesgo para los macroinvertebrados y los ecosistemas acuáticos; en el presente estudio tales concentraciones fueron inferiores a 50 mg.L⁻¹. No se encontraron otros estudios en los que se relacionara la presencia de la familia Elmidae y de los géneros que la conforman con estas u otras variables fisicoquímicas.

Asimismo, el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto varió ampliamente a lo largo de los puntos de muestreo (entre 3 y 120 %), pero en las estaciones 6, 7, 8, 9, 11, 12 y 13 los valores no superaron el 30 %, por lo cual no se registraron élmidos. Estas estaciones corresponden propiamente a los tramos más impactados por la urbanización y cuyo grado de contaminación por materia orgánica, según el ICOMO, corresponde a aguas inadecuadas y pésimas (Figura 1). Esto coincide con lo reportado para la mayoría de los macroinvertebrados acuáticos, pues son sensibles a la reducción del oxígeno disuelto, lo que disminuye su riqueza y abundancia e, incluso, llevan a su desaparición (Jacobsen, *et al.*, 2003; Jacobsen, 2008; Rostgaard & Jacobsen, 2005).

Es importante destacar que se registraron adultos de *Huleechius*, *Heterelmis*, *Microcylloepus* y *Cylloepus* en las estaciones 4, 5 y 14 cuyos valores de oxígeno disuelto oscilaron entre 3 y 26 % (Figura 1), contrario a lo sugerido por Arias, *et al.*, (2007), quienes registraron la preferencia por corrientes con altos de porcentajes de saturación de oxígeno. Por otra parte, *Huleechius* y *Heterelmis*, dos de los géneros más abundantes y de mayor distribución de la familia Elmidae (Braun, *et al.*, 2014; Lozano, 2014; González-Córdoba, *et al.*, 2015b), responden de manera muy variada a las perturbaciones ambientales (Sajami & Huamantico, 2016; Arias, *et al.*, 2007). Además, es importante resaltar

que los adultos de estos cuatro géneros se caracterizan por su respiración por plastrón, pues toman el oxígeno atmosférico, se sumergen en el agua e intercambian el gas con el oxígeno disuelto en ella (**Brown**, 1987), lo cual los hace sensibles a la poca disponibilidad de oxígeno disuelto. Sin embargo, dichos géneros se registraron en las estaciones con tales condiciones (4, 5 y 14), lo que plantea nuevos interrogantes.

Por último, el hierro fue uno de los iones con los que ningún Elmidae presentó asociación, aunque registró valores variables a lo largo de la corriente, y únicamente en las estaciones 1 y 2 no sobrepasó los límites permisibles establecidos por el Decreto 1076 de 2015 ($<1\text{mgFeL}^{-1}$) para la conservación de la vida acuática; las demás estaciones registraron valores entre 1 y 3 mgFeL^{-1} . La carga de hierro ha aumentado en los ecosistemas acuáticos debido a la intensificación de la agricultura, los minerales enriquecidos y los usos silvo-pastoriles del suelo, y aunque sus efectos sobre los animales acuáticos son principalmente indirectos (osmorregulación, metabolismo, calidad de hábitat y alimentos), pueden actuar en conjunto con otros elementos tóxicos y tener fuertes efectos en la red trófica (**Vuori**, 1995). En algunos estudios como el de **Rasmussen & Lindegaard** (1988) se ha encontrado una correlación negativa entre el hierro disuelto en el agua y la abundancia y riqueza taxonómica de los macroinvertebrados acuáticos: con concentraciones superiores a $0,2\text{mgL}^{-1}$ la riqueza disminuyó abruptamente y con $>1\text{mgL}^{-1}$, también la abundancia, en tanto que en concentraciones $>10\text{mgL}^{-1}$ dominaron las familias Chironomidae, Tipulidae (Diptera) y Tubificidae (Oligochaeta).

Por otra parte, **Peters, et al.** (2011) han sugerido que pueden haber varios grupos taxonómicos de macroinvertebrados potencialmente afectados por la exposición a bajos niveles de hierro, pues a pesar de que es un ion que se transforma a hidróxidos en condiciones de $\text{pH} > 7,0$, estas no cambian significativamente con valores entre 6,5 y 7, lo que implica que los organismos siguen estando expuestos a la forma del ion. Sin embargo, se requieren más estudios para comprender el impacto ecotoxicológico de todos los factores y usos del suelo que pueden afectar los ecosistemas y los organismos.

Conclusiones

Se registraron diez géneros de la familia Elmidae en la cuenca del río Ocoa, siete de los cuales son nuevos registros para el departamento del Meta. Los organismos fueron sensibles a la contaminación de origen antrópico y se registró su disminución o ausencia en aquellas estaciones con altos valores de demanda bioquímica de oxígeno y altos contenidos de coliformes totales. Sin embargo, algunos organismos demostraron ser tolerantes a la disminución del oxígeno o al aumento de sulfatos, lo cual evidencia la utilidad de estudios como este para ampliar el conocimiento de la fauna acuática en los diversos ecosistemas acuáticos y aportar información que permita el desarrollo de herramientas de gestión de la biodiversidad en pro de la conservación de la gran riqueza hídrica de la región de los Llanos orientales.

Agradecimientos

Al Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquia Colombiana (ICAOC) de la Universidad de los Llanos. Al Proyecto Cuencas, convenio marco de colaboración No. 5211592 de Universidad de los Llanos y Ecopetrol. A Marcela González Córdoba y María del Carmen Zúñiga por su asesoría taxonómica en el laboratorio del Grupo de Investigaciones Entomológicas de la Universidad del Valle. A los integrantes del Grupo de Investigación en Gestión Ambiental Sostenible (GIGAS). El primer autor agradece al proyecto de inversión “Fortalecimiento de las capacidades de investigación en ciencia, tecnología e innovación del departamento del Meta”, programa de “Formación del capital humano de alto nivel para el departamento del Meta 2015 – Jóvenes Investigadores” de la Gobernación del Meta. Agradecemos, asimismo, a los revisores anónimos que contribuyeron al mejoramiento de este manuscrito.

Contribución de los autores

IAAG contribuyó en la formulación del proyecto, la determinación taxonómica, el análisis y la elaboración del manuscrito. JMVR contribuyó en la formulación del proyecto, el análisis de datos y la redacción del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en torno al desarrollo de la investigación.

Referencias

- Allan, J. D.** (2004). Landscapes and riverscapes: The influence of land use on stream ecosystems. *Annual review of ecology, evolution and systematics*. **35**: 257-284.
- Aguirre-Pabón, J., Rodríguez-Barrios, R., Ospina-Torres, R.** (2012). Deriva de macroinvertebrados acuáticos en dos sitios con diferente grado de perturbación, río Gaira, Santa Marta – Colombia. *Revista Intropica*. **7**: 9-19.
- Archangelsky, M., Manzo, V., Michat, C., Torres, P.** (2009). Coleoptera. En: E. Domínguez y H. R. Fernández, editores. *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biología*. Tucumán, Argentina: Fundación Miguel Lillo. p. 411-468.
- Arias-Díaz, D., Reinoso-Flórez, G., Guevara-Cardona, G., Villa-Navarro, F.** (2007). Distribución espacial y temporal de los coleópteros acuáticos en la cuenca del río Coello (Tolima, Colombia). *Caldasia*. **29** (1): 177-194.
- Auble, G., Friedman, J., Scott, M.** (1994). Relating riparian vegetation to present and future streamflows. *Ecological Applications*. **4**: 544-554.
- Bandyopadhyay, S., De, S.K.** (2017). Spatio-temporal changes in pollution status of the Haora River. En: S. Bandyopadhyay, S. K. De, editores. *Human interference on river health: A study on the Haora River, Tripura, India*. Switzerland: Springer International Publishing. p. 169-181.
- Bielmyer-Fraser, G., Waters, M., Duckworth, C., Patel, P., Webster, B., Blocker, A., Crummey, C., Duncan, A., Nwokike, S., Picariello, C., Ragan, J., Schumacher, E., Tucker, R., Tuttle, E., Wiggins, C.** (2017). Assessment of

- metal contamination in the biota of four rivers experiencing varying degrees of human impact 2017. *Environmental Monitoring Assessment*. **189**: 23-39.
- Bis, B., Zdanowicz, A., Zalewski, M.** (2000). Effects of catchment properties on hydrochemistry, habitat complexity and invertebrate community structure in a lowland river. *Hydrobiologia*. **422/423**: 369-387.
- Braak, C. J. & Smilauer, P.** (2002). CANOCO reference manual and CanoDraw for Windows user's guide: Software for canonical community ordination (version 4.5). Itaca: Microcomputer power.
- Braun, B.M., Salvarrey, A.V., Kotzian, C.B., Spies, M.R., Pires, M.M.** (2014). Diversity and distribution of riffle beetle assemblages (Coleoptera, Elmidae) in montane rivers of Southern Brazil. *Biota Neotropica*. **14** (2): e20130001.
- Brown, H.P.** (1987). Biology of riffle beetles. *Annual review of entomology*. **32**: 253-273.
- Caicedo, G.** (2016). Perspectivas del desarrollo regional local para la Orinoquia. *Orinoquia*. **20**: 1-3.
- Castellanos, P. & Serrato, C.** (2008). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos en un nacimiento de río en el Páramo de Santurbán, Norte de Santander. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **32** (122): 79-86.
- Caupaz-Florez, F., Reinoso, R., Guevara, G., Villa-Navarro, F.A.** (2006). Diversidad y distribución de la familia Elmidae (Insecta: Coleoptera) en la cuenca del río Prado (Tolima, Colombia). *Asociación Colombiana de Limnología-Neolimnos*. **1**: 106-116.
- Chao, A., Gotelli, N. J., Hsieh, T. C., Sander, E. L, Ma, K. H., Colwell, R. K., Ellison A. M.** (2014). Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: A framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecological Monographs*. **84**: 45-67.
- Dos Santos, D., Molineri, C., Reynaga, M., Basualdo, C.** (2011). Which index is the best to assess stream health? *Ecological Indicators*. **11**: 582-589.
- Egler, M., Buss, D., Moreira, J.C., Baptista, D.F.** (2012). Influence of agricultural land-use and pesticides on benthic macroinvertebrate assemblages in an agricultural river basin in southeast Brazil. *Brazilian Journal of Biology*. **72** (3): 437-443.
- Epele, L. & Archangelsky, M.** (2012). Spatial variations in water beetle communities in arid and semi-arid Patagonian wetlands and their value as environmental indicators. *Zoological Studies*. **51** (8): 1418-1431.
- Ferreira-JR, N., Sampaio, B.H., Fernandes, A.S., Clarkson, B., Braga, R.B., Passos, M.I.S, Santos, A. D.** 2014. *Ordem Coleoptera*. En: Hamada, N., J. L. Nessimian y R. B. Querino, editores. *Insetos aquáticos na Amazônia brasileira: taxonomia, biologia e ecologia*. Manaus, Brazil: Editora do INPA. p. 349-376.
- Figuroa, R., Valdovinos, C., Araya, E., Parra, O.** (2003). Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de calidad de agua de ríos del sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*. **76** (1993): 275-285.
- Fossati, O., Wasson, J., Salinas, C., Marin, R.** (2001). Impact of sediment releases on water chemistry and macroinvertebrate communities in clear water Andean streams (Bolivia). *Archiv für Hydrobiologie*. **151** (1): 33-50.
- Gamboa, M., Reyes, R., Arrivillaga, J.** (2008). Macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de salud ambiental. *Boletín de malariología y salud ambiental*. **48** (2): 109-109.
- García, F. & Fernández, M.** (1994). Distribución longitudinal de Hydraenidae y Elmidae (Coleoptera) en la cuenca del río Órbigo (León, España). *Orsis*. **9**: 37-57.
- Giraldo, L.P., Chará, J., Zúñiga, M. D. C., Chará, A., Pedraza, G.** (2014). Impacto del uso del suelo agropecuario sobre macroinvertebrados acuáticos en pequeñas quebradas de la cuenca del río La Vieja (Valle del Cauca, Colombia). *Revista Biológica Tropical*. **62** (2): 203-219.
- González-Córdoba, M., Zúñiga, M. D. C., Torres-Zambrano, N. N., Manzo, V.** (2015a). Primer registro de las especies *Neolimnius palpalis* Hinton y *Pilielmis apama* Hinton (Coleoptera: Elmidae: Elminae) para Colombia y la cuenca del río Orinoco. *Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle*. **16** (1): 27-33.
- González-Córdoba, M., Zúñiga, M. D.C., Manzo, V.** (2015b). Riqueza genérica y distribución de Elmidae (Insecta: Coleoptera, Byrrhoidea) en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. *Biota Colombiana*. **16** (2): 51-74.
- González-Córdoba, M., Zúñiga, M.D.C., Manzo, V., Giraldo, L., Chará, J.** (2016a). *Notelmis* Hinton y *Onychelmis* Hinton (Coleoptera: Elmidae: Elminae) de Colombia: claves taxonómicas ilustradas. *Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle*. **16** (2): 1-17.
- González-Córdoba, M., Zúñiga, M. D. C., Mosquera-Murillo, Z., Sánchez-Vásquez, S.** (2016b). Riqueza y distribución de Elmidae (Insecta: Coleoptera: Byrrhoidea) en el departamento del Chocó, Colombia. *Revista Intropica*. **11**: 85-95.
- González-Córdoba, M., Zúñiga, M. D. C., Manzo, V., Granados-Martínez, C., Panche, J.** (2019). Nuevos registros y datos de distribución de diez especies y cuatro géneros de élmidos (Coleoptera: Elmidae) para Colombia. *Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. U. de Caldas*. **23** (1): 247-266. Doi: 10.17151/bccm.2019.23.1.11.
- Gutiérrez-Fonseca, P.** (2010). Guía ilustrada para el estudio ecológico y taxonómico de los insectos acuáticos del Orden Coleoptera en El Salvador. En: M. Springer, J. M. Sermeño-Chicas, editores. *Formulación de una guía metodológica estandarizada para determinar la calidad ambiental de las aguas de los ríos de El Salvador, utilizando insectos acuáticos*. San Salvador, El Salvador: Editorial Universitaria UES. p. 1-64.
- Hsieh, T. C., Ma K. H., Chao A.** (2019). iNEXT: iNterpolation and EXTrapolation for species diversity. R package version 2.0.19. Fecha de consulta: 13 de marzo de 2019. Disponible en: <http://chao.stat.nthu.edu.tw/blog/software-download/>
- Jäch, M.A., Balke, M.** 2008. Global diversity of water beetles (Coleoptera) in freshwater. *Freshwater animal diversity assessment*. *Hydrobiologia*. **595**: 419-442.
- Jacobsen, D., Rostgaard, S., Vásconez, J.** (2003). Are macroinvertebrates in high altitude streams affected by oxygen deficiency? *Freshwater Biology*. **48**: 2025-2032.
- Jacobsen, D.** (2008). Low oxygen pressure as a driving factor for the altitudinal decline in taxon richness of stream macroinvertebrates. *Oecologia*. **154**: 795-807.
- Lasso, C., Rial, A., Colonnello, G., Machado-Allison, A., Trujillo, F.** (2014). XI Humedales de la Orinoquia (Colombia-Venezuela). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D. C., 303 p.

- Leps, J., Smilauer, P.** (2003). Multivariate analysis of ecological data using CANOCO. Cambridge University Press. New York, 283 p.
- Lozano, J.** (2014). Estudio de la distribución espacial de coleópteros acuáticos en la cuenca del río Alvarado (Tolima, Colombia). Tesis de grado. Universidad de Tolima, Facultad de Ciencias Básicas, Ibagué, Tolima, 96 p.
- Llano, C.** (2012). Respuesta de los macroinvertebrados bentónicos a las condiciones de calidad de agua en el tramo medio-alto del río Felidia, cuenca del río Cali, Valle del Cauca-Colombia. Trabajo de grado. Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali. 102 p.
- Manzo, V.** (2005). Key to the South American genera of Elmidae (Insecta: Coleoptera) with distributional data. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*. **40**: 201-208.
- Manzo, V.** (2013). Los élmidos de la región Neotropical (Coleoptera: Byrrhoidea: Elmidae): diversidad y distribución. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*. **72** (3-4): 199-212.
- Martins, R., Couceiro, S., Melo, A., Moreira, M.** (2017). Effects of urbanization on stream benthic invertebrate communities in Central Amazon. *Ecological Indicators*. **73**: 480-491.
- Mora-Fernández, C., Peñuela-Recio, L., Castro-Lima, F.** (2015). Estado del conocimiento de los ecosistemas de las sabanas inundables en la Orinoquia Colombiana. *Orinoquia*. **19** (2): 254-271.
- 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 biol. Colomb.* **22** (3): 274-306.
- Mosquera-Murillo, Z. & Córdoba-Aragón, K.** (2015). Caracterización de la entomofauna acuática en cuatro quebradas de la cuenca del río San Juan, Chocó, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **39** (150): 67-76.
- McGrane, S.J.** (2016). Impacts of urbanization on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. *Hydrological Sciences Journal*. **61** (13): 2295-2311. Doi: 10.1080/02626667.2015.1128084
- Naiman, R.J., Decamps, H., Pollock, M.** (1993). The Role of Riparian Corridors in Maintaining Regional Biodiversity. *Ecological Applications*. **3** (2): 209-212.
- Ometo, J., Martinelli, L., Gessner, M.V., Krusche, A., Victoria, R., Cena, M.** (2000). Effects of land use on water chemistry and macroinvertebrates in two streams of the Piracicaba River basin, south-east Brazil. *Freshwater Biology*. **44**: 327-337.
- Osorio-Ramírez, D., Díaz-Celis, O., Caro-Caro, C.I., Duque-Cabrera, J.** (2015). Generalidades del área de estudio. En: M. A. Torres-Mora, C. I. Caro-Caro, H. Ramírez-Gil, S. L. Parada-Guevara, J. M. Trujillo-González, R. E. Ajiaco-Martínez, O. D. Díaz-Celis, editores. Cuenca alta del río Meta: una mirada socioambiental a los ríos Guayuriba y Ocoa y al caño Quenane-Quenanito. Villavicencio, Colombia: Universidad de los Llanos. p. 12-65.
- Pacheco, J., Pat, R., Cabrera, A.** (2002). Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. *Ingeniería*. **6** (3): 73-81.
- Passos, M., Fernández, A., Hamada, N., Nessimian, J.** (2010). Insecta, Coleoptera, Elmidae, Amazon region. *Check List*. **6** (4): 538-545.
- Peters, A., Crane, M., Adams, W.** (2011). Effects of Iron on Benthic Macroinvertebrate Communities in the Field. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. **86**: 591-595. Doi: 10.1007/s00128-011-0283-2
- Posada-García, J., Abril-Ramírez, G., Parra-Sánchez, L.** (2008). Diversidad de los macroinvertebrados acuáticos del páramo de Frontino (Antioquia, Colombia). *Caldasia*. **30** (2): 441-455.
- Ramírez, A., Restrepo, R., Viña, G.** (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. *Formulaciones y aplicación. Ciencia, Tecnología y Futuro*. **1** (3): 135-153.
- Rasmussen, K. & Lindegaard C.** (1988). Effects of iron compounds on macroinvertebrate communities in a Danish Lowland river system. *Water Research*. **22** (9): 1101-1108. Doi:10.1016/0043-1354(88)90004-8
- Roldán, G.** (1999). Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad de agua. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **23** (88): 375-387.
- Roldán, G.** (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **40** (155): 254-274.
- Rostgaard, S. & Jacobsen, D.** (2005). Respiration rate of stream insects measured in situ along a large altitude range. *Hydrobiologia*. **549**: 79-98. Doi: 10.1007/s10750-005-4165-7
- RStudio Team.** (2015). RStudio: Integrated Development for R. Studio, Inc., Boston, MA. <http://www.rstudio.com/>
- Sajamí, J.I. & Huamantínco, A.A.** (2016). Distribución espacial de Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera y Coleoptera (Insecta) en una quebrada de primer orden, bosque montano, Junín, Perú. *Revista Peruana de Biología*. **23** (2): 95-102. Doi: 10.15381/rpb.v23i2.12377
- Salles, F.F. & Ferreira-Junior, N.** (2014). Hábitat e hábitos. En: N. Hamada, J. L. Nessimian, R. B. Querino, editores. Insetos aquáticos na Amazônia brasileira: taxonomia, biologia e ecologia. Manaus, Brazil: Editora do INPA. p. 39-49.
- Santana, E.** (2010). Editorial: El reconocimiento de la biodiversidad regional. *Orinoquia*. **14** (1): 1-3.
- Santiago-Fragoso, S. & Sandoval-Manrique, J.** (2001). Coleópteros acuáticos y su relación con la dinámica fisicoquímica del río Cuautla (Tramo Tetelcingo-Anenelcuico, Morelos, México). *Revista Hidrobiológica*. **11** (1): 19-30.
- Segura, M.O., Passos, M.I.S., Fonseca-Gessner, A., Froehlich, C.** (2013). Elmidae Curtis, 1830 (Coleoptera, Polyphaga, Byrrhoidea) of the Neotropical region. *Zootaxa*. **3731** (1): 001-057.
- Severiche, C. & González, H.** (2012). Evaluación analítica para la determinación de sulfatos en aguas por método turbidimétrico modificado. *Ingenierías USBMed*. **3** (2): 6-11.
- Serna, D., Tamaris-Turizo, C., Gutiérrez, L.** (2015). Distribución espacial y temporal de larvas de Trichoptera (Insecta) en el río Manzanares, Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia). *Revista de Biología Tropical*. **63** (2): 465-477.
- Sondermann, W.** (2013). ¿Está la fauna colombiana de élmidos fuertemente marcada por elementos neárticos? Análisis a distancia de nombres de géneros provistos en 30 inventarios de macroinvertebrados bentónicos recientemente publicados: (Coleoptera: Byrrhoidea: Elmidae). *Revista Dugesiana*. **20** (2): 251-260.

- Slava, P.R.** (2015). Editorial: ¿Carecemos de inteligencia territorial para promover un modelo productivo responsable en la Orinoquia? *Orinoquia*. **19** (1): 1-3.
- Slipinski, S.A., Leschen, R.A.B., Lawrence, J.F.** (2011). Order Coleoptera Linnaeus, 1758. En: Z.Q. Zhang, editor. *Animal biodiversity: An outline of higher-level classification and survey of taxonomic richness (Zootaxa, 3148)* (203-208). Auckland, New Zealand: Magnolia Press. p. 237.
- Terneus, E., Hernández, K., Racines, M.** (2012). Evaluación ecológica del río Lliquino a través de macroinvertebrados acuáticos, Pastaza - Ecuador. *Revista de Ciencias*. **16**: 31-45.
- Torres-Mora, M., Caro-Caro, C.I., Ramírez-Gil, H., Parada-Guevara, S., Trujillo-González, J., Ajiaco-Martínez, R., Osorio-Ramírez, D., Díaz-Celis, O.** (2015). Cuenca alta del río Meta: una mirada socioambiental a los ríos Guayuriba y Ocoa y al caño Quenane-Quenanito. Villavicencio, Colombia: Universidad de los Llanos. p. 172.
- Van, K., Piffady, J., Floury, M.** (2017). At what scale and extent environmental gradients and climatic changes influence stream invertebrate communities? *Science of the Total Environment*. **580**: 34-42.
- Vásquez-Ramos, J., Ramírez-Díaz, F., Reinoso-Flórez, G.** (2010). Distribución espacial y temporal de los tricópteros inmaduros en la Ccenca el río Totare (Tolima-Colombia). *Caldasia*. **32** (1): 129-148.
- Vásquez-Ramos, J.M., Guevara-Cardona, G., Reinoso-Flórez, G.** (2014). Factores ambientales asociados con la preferencia de hábitat de larvas de tricópteros en cuencas con bosque seco tropical (Tolima, Colombia). *Revista de Biología Tropical*. **62** (2): 21-40.
- Velásquez, S. M. & Miserendino, M.L.** (2003). Análisis de la materia orgánica alóctona y organización funcional de macroinvertebrados en relación con el tipo de hábitat en ríos de montaña de Patagonia. *Ecología Austral*. **13**: 67-82.
- Vidon, P., Allan, C., Burns, D., Duval, T.P., Gurwick, N., Inamdar, S., Lowrance, S., Okay, J., Scott, D., Sebestyen, S.** (2010). Hot spots and hot moments in riparian zones: Potential for improved water quality management. *Journal of the American Water Resources Association*. **46** (2): 278-298.
- Von Ellenrieder, N.** (2007). Composición y estructura de asociaciones de insectos acuáticos de arroyos de selva nublada de Yungas del NO argentino. *Revista de la Sociedad de Entomología de Argentina*. **66** (3-4): 57-76.
- Vuori, K.** (1995). Direct and indirect effects of iron on river ecosystems. *Annales Zoologici Fennici*. **32**: 317-329.
- White, D.S., Roughley, R.E.** (2008). Coleoptera. En: R.W. Merritt, Cummins, K.W., M.B. Berg, editors. *An introduction to the aquatic insects of North America*. Iowa, USA: Kendall/Hunt Publishing Company. p. 571-671.
- Zhao, Q., Guo, F., Zhang, Y., Ma, S., Jia, X., Meng, W.** (2017). How sulfate-rich mine drainage affected aquatic ecosystem degradation in northeastern China, and potential ecological risk. *Science of the Total Environment*. **609**: 1093-1102.
- Zúñiga, M.D.C., Cardona, W., Molineri, C., Mendivil, J., Cultid, C., Chará-Serna, A.M., Giraldo, A.** (2014). Entomofauna acuática del Parque Nacional Natural Gorgona, Pacífico colombiano, con énfasis en Ephemeroptera y Plecoptera. *Revista de Biología Tropical*. **62** (1): 221-241.

El Niño-Oscilación del Sur, fase Modoki, y sus efectos en la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia

Estefanía Navarro-Monterroza, Paola A. Arias*, Sara C. Vieira

Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Resumen

Se analizó la posible influencia del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia a partir de registros de estaciones *in situ* durante el periodo 1970-2015 y de datos provenientes de registros satelitales disponibles a partir de 1998. Mediante los índices de temperatura superficial del mar (TSM) asociados al fenómeno ENOS, se evaluaron las anomalías en la precipitación por trimestre para cada tipo de evento, así como las correlaciones mensuales simultáneas y rezagadas entre cada índice y las anomalías en la precipitación. Con base en la información satelital se concluyó que en gran parte del país hubo una mayor precipitación durante los eventos de La Niña Modoki que durante La Niña Canónica en el trimestre de diciembre, enero y febrero, en tanto que la precipitación disminuyó más en la fase canónica de El Niño que en la fase Modoki. La significación estadística de las correlaciones rezagadas evidenció la influencia de la TSM del Pacífico este en las anomalías en la precipitación en Colombia con un rezago de 0 hasta 6 meses. Los resultados de este trabajo aportaron una mayor claridad sobre las variaciones de la distribución de la precipitación y la disponibilidad de agua en Colombia durante las diversas fases del fenómeno de ENOS, lo cual contribuye a la búsqueda de un manejo más eficiente del recurso hídrico. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: ENOS; Modoki; Variabilidad espacio-temporal; Precipitación; Colombia.

El Niño/Southern Oscillation Modoki and its effects on the spatiotemporal variability of precipitation in Colombia

Abstract

The possible influence of the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) phenomenon on the spatiotemporal variability of the precipitation in Colombia is analyzed considering precipitation records from rain gauge dataset during the period 1970-2015, as well as records from satellite datasets available for the period 1998 to present. Based on sea surface temperature indexes associated with the ENSO phenomenon, we evaluated seasonal rainfall anomalies for each type of ENSO event, as well as monthly simultaneous and lagged correlations between ENSO indexes and precipitation anomalies. Results from the satellite data showed that there was more precipitation during La Niña Modoki than during the Canonical La Niña events in most of the country for the December-February period, while there was a larger reduction of precipitation during the canonical events of El Niño than the Modoki events. The statistical significance of lagged correlations showed that there was an influence of the surface temperature anomalies over the eastern Pacific region on precipitation in Colombia for a lag of 0 up to 6 months. This paper provides new insights about variations of precipitation distribution and water availability in Colombia during the different phases of ENSO, which is important for the efficient management of water resources in the region. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: ENSO; Modoki; Spatiotemporal variability; Precipitation; Colombia.

Introducción

El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es un modo de variabilidad interanual de la temperatura superficial del mar (TSM) en el océano Pacífico tropical que se caracteriza por generar claras anomalías climáticas en diferentes regiones del planeta (Rasmusson & Carpenter, 1982). Inicialmente, se denominó El Niño al período durante el cual se presentan anomalías positivas de temperatura (calentamiento) en el este del Pacífico ecuatorial asociadas con un debilitamiento

de los vientos alisios (Wyrтки, 1975); por su parte, La Niña (LN) se refiere al período de anomalías negativas de la temperatura (enfriamiento) asociadas a altas presiones en el Pacífico este tropical y a un fortalecimiento de los vientos alisios, es decir lo contrario de lo que ocurre durante los

*Correspondencia:

Paola A. Arias; paola.arias@udea.edu.co

Recibido: 27 de julio de 2018

Aceptado: 5 de marzo de 2019

Editor: José Pabón Caicedo

eventos de El Niño (**Philander, 1990; Mcphaden, et al., 1998**). Así pues, en los estudios se han establecido dos fases de este fenómeno generadas por las interacciones entre el océano y la atmósfera a las cuales se hace referencia como eventos canónicos.

En estudios recientes se han detectado variaciones de los eventos de El Niño y la La Niña caracterizadas por un patrón de anomalías de la TSM localizadas en el centro del Pacífico tropical y no en el este del océano, como ocurre en las fases canónicas del ENOS, eventos que se conocen con el nombre Modoki. El Niño Modoki se caracteriza por la aparición de anomalías positivas en la TSM en el centro del Pacífico ecuatorial y de anomalías negativas en el este y el oeste del océano (**Ashok, et al., 2007**); por su parte, La Niña Modoki es la fase opuesta, y se caracteriza por una distribución de anomalías de TSM negativas y positivas en estas regiones, respectivamente, contrarias a las que ocurren durante El Niño Modoki (**Ashok, et al., 2009**). Estos eventos, producto de procesos naturales, afectan los esquemas de circulación atmosférica y de variabilidad climática en todo el planeta.

El fenómeno ENOS tiene un impacto significativo a nivel mundial que varía según la región y la temporada; por ejemplo, en Australia tiende a presentarse una época de sequía durante el trimestre de septiembre a noviembre con la aparición de eventos de El Niño, y la magnitud de sus efectos en la hidrología de esa región dependen de qué tan al extremo oriental del océano Pacífico tropical se localicen las anomalías en la TSM (**Wang & Hendon, 2007**). Por otro lado, en el oeste de Estados Unidos se ha evidenciado una mayor frecuencia de sequías y altas temperaturas durante el trimestre de diciembre a febrero, las cuales pueden estar asociadas con El Niño Modoki y con su intensidad (**Weng, et al., 2007**). En otro estudio, **Ropelewski & Halpert (1996)** evaluaron la relación entre los episodios fríos y cálidos del fenómeno ENOS y la distribución de la precipitación en diferentes regiones del mundo, y señalaron que en África la relación entre las anomalías de la TSM del Pacífico ecuatorial y la precipitación es poco significativa durante los eventos de La Niña, en tanto que durante El Niño se experimentan condiciones de sequía en el sureste del continente. Los cambios generados durante los diferentes eventos de ENOS en la climatología global son evidentes, por lo que la investigación de estos temas es fundamental para una mejor comprensión de su comportamiento y de su impacto a nivel local.

En Suramérica se han hecho diversos estudios sobre el impacto de los diferentes eventos del fenómeno de ENOS en el régimen de precipitación. Entre ellos se encuentra el de **Grimm, et al. (2000)**, en el que se analizan las anomalías en la precipitación y en la circulación debidas a los eventos de El Niño y La Niña. Los autores encontraron que el sur de Brasil era la región que sufría el impacto más fuerte en la precipitación durante los episodios de El Niño, en tanto que en algunas áreas del este de los Andes en el sur de Suramérica se observaron anomalías positivas

en la precipitación durante el trimestre de septiembre a noviembre. Por su parte, **Silva (2012)** encontró que en este mismo trimestre El Niño Modoki generaba anomalías positivas de lluvia al sur del sureste de Suramérica asociadas con un ciclón barotrópico en el Pacífico central ecuatorial. En los estudios de **Tedeschi, et al. (2012, 2016a, 2016b)** se analizó la influencia de los episodios canónicos y Modoki del ENOS y de sus eventos extremos en el patrón espacial de la precipitación en Suramérica. Estos trabajos demuestran que es fundamental tener en cuenta tanto la fase canónica como la Modoki del ENOS cuando se estudia la variabilidad de la precipitación para un mejor monitoreo de las condiciones hidrológicas en una región.

En Colombia, **Poveda, et al. (1998)** analizaron la influencia de los eventos de El Niño y La Niña en la variabilidad interanual de la hidroclimatología local y encontraron que la correlación entre las anomalías de la TSM en el océano Pacífico este ecuatorial y la precipitación era más fuerte durante el trimestre de diciembre a febrero y, en algunos casos, durante junio, julio y agosto, en tanto que la correlación se debilitaba en el período de marzo, abril y mayo. Asimismo, **Córdoba-Machado, et al. (2015)** estudiaron la influencia del fenómeno ENOS en el régimen de precipitación en Colombia y observaron que las áreas del norte, el centro y el occidente del país experimentaban una reducción de la precipitación durante los eventos de El Niño en los trimestres de diciembre a febrero, junio a agosto y septiembre a noviembre, en tanto que en otras localidades ocurrían anomalías positivas en el régimen de precipitación durante estos períodos. Los autores también señalaron que durante los episodios de El Niño Modoki había una reducción de los valores de la precipitación en el suroccidente de Colombia durante el trimestre de septiembre a noviembre, en tanto que observaron un comportamiento contrario durante los eventos de El Niño, ya que en este periodo se registraron anomalías positivas en la precipitación.

Dada la clara influencia que cada uno de los episodios del fenómeno de ENOS ejerce en el régimen de precipitación de Colombia y la necesidad de mejorar la predicción del impacto futuro de estos eventos en la hidrología, en el presente estudio se analizó el impacto de los episodios canónicos y Modoki del fenómeno ENOS en el régimen de precipitación en el país durante los cuatro trimestres del año a partir de registros *in situ* y satelitales de precipitación, con el fin aportar al conocimiento de los efectos de los diferentes episodios de este fenómeno en distintas regiones del país.

Materiales y métodos

Datos. Se emplearon tres bases de datos para el análisis de la variabilidad espacio-temporal del régimen de precipitación en Colombia durante los eventos de El Niño, El Niño Modoki, La Niña y La Niña Modoki. El primer conjunto de datos incluye los registros diarios de la TSM provenientes de la reconstrucción extendida de la TSM (*extended reconstructed sea surface temperatura, ERSST*), versión

4, de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) desde 1854 hasta el presente, con una resolución de 2° de latitud y 2° de longitud. Con esta primera base de datos se clasificaron los trimestres de incidencia de cada uno de los eventos ENOS para el período de 1970 a 2015 a partir del índice del Niño 3 para el caso de los eventos canónicos y del índice *El Niño Modoki Index* (EMI) para los episodios en la fase Modoki. Además, se calcularon los índices del Niño 3.4, el *Oceanic Niño Index* (ONI) y el Niño 4.

La segunda base de datos se obtuvo de la versión 7 del Análisis de Precipitación Multisatelital de la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (*Tropical Rainfall Measuring Mission*, TRMM), la cual corresponde a registros de la precipitación medida en mm/hr desde 1998 hasta el presente, con una resolución de 0,25° x 0,25°. Estos datos satelitales de la precipitación se tomaron para la celda 65°-85° O y 5°S-15°N. En los análisis de este trabajo también se consideraron los registros de precipitación *in situ* del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) durante el período de 1970 a 2015, los cuales se expresan en mm/mes.

Clasificación de los trimestres de presencia de los eventos de ENOS. Para determinar los trimestres según la presencia de El Niño y La Niña, se calcularon las anomalías normalizadas en la región del Niño 3, como lo proponen **Kim, et al.** (2009). A partir del valor de las anomalías calculadas por trimestre durante el período 1970 a 2015, se clasificaron los períodos de incidencia de El Niño durante los cuales se presentaron valores de anomalías normalizadas iguales o superiores a 1,0 y como trimestres de La Niña aquellos en los cuales el valor había sido igual o inferior a -1,0.

Para clasificar los trimestres de presencia de eventos de El Niño Modoki y La Niña Modoki se usó el EMI descrito en la ecuación 1. Este índice tiene en cuenta las anomalías normalizadas de la TSM en tres regiones ubicadas en el centro, este y oeste del océano Pacífico tropical. El EMI fue introducido por **Ashok, et al.** (2007) para determinar los períodos en los cuales ocurre este nuevo modo de acoplamiento entre océano y atmósfera dada su importancia en la variabilidad climática del planeta.

$$EMI = [SSTA]_A - 0,5 [SSTA]_B - 0,5 [SSTA]_C \quad (1)$$

Las variables entre corchetes representan las anomalías de la TSM en cada región; de este modo, la región A está definida entre los 165°E y los 140°O y entre los 10°S y los 10°N; la región B, entre los 110° y los 70°O y los 15°S y los 5°N, y la región C, entre los 125° y los 145°E y los 10°S y los 20°N. En estas áreas se calcularon las anomalías en cada trimestre para el período de 1970 a 2015. A partir de esto, se calculó el EMI con base en la ecuación 1 y se determinaron como trimestres de presencia de El Niño Modoki aquellos en los cuales los valores del EMI fueron iguales o superiores a 0,7 y como trimestres de La Niña Modoki aquellos en los cuales los valores del índice fueron iguales o inferiores a -0,7, como lo sugieren **Ashok, et al.** (2007).

Además de calcular los índices del Niño 3 y el EMI, en el estudio se usaron los índices del Niño 3.4 y el ONI, los cuales caracterizan los eventos canónicos, y el índice del Niño 4, que determina los eventos Modoki. El ONI se basa en las anomalías de la TSM en la región del Niño 3.4, las cuales deben ser superiores a 0,5°C durante tres meses consecutivos en el caso de los eventos de El Niño, e inferiores a -0,5 °C para clasificarlos como eventos de La Niña. Este índice se obtuvo de la base de datos de la NOAA disponible en http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml. Además, se calcularon los índices del Niño 3.4 y el Niño 4 con base en la metodología de **Kim, et al.** (2009), los cuales se definen a partir de las anomalías normalizadas de la TSM en la región del Niño 3.4 y el Niño 4, respectivamente. Los trimestres en los cuales el índice del Niño 3.4 fue superior a 1,0 se determinaron como aquellos con eventos de El Niño, en tanto que en los trimestres en los cuales el índice fue inferior a -1,0 se establecieron como lo que presentaban eventos de La Niña. Los trimestres en los cuales el índice del Niño 4 tuvo valores superiores a 1,0 se establecieron como aquellos con presencia de episodios de El Niño Modoki, en tanto que en la región del Niño 3 las anomalías estuvieron por debajo de ese valor; por último, los trimestres con eventos de La Niña Modoki se establecieron como aquellos en los cuales las anomalías normalizadas de la TSM en la región del Niño 4 estuvieron por debajo de -1, mientras que en la región del Niño 3 estuvieron por encima de ese valor.

Selección de las estaciones del IDEAM. Se hizo un análisis de la calidad de la información en los registros de precipitación de las estaciones del IDEAM correspondientes al período de 1970 a 2015 con lo cual se depuraron los datos de todas las estaciones con registros desde 1970 o anteriores, y se seleccionaron aquellas que contaban con el 95 % de los datos durante el período de 1970 a 2015. A partir de este análisis, se seleccionaron las 48 estaciones que presentaban un 5 % o menos de datos faltantes, con el fin de que al procesar la información y hacerle control de calidad, los resultados no se vieran alterados por la ausencia de datos. En la Tabla 1 se presenta la descripción de cada estación.

Anomalías en la precipitación. Se obtuvieron los mapas con el promedio de las anomalías de precipitación para cada evento (El Niño, El Niño Modoki, La Niña y La Niña Modoki) teniendo en cuenta los trimestres clasificados; además, se obtuvieron los mapas de las diferencias de anomalías entre los eventos canónicos y los Modoki para determinar el impacto asociado con cada evento en el régimen de precipitación en Colombia. Este análisis se hizo con base en la información satelital de la precipitación proveniente de la TRMM para el período de 1998 a 2015 y de las estaciones del IDEAM para el período de 1970 a 2015. El porcentaje de acuerdo en el signo de las anomalías de precipitación entre las bases datos también se calculó con el objeto de determinar el grado de correspondencia entre las bases de datos satelitales y las estaciones *in situ*.

Tabla 1. Estaciones de registro de la precipitación incluidas en la base de datos del IDEAM

Estación	Departamento	Código	Longitud	Latitud	Altura (msnm.)	Precipitación (mm)*	Fecha de instalación	Porcentaje de datos
Vásquez Cobo	Amazonas	48015010	-69,56	-4,11	84	154155,8	1968	100,0
Santa Teresa	Antioquia	11110010	-76,08	6,45	1.370	121208,3	1969	99,6
Buchado	Antioquia	11060010	-76,46	6,25	18	238813,7	1969	99,8
E. Cortissoz	Atlántico	29045020	-74,46	10,53	14	39858,9	1940	99,5
Arauca	Arauca	37055010	-70,44	7,04	128	82447,5	1950	100,0
Rafael Núñez	Bolívar	14015020	-75,30	10,26	2	49441,7	1941	100,0
Guacamayo	Bolívar	25020030	-74,30	8,43	54	210004,8	1966	100,0
El Nispero	Bolívar	29030310	-75,25	9,56	10	69646,7	1969	99,6
Surbata Bonza	Boyacá	24035120	-73,04	5,48	2.485	40634,3	1944	99,8
Chinavita	Boyacá	35070070	-73,21	5,09	1.900	70567,5	1955	99,5
La María	Caldas	26160160	-75,34	5,35	704	115138,8	1962	100,0
La Nubia	Caldas	26155110	-75,28	5,01	2.058	71451,6	1968	99,5
Río Palo	Cauca	26040310	-76,22	3,04	1.100	103824,2	1964	99,6
Gartunduaga	Caquetá	44035020	-75,33	1,35	244	171339,5	1969	99,8
Pto. Mosquito	Cesar	23210010	-73,45	8,11	90	82513,9	1960	100,0
Tamalameque	Cesar	25020090	-73,48	8,51	20	92719,6	1960	99,5
Rincón Hondo	Cesar	25020260	-73,29	9,23	100	113376,3	1963	99,8
El Carano	Chocó	11045010	-76,38	5,41	53	374290,4	1947	99,8
Carmen de Atrato	Chocó	11020010	-76,08	5,54	1.850	120046,8	1958	99,6
Tibaitatá	Cundinamarca	21205420	-74,12	4,41	2.543	31373	1954	99,8
Cañaverales	La Guajira	15060080	-72,50	10,45	230	51097,5	1963	100,0
La Argentina	Huila	21050060	-75,58	2,11	1.500	70566,2	1958	99,8
Mesa Redonda	Huila	21110160	-75,11	3,07	500	52114,1	1969	99,6
Simón Bolívar	Magdalena	15015050	-74,13	11,07	4	24556,9	1962	100,0
Ariguaní	Magdalena	25021250	-74,05	9,54	120	63277	1953	100,0
Antonio Nariño	Nariño	52045020	-77,17	1,23	1.816	58152,9	1957	100,0
Cumbal	Nariño	52050110	-77,47	0,54	3.092	44214,5	1958	100,0
San Luis	Nariño	52055010	-77,40	0,51	2.961	41861,8	1941	100,0
Cucutilla	Norte de Santander	16020080	-72,46	7,32	1.280	86749,4	1955	100,0
Labateca	Norte de Santander	37010010	-72,30	7,17	1.560	47205,3	1955	99,6
El Edén	Quindío	26125060	-75,45	4,27	1.229	99890	1949	99,5
Matecaña	Risaralda	26135040	-75,44	4,48	1.342	109411,5	1947	99,8
Sesquicentena	San Andrés	17015010	-81,42	12,35	1	88652,7	1958	99,6
Jesús María	Santander	24010210	-73,46	5,52	1.920	129220,4	1958	100,0
San Vicente	Santander	24050060	-73,24	6,52	721	91762,3	1958	100,0
Purificación	Tolima	21130010	-74,51	3,51	345	87749,4	1958	99,5
Prado	Tolima	21160040	-74,48	3,44	360	104980,8	1959	99,6
Cabuyal	Valle	26060020	-76,20	3,19	1.000	58655,1	1953	99,8

*Precipitación acumulada en el período 1970-2015

Correlaciones rezagadas. Con el propósito de establecer las anomalías de la precipitación asociadas con los diferentes eventos de ENOS y el tiempo de respuesta del régimen de precipitación durante las diferentes fases de este fenómeno, se analizaron las correlaciones simultáneas y rezagadas por mes entre los índices del Niño 3, el Niño 3.4, el Niño 4, el ONI y el EMI, y las anomalías de precipitación calculadas a partir de la información suministrada por el IDEAM y los datos satelitales de la TRMM, es decir, se analizaron las correlaciones de desfase desde los 0 meses hasta los 11. Además, se calcularon individualmente las correlaciones simultáneas y rezagadas en varias de las estaciones de la base de datos del IDEAM para conocer el comportamiento de la precipitación ante la presencia de episodios de El Niño, El Niño Modoki, La Niña y La Niña Modoki en áreas más localizadas. La significación de estas correlaciones se calculó a partir de una prueba t-Student de dos colas para un nivel de significación de 5 %.

Resultados y discusión

Presencia de eventos de El Niño, La Niña, El Niño Modoki y La Niña Modoki. En la Tabla 2 se muestran los trimestres en que se presentaron los eventos de El Niño, El Niño Modoki, La Niña y La Niña Modoki. Hubo eventos de El Niño en seis ocasiones durante los trimestres de diciembre a febrero, de marzo a mayo, y de junio a agosto, y en ocho ocasiones en el trimestre de septiembre a noviembre. En este caso, se pudieron observar ciclos de 12 meses de incidencia de los eventos de El Niño como el ocurrido a partir del trimestre de septiembre a noviembre de 1982 hasta el de junio a agosto de 1983, el ocurrido a partir del trimestre de diciembre a febrero de 1987 hasta el de septiembre a noviembre de ese mismo año, y el transcurrido desde el trimestre de junio a agosto de 1997 hasta el de marzo a mayo de 1998, lo cual coincide con lo reportado en los estudios de **Grimm & Tedeschi (2009)** y **Córdoba-Machado, et al. (2015)**.

Tabla 2. Años en los que se presentaron los fenómenos de El Niño Canónico, El Niño Modoki, La Niña Canónica y La Niña Modoki

Diciembre a febrero	Marzo a mayo	Junio a agosto	Septiembre a noviembre	Diciembre a febrero	Marzo a mayo	Junio a agosto	Septiembre a noviembre
El Niño Canónico				La Niña Canónica			
1973	1983	1972	1972	1971	1970	1970	1970
1983	1987	1983	1982	1974	1971	1971	1971
1987	1992	1987	1987	1976	1974	1973	1973
1992	1993	1997	1997	1989	1975	1975	1975
1998	1998	2009	2002	2000	1985	1988	1988
2010	2015	2015	2006	2008	1989	1999	1999
			2009		2007	2000	2007
			2015			2007	2010
El Niño Modoki				La Niña Modoki			
1978	1982	1982	1977	1974	1984	1984	1973
1987	1991	1987	1982	1989	1989	1988	1975
1991	1992	1991	1986	1999	1999	1989	1983
1992	1993	1993	1987	2000	2000	1998	1988
1993	1995	1994	1990	2006	2008	1999	1995
1995	1997	2002	1991	2008	2011	2000	1998
2003	2003	2004	1993	2009		2008	1999
2005	2015	2015	1994	2011		2010	2000
2010			2002	2012			2008
2015			2004				2010
			2006				2011
			2009				
			2015				

En el caso de los eventos de El Niño Modoki, se encontró que ocurrieron en diez ocasiones en los trimestres de diciembre a febrero; en ocho ocasiones en los trimestres de marzo a mayo y de junio a agosto, y en 13 ocasiones en el trimestre de septiembre a noviembre, en los cuales el EMI presentó un valor superior a 0,7. En cuanto a los eventos de El Niño Modoki, se presentaron con un ciclo de más de 12 meses entre el trimestre de diciembre a febrero de 1991 hasta el de marzo a mayo de 1992, y con dos ciclos de 12 meses durante los años 1993 y 2015. La presencia de más episodios de El Niño Modoki que de El Niño durante el período de 1970 a 2015 concuerda con los hallazgos de *Ashok, et al.* (2007), *Yeh, et al.* (2009), y *Roxy, et al.* (2013), quienes encontraron que los eventos Modoki ocurrieron a partir de los años 90 con mayor frecuencia, lo cual probablemente está asociado con el calentamiento global.

En la Tabla 2 se presentan los trimestres de incidencia de los eventos de La Niña, es decir, los períodos en los cuales las anomalías normalizadas de la TSM están por debajo de -1,0 en la región del Niño 3. Los eventos de La Niña se presentaron en seis ocasiones en los trimestres de diciembre a febrero; en siete ocasiones en el de marzo a mayo, y en ocho ocasiones en el de junio a agosto y en el de septiembre a noviembre. Entre los ciclos observados para este tipo de evento estuvo el ocurrido desde el trimestre de marzo a mayo de 1970 hasta el de diciembre a febrero de 1971; los datos del ONI reflejan un comportamiento similar de este evento, ya que se observó un ciclo de 18 meses para el evento de La Niña transcurrido entre el trimestre de junio a agosto de 1970 hasta el de diciembre a febrero de 1971. Otros ciclos de menor duración en los cuales se presentó esta fase del ENOS fueron el trimestre de junio a agosto de 1973 hasta el de marzo a mayo de 1974; el de marzo a mayo de 1975 hasta el de diciembre a febrero de 1976; el de junio a agosto de 1988 hasta el de marzo a mayo de 1989, y el de marzo a mayo del 2007 hasta el de diciembre a febrero de 2008.

El evento de La Niña Modoki ocurrió en nueve ocasiones en el trimestre de diciembre a febrero; en seis ocasiones en el trimestre de marzo a mayo; en ocho ocasiones en el de junio a agosto, y en 11 ocasiones en el de septiembre a noviembre, durante los cuales el EMI presentó un valor inferior a -0,7. A partir del trimestre de junio a agosto de 1988 hasta el mismo trimestre de 1989, se observó uno de los ciclos de este evento durante el período de 1970 a 2015; otro ciclo comprendió el período entre el trimestre de junio a agosto de 1998 hasta el de diciembre a febrero del 2000, y un tercer ciclo se observó entre el trimestre de diciembre a febrero de 2008 hasta el mismo trimestre de 2009. Estos períodos de incidencia del evento de La Niña Modoki fueron bastante similares a los reportados por *Córdoba-Machado, et al.* (2015) en su estudio, en el cual pudieron observar amplios períodos en los que ocurrió esta fase del ENOS durante esos mismos años. En el presente estudio se reporta el último ciclo de 12 meses en el que ocurrió el evento de La Niña Modoki entre el trimestre de junio a agosto de 2010 hasta el de marzo a mayo de 2011.

A continuación se analizan las anomalías de precipitación en Colombia asociadas con los diferentes eventos del ENOS para los trimestres de diciembre a febrero y de junio a agosto, temporadas en las que se observaron los mayores y los menores efectos, respectivamente.

Anomalías en la precipitación durante el trimestre de diciembre a febrero. En la Figura 1 se presentan las anomalías de precipitación registradas en el trimestre de diciembre a febrero para cada tipo de evento del fenómeno de ENOS con base en los datos obtenidos de la TRMM durante el período de 1998 a 2015 y la información suministrada por el IDEAM durante el período de 1970 a 2015. Los datos de la TRMM evidencian que durante los eventos de El Niño hubo marcadas anomalías negativas en el sur y el occidente del país, en tanto que en el norte, oriente y parte del centro de Colombia se presentaron anomalías negativas con menor intensidad. Por otro lado, los datos registrados en las estaciones del IDEAM reflejaron anomalías de precipitación negativas en gran parte del territorio, con excepción de algunas estaciones ubicadas hacia el occidente, en el departamento de Chocó, de otra estación en el suroccidente y de otra en el sur del departamento de Amazonas, las cuales registraron valores positivos. La información obtenida de las estaciones evidenció que la zona norte de país presentó homogeneidad en la magnitud de las anomalías negativas, en tanto que en la zona andina los valores de magnitud fueron más variables y en algunas estaciones se pudo comprobar, incluso, que el régimen de precipitación puede no verse afectado por este evento, pues se registraron valores de anomalías cercanos a 0. El porcentaje de acuerdo en el signo de las anomalías de precipitación entre la información de la TRMM y la del IDEAM fue de 71 %.

Durante los eventos de El Niño Modoki, las anomalías negativas de precipitación se presentaron en las áreas central, oeste y norte de Colombia, siendo más débiles que las anomalías ocurridas durante el evento de El Niño, lo que coincide con lo reportado por *Tedeschi, et al.* (2015). Este patrón se observó tanto en los datos de la TRMM como en la información del IDEAM. Para el evento de El Niño Modoki, las bases de datos registraron un porcentaje de acuerdo en el signo de las anomalías de precipitación de 84,2 %. Hacia el sur del país, los valores de las anomalías fueron positivos, aunque en algunas estaciones se registraron valores de anomalías positivas en el occidente y el suroccidente. Durante los eventos de El Niño predominaron condiciones más secas de lo normal en todo el país, en tanto que durante los de El Niño Modoki el comportamiento del régimen de precipitación ante las anomalías de la TSM en el Pacífico tropical no fue generalizado en cuanto al signo. Las diferencias en los efectos generados por El Niño Canónico y El Niño Modoki fueron más evidentes en los datos satelitales que en los de las estaciones del IDEAM. La mayor diferencia se encontró en la zona del suroriente y el occidente de Colombia con base en la información de la TRMM, en tanto que en el área del norte y parte del centro del

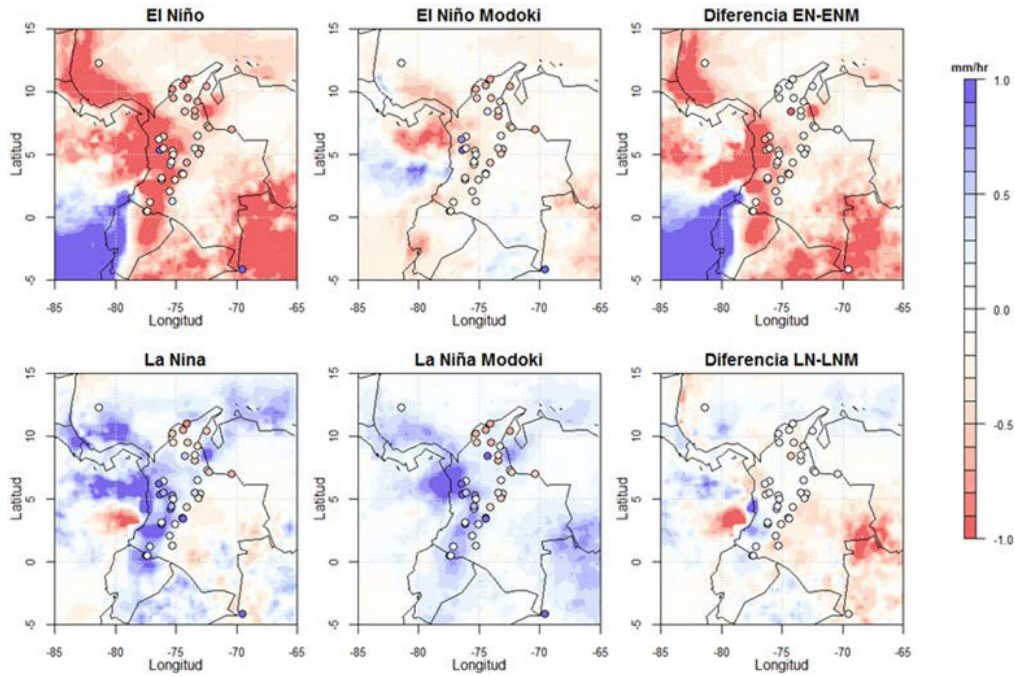


Figura 1. Anomalías de precipitación durante los eventos de El Niño, El Niño Modoki, La Niña y La Niña Modoki y diferencia entre los eventos canónicos y los Modoki para el trimestre de diciembre a febrero. En colores se presentan las anomalías obtenidas de los registros de la TRMM y con círculos, aquellas correspondientes a los datos suministrados por el IDEAM.

territorio, el impacto de estos dos eventos en la precipitación varió poco en los dos tipos de datos. En algunas estaciones del IDEAM se evidenciaron diferencias significativas en los valores negativos entre los dos eventos de El Niño, lo que quiere decir que en ellas la precipitación durante El Niño Modoki fue mayor que durante El Niño y evidencia una atenuación en el efecto de la fase de El Niño en la precipitación de la región. Dos de esas estaciones están en el oeste y otra, más al norte. En el resto de estaciones las diferencias fueron casi nulas.

Los eventos de La Niña se han asociado con anomalías positivas en la precipitación en la región norte de Suramérica en diferentes periodos (Tedeschi, *et al.*, 2012). Sin embargo, si se hace una análisis más local, puede observarse que para el caso de Colombia los datos satelitales evidencian anomalías negativas de precipitación en el centro, oriente y sur del país durante el trimestre de diciembre, enero y febrero; además, las anomalías registradas en las estaciones *in situ* presentaron valores negativos en el norte, con excepción de una estación. Tanto con los datos de la TRMM como con los del IDEAM reflejaron las anomalías positivas asociadas con eventos de La Niña en el occidente y suroccidente del país. En cuanto al fenómeno de La Niña Modoki, según la información de la TRMM ocurrió un aumento de la precipitación en casi todo el territorio, con claras anomalías positivas hacia el occidente y el suroccidente, lo que concuerda con los datos del IDEAM. Hacia el norte, las estaciones *in situ* registraron anomalías negativas de precipitación con valores muy similares a los

de La Niña, como puede observarse en el mapa que muestra las diferencias. Los datos satelitales también evidenciaron que en gran parte del territorio colombiano hubo mayor precipitación durante los eventos de La Niña Modoki que durante La Niña, con excepción de algunas zonas en el norte y el suroccidente del país. El porcentaje de acuerdo en el signo de las anomalías de precipitación entre los datos de la TRMM y la información suministrada por el IDEAM fue de 68,4 % para los episodios de La Niña y de 57,9 % para los del La Niña Modoki.

Anomalías de precipitación durante el trimestre de junio a agosto. En la Figura 2 se presentan los mapas de las anomalías de precipitación para cada evento del fenómeno ENOS durante el trimestre de junio a agosto. Según los datos de la TRMM, durante la incidencia de los eventos de El Niño hubo anomalías negativas en el norte, occidente y centro del país, en tanto que hubo claras anomalías positivas en la parte sur y oriente. En ese trimestre, los efectos de El Niño no tendieron a generar una sequía generalizada, ya que el impacto varió dependiendo de la región. La mayoría de los datos del IDEAM exhibieron anomalías negativas, especialmente en el área andina y en el norte, lo que concuerda con los datos de la TRMM. En algunas estaciones se registraron anomalías positivas en algunas partes del territorio colombiano, lo cual coincidió con la información satelital en las estaciones ubicadas en el nororiente y en el suroccidente. El porcentaje de acuerdo en el signo de las anomalías de precipitación entre la información *in situ* y la satelital fue de 78,9 %.

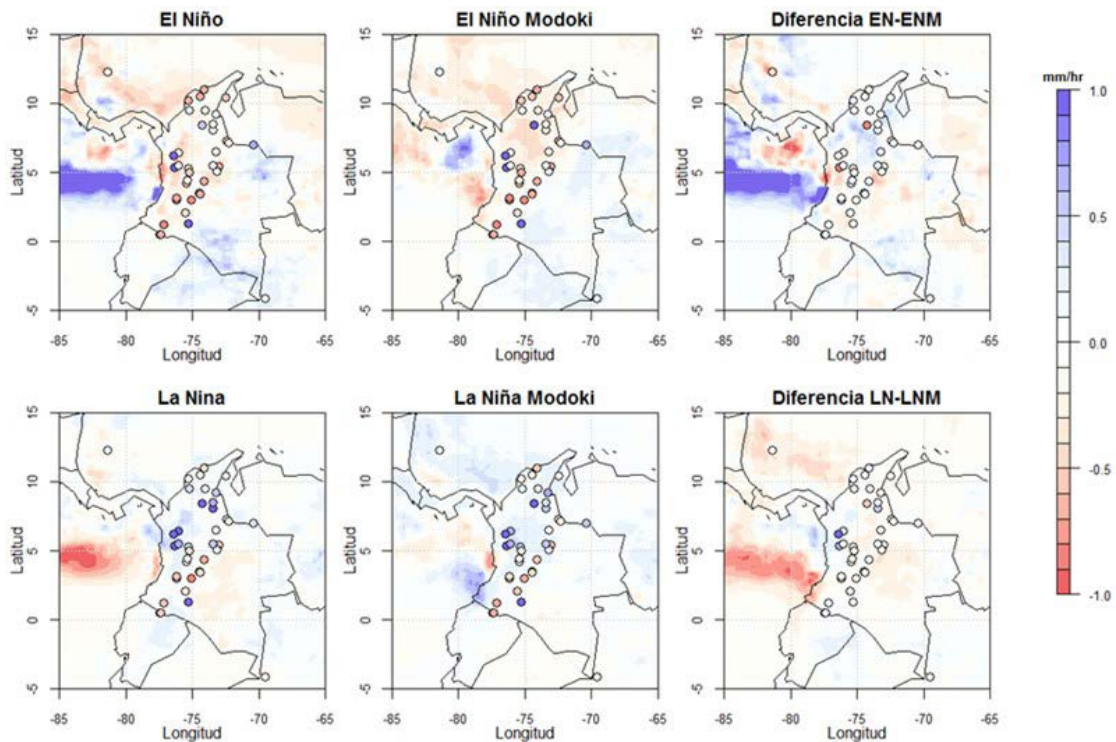


Figura 2. Anomalías de precipitación durante los eventos de El Niño, El Niño Modoki, La Niña y La Niña Modoki y diferencia entre los eventos canónicos y los Modoki para el trimestre de junio a agosto

En el mapa de la precipitación durante los eventos de El Niño Modoki, los datos de la TRMM evidenciaron claras anomalías negativas en el norte y parte del occidente de Colombia, lo que también ocurrió en la gran mayoría de las estaciones del IDEAM ubicadas en esas zonas; en el oriente, el sur y el suroccidente se observaron anomalías positivas con los datos de las dos fuentes, aunque menores a las registradas en el estudio de **Silva (2012)** en las regiones del sur de Colombia, norte de Perú y noroccidente de Brasil. El porcentaje de acuerdo de la información de las estaciones *in situ* y la de la TRMM durante este evento fue de 89,5 %. Las estaciones ubicadas en el norte y occidente del país, cuya información difirió del patrón de los datos satelitales, evidenciaron anomalías positivas de precipitación. Al igual que en el evento de El Niño, la fase de El Niño Modoki no mostró una tendencia al aumento o disminución de la precipitación generalizada en el país, sino que su impacto varió según la zona.

La ilustración de las diferencias entre las anomalías de precipitación generadas por los episodios cálidos y las anomalías en la TSM en el este y centro del océano Pacífico tropical demuestra que durante el fenómeno de El Niño Modoki hubo una mayor disminución de la lluvia que durante El Niño en la zona norte del país, como pudo verse en la información de la TRMM y de algunas estaciones del IDEAM; según la TRMM, durante los eventos de El Niño la precipitación fue mayor hacia el sur que durante El Niño Modoki; en parte del suroccidente se pudo apreciar

que durante El Niño hubo disminución de la precipitación en tanto que durante El Niño Modoki hubo un aumento. En los registros de algunas estaciones ubicadas en el área andina se evidenció que hubo una mayor disminución de la precipitación durante El Niño Modoki que durante El Niño, pero en el suroccidente no se observó una clara diferencia entre un evento y otro.

A diferencia de los eventos de El Niño y El Niño Modoki, durante los cuales hubo claras anomalías negativas hacia el norte, occidente y parte del centro según los datos de la TRMM, los mapas de los eventos de La Niña y La Niña Modoki muestran anomalías positivas en esas áreas, así como hacia el oriente del país. Hubo un mayor número de estaciones del IDEAM que registraron anomalías positivas durante estos eventos que durante El Niño y El Niño Modoki, aunque el patrón de disminución o de aumento de las lluvias a lo largo del territorio tendió a ser muy similar durante los eventos de La Niña y La Niña Modoki según la información *in situ* y la satelital, como puede observarse en los tres mapas inferiores de la Figura 2. En el mapa de las diferencias se observan algunas estaciones con valores positivos, lo que quiere decir que durante los episodios de La Niña hubo mayor precipitación, pero en algunas estaciones del suroccidente con diferencias positivas se evidenció que durante La Niña Modoki hubo una mayor disminución de las lluvias. Por otro lado, la información de la TRMM permitió ver que en el norte y el centro de Colombia hubo una mayor precipitación durante los eventos de La Niña Modoki que

durante los eventos de La Niña, lo cual concuerda con parte de la información proveniente de las estaciones ubicadas en esas áreas.

Correlación simultánea. En la Figura 3 se observa que cada uno de los índices relacionados con el ENOS reflejó correlaciones negativas significativas con las anomalías de precipitación en el área andina, en parte del occidente, el norte y el nororiente de Colombia tanto en la información de la TRMM como en la del IDEAM. El índice del Niño 4 y el EMI evidenciaron una pequeña área de correlaciones positivas hacia el suroccidente y el occidente del país, lo que puede verse en los datos de la TRMM. Por su parte, la mayoría de las estaciones del IDEAM registraron correlaciones negativas, pues en el 84,2 % de las estaciones se registraron valores distintos de cero para los índices del Niño 3, el Niño 3.4 y el ONI, mientras que el índice EMI evidenció correlaciones negativas significativas en el 71 % de las estaciones y el Niño 3.4 en el 84,2 % de ellas, lo cual resalta la relación inversa existente entre las temperaturas del Pacífico este y central y la precipitación en Colombia: ante un calentamiento (o enfriamiento) de esta región del Pacífico tropical, se registra una reducción (o incremento) de la precipitación en el país. Sin embargo, el análisis de las correlaciones rezagadas de 1 a 11 meses reveló que este efecto no fue igual en todas las regiones del país (Figuras 4 y 5).

Correlaciones rezagadas. Para describir la asociación existente entre las anomalías de precipitación en Colombia y los distintos índices considerados para describir los

eventos canónicos y Modoki del ENOS, se analizaron las correlaciones significativas con un desfase de 0 hasta 11 meses según la información suministrada por el IDEAM y la base de datos satelitales de la TRMM. Los rezagos considerados son tales que las anomalías de la TSM anteceden las anomalías en la precipitación, lo que también permite observar el tiempo de respuesta del régimen de precipitaciones ante la presencia de los distintos eventos del ENOS. Aquí se presentan los mapas de las correlaciones rezagadas de cero a seis meses, es decir el tiempo durante el cual se observan áreas de Colombia bajo la influencia de estos eventos. Dichas correlaciones se establecieron con un nivel de confianza de 95 %.

Correlación rezagada de seis meses. La Figura 4 muestra las correlaciones significativas entre los índices del ENOS considerados y las anomalías de precipitación con un desfase de seis meses. En el mapa correspondiente al índice del Niño 3 se ve un área de correlaciones significativas en el suroccidente del país según la información de la TRMM, en tanto que se observan algunas estaciones del IDEAM con valores de correlación diferentes de cero en el occidente, el suroccidente y el nororiente, las cuales representan el 34,2 % del total de las estaciones. Los mapas de los índices del Niño 3.4 y el ONI exhiben correlaciones negativas significativas en una pequeña área de los Andes según los datos de la TRMM y los del IDEAM, aunque en algunas estaciones se evidenciaron correlaciones significativas hacia el nororiente del país en el índice del Niño 3.4. Por ello, el porcentaje de estaciones con correlaciones negativas significativas para

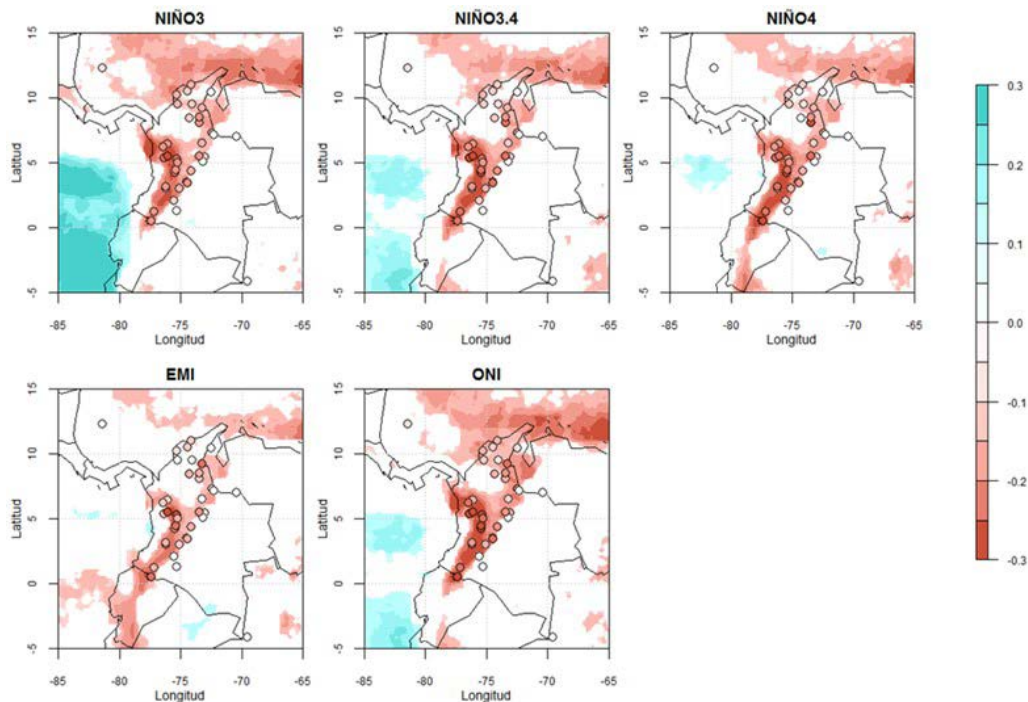


Figura 3. Correlación simultánea entre los índices del ENOS y las anomalías en la precipitación. Solo se presentan los valores estadísticamente significativos para un nivel de confianza del 95 %.

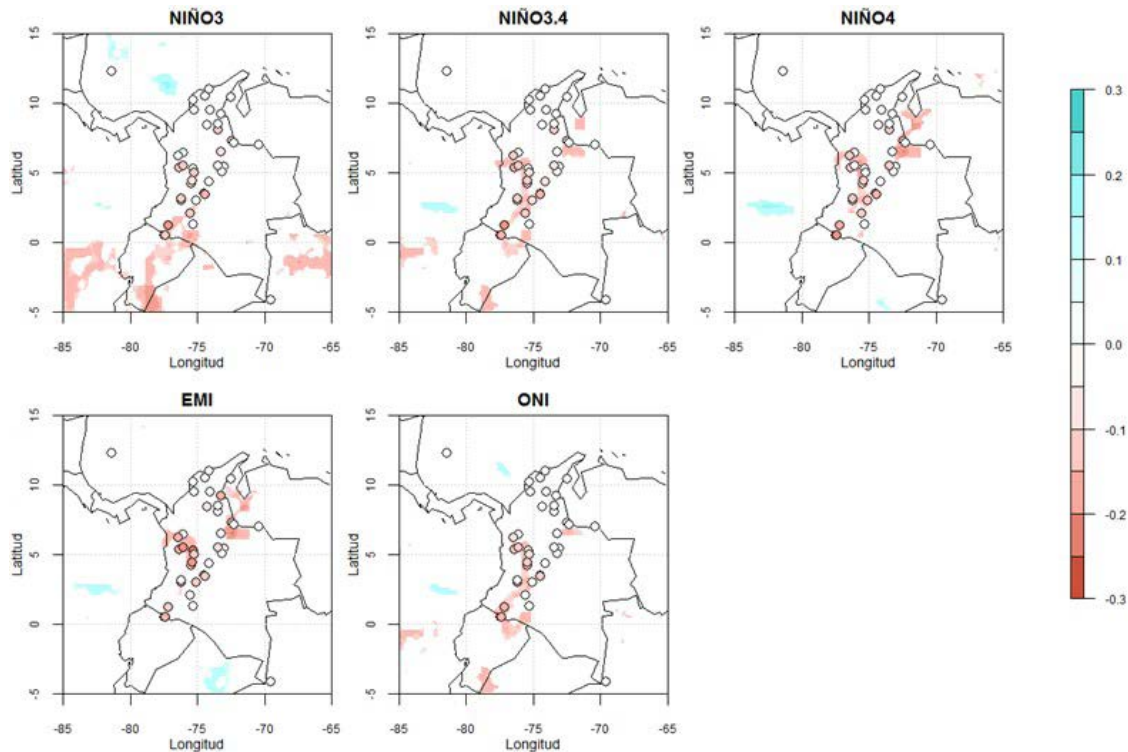


Figura 4. Correlación simultánea entre los índices del ENOS y las anomalías en la precipitación con una rezago de seis meses. Solo se presentan los valores estadísticamente significativos para un nivel de confianza del 95 %. Las anomalías en la TSM anteceden las anomalías en la precipitación.

este índice fue de 42 %, en tanto que según el índice del Niño 3 el porcentaje de estaciones fue de 28,9 %. Por último, para los índices del Niño 4 y el EMI los mapas muestran correlaciones negativas significativas en el occidente y el nororiente según la información de la TRMM y en algunas estaciones del IDEAM ubicadas en esas áreas. En los mapas de los índices que describen eventos Modoki también se observan estaciones del IDEAM con valores de correlaciones negativas significativas hacia el suroccidente y nororiente; el porcentaje de estaciones con este comportamiento fue de 34,2 % para el índice del Niño 4 y de 42,1 % para el EMI.

Correlogramas de los datos de las estaciones del IDEAM. En la Figura 5 se presentan los correlogramas de los diferentes índices empleados y las anomalías de precipitación con rezagos de cero hasta 11 meses en cuatro estaciones del IDEAM. Hacia el noreste de Colombia se presentaron las correlaciones más bajas, con un valor aproximado de -0,2, y con el tiempo de respuesta más corto, siendo hasta de cuatro meses para los índices del Niño 3, el ONI y el Niño 4, y de cinco meses para los índices del Niño 3.4 y el EMI. En las estaciones del suroccidente y el occidente se presentaron los valores más altos de correlación, aproximadamente de -0,25. En estas estaciones el tiempo de respuesta de las anomalías en la precipitación fue de seis, siete, ocho y hasta nueve meses después de presentarse las anomalías en la TSM asociadas al ENOS. La estación situada en el centro del país registró tiempos

de respuesta con cinco a seis meses de rezago. En esta zona la respuesta de la precipitación medida con los índices del Niño 3 y el ONI fue similar, en tanto que con los índices del Niño 4 y el EMI se registró el mismo tiempo de respuesta, pero la magnitud de las correlaciones varió, con valores de -0,2 con el EMI y de -0,25 con el Niño 4.

Conclusiones

Al clasificar los trimestres en los que ocurrieron eventos canónicos y Modoki del ENOS durante el período de 1970 a 2015, se encontró que los episodios de El Niño Modoki y La Niña Modoki fueron más frecuente que los episodios de El Niño y La Niña. Se observó que en el trimestre de septiembre a noviembre ocurrieron ocho eventos de El Niño y La Niña, 13 de El Niño Modoki y 11 de La Niña Modoki; en el trimestre de diciembre a febrero ocurrieron seis eventos de El Niño y La Niña, diez eventos de El Niño Modoki y nueve de La Niña Modoki; en los trimestres de marzo a mayo y de junio a agosto, la diferencia entre el número de eventos fue menor, con seis episodios de El Niño y ocho de El Niño Modoki, La Niña y La Niña Modoki durante junio a agosto y seis eventos de El Niño, ocho de El Niño Modoki, siete de La Niña y seis de La Niña Modoki en el trimestre de marzo a mayo.

La mayor influencia de los eventos de ENOS en el régimen de precipitación en Colombia se observó durante el trimestre de diciembre a febrero, en tanto que la menor

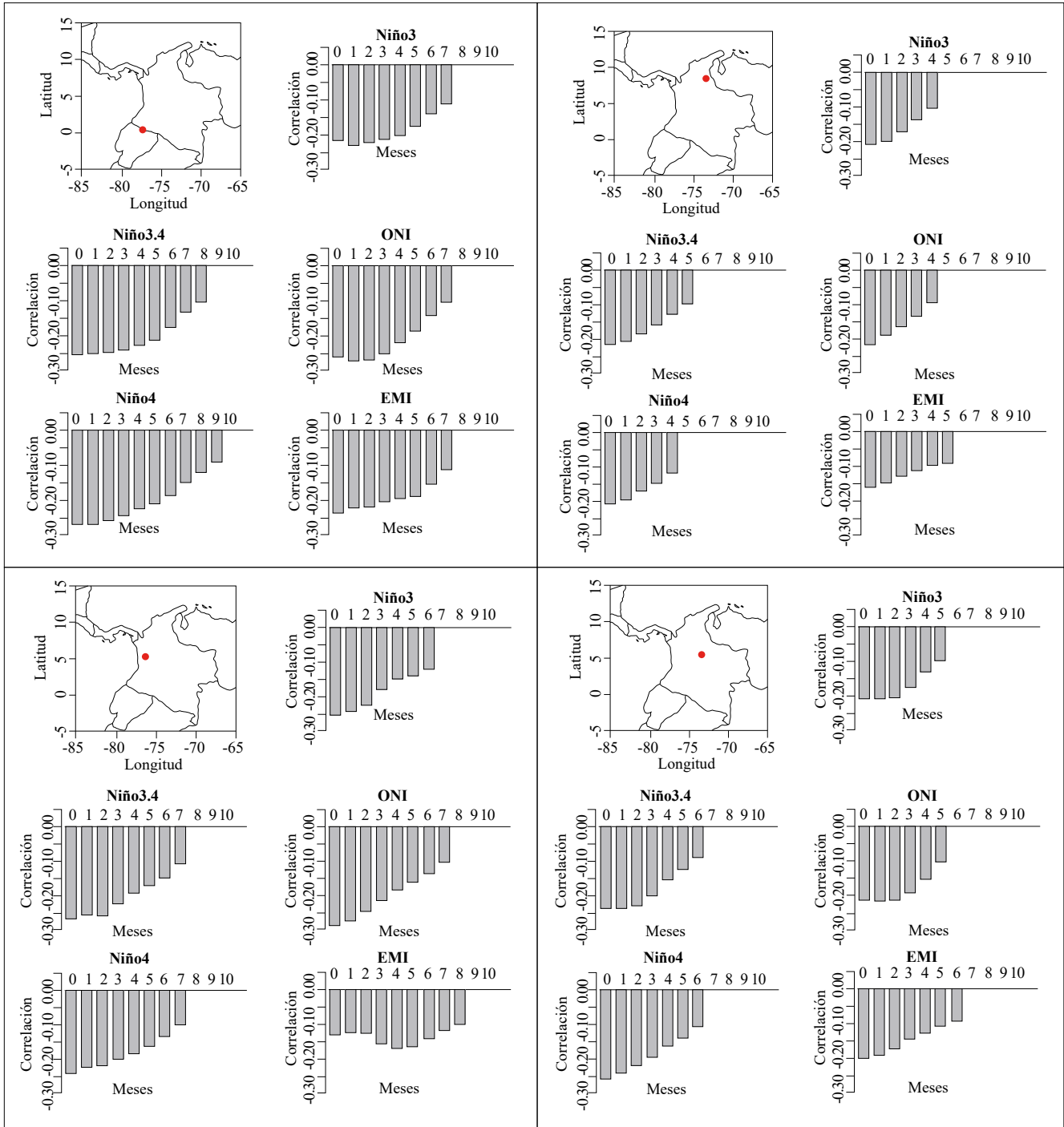


Figura 5. Correlogramas de los distintos índices considerados para los eventos de ENOS y las anomalías en la precipitación con rezagos de cero hasta 11 meses en cuatro estaciones en diferentes regiones de Colombia. Las anomalías en la TSM anteceden a las anomalías en la precipitación. En los mapas aparece la ubicación de la estación correspondiente a cada región.

influencia se encontró en las temporadas de marzo a mayo (estos datos no se presentan) y de junio a agosto, según los datos de la TRMM. Esta respuesta de las anomalías en la precipitación en Colombia durante estos eventos es razonable, pues en el trimestre de diciembre a febrero el fenómeno de ENOS se encuentra en su máximo desarrollo,

en tanto que la temporada de marzo a mayo es de transición en las condiciones de la temperatura en el océano Pacífico tropical (Tedeschi, *et al.*, 2016a).

El análisis del porcentaje de acuerdo en el signo de las anomalías en la precipitación entre los datos obtenidos de los registros *in situ* y la información satelital evidenció que

hubo una mayor coincidencia en los eventos de El Niño que en los de La Niña. Es posible que estos porcentajes puedan afinarse a medida que se realice un mayor control de calidad de la información empleada y de los análisis de un mismo período. Sin embargo, en futuros estudios se recomienda hacer un análisis estadístico para verificar con mayor detalle la confiabilidad de las fuentes de datos.

Se sabe que el ENOS es el principal modulador de la variabilidad interanual de la precipitación en Colombia (Poveda, *et al.*, 1998); sin embargo, la influencia de este fenómeno depende de la fase en la cual se encuentre y de la región de Colombia que se analice, pues las respuestas del régimen de precipitación ante las anomalías de la TSM no son totalmente homogéneas a lo largo del país. Se observó, por ejemplo, que según la información de TRMM, los episodios de El Niño durante el trimestre de diciembre a febrero causaron una mayor disminución de la precipitación en todo el país que los ocasionados por El Niño Modoki, en tanto que durante La Niña Modoki la precipitación fue mayor que durante La Niña en casi todo el territorio. Durante el trimestre de septiembre a noviembre la influencia de las dos fases de El Niño en la precipitación del país difirió poco, al igual que en las dos fases de La Niña durante el período de junio a agosto. En el trimestre de marzo a mayo, La Niña generó una mayor precipitación que La Niña Modoki en casi toda Colombia. Por otro lado, se observó una mayor disminución de la precipitación en parte del área andina y del norte del país durante El Niño Modoki que durante El Niño, en tanto que hacia el sur se presentaron anomalías positivas de precipitación durante la fase Modoki de El Niño.

El análisis de correlaciones rezagadas contribuyó a visualizar de manera más clara las regiones de Colombia cuyo régimen de precipitación se vio más influido por el ENOS durante el período de estudio. Se observó que la zona andina, parte del occidente y el norte de Colombia fueron las regiones en las que este fenómeno tuvo mayor impacto. Este análisis también fue útil para determinar el tiempo de respuesta de la precipitación al ENOS. Se encontró que las correlaciones significativas ocurrieron con cero a seis meses de rezago, lo que significa que las anomalías de precipitación en Colombia pueden tardar hasta seis meses en exhibir una respuesta a un evento de ENOS.

Los resultados de este trabajo aportan elementos nuevos en la comprensión de la variabilidad interanual de la hidroclimatología colombiana, pues la respuesta de la precipitación (y de los caudales) en Colombia ante el ENOS está condicionada por el patrón de calentamiento o enfriamiento que exhibe el Pacífico tropical durante las diferentes fases del fenómeno; además, esta respuesta depende de la región del país que se considere. Dichos datos son fundamentales para el pronóstico de la disponibilidad hídrica en las diferentes regiones de Colombia y para la formulación e implementación de estrategias de prevención ante eventos extremos de precipitación.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado en el marco de la convocatoria del Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI) para Trabajos de Grado 2016/2 de la Universidad de Antioquia.

Contribución de los autores

Estefanía Navarro-Monterroza procesó la información y realizó los análisis aquí presentados. Paola A. Arias y Sara C. Vieira diseñaron y dirigieron la investigación.

Conflicto de interés

Los autores manifiestan no presentar conflicto de intereses para este trabajo.

Referencias

- Ashok, K., Behera, S. K., Rao, S. A., Weng, H., Yamagata, T. (2007). El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal Of Geophysical Research*. **112**: 1-27.
- Ashok, K., Yamagata, T. (2009). The El Niño with a difference. *Nature*. **461**: 481-484.
- Córdoba-Machado, S., Palomino-Lemus, R., Gámiz-Fortis, S., Castro-Díez, Y., Esteban-Parra, M. (2015). Assessing the impact of El Niño Modoki on seasonal precipitation in Colombia. *Global and Planetary Change*. **124**: 41-61.
- Grimm, A. M., Tedeschi, R. G. (2009). ENSO and Extreme Rainfall Events in South America. *Journal of Climate*. **22**: 1589-1609.
- Grimm, A. M., Barros, V. R., Doyla, M. E. (2000). Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. *American Meteorological Society*. **13**: 35-58.
- Kim, H.M., Webster, P. J. Curry, J. A. (2009). Impact of Shifting Patterns of Pacific Ocean Warming on North Atlantic Tropical Cyclones. *Science*. **325**: 77-80.
- McPhaden, M., Busalacchi, A. J., Cheney, R., Donguy, J. R., Gage, K. S., Halpern, D., Takeuchi, K. (1998). The Tropical Ocean-Global Atmosphere observing system: A decade of progress. *Journal of Geophysical Research*. **103**: 14169-14240.
- Philander, S. G. (1990). *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. San Diego, USA: Academic Press. p. 293.
- Poveda, G., Gil, M. M., Quiceno, N. (1998). El ciclo anual de la hidrología de Colombia en relación con el ENSO y la NAO. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*. **27**: 721-731.
- Rasmusson, E. M., Carpenter T. H. (1982). Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Monthly Weather Review*. **110**: 354-384.
- Ropelewski, C. F., Halpert, M. S. (1996). Quantifying Southern Oscillation-Precipitation Relationships. *Journal of Climate*. **9**: 1043-1059.
- Roxy, M., Patil, N., Aparna, K., Ashok, K. (2013). Revisiting the Indian Summer monsoon-ENSO links in the IPCC AR4 projections: A cautionary outlook. *American Meteorological Society*. **104**: 51-60.
- Tedeschi, R. G., Cavalcanti, I., Grimm, A. M. (2012). Influence of two types of ENSO on South American precipitation. *International Journal of Climatology*. **33**: 1382-1400.

- Tedeschi, R. G., Grimm, A. M., Cavalcanti, I.** (2015). Influence of Central and East ENSO on extreme events of precipitation in South America during austral spring and summer. *International Journal of Climatology*. **35**: 2045-2064.
- Tedeschi, R. G., Collins, M.** (2016a). The influence of ENSO on South American precipitation during austral summer and autumn in observations and models. *International Journal of Climatology*. **36**: 618-635.
- Tedeschi, R. G., Grimm, A. M., Cavalcanti, I.** (2016b). Influence of Central and East ENSO on precipitation and its extreme events in South America during austral autumn and winter. *International Journal of Climatology*. **36**: 4797-4814.
- Silva, A.** (2012). El Niño and El Niño Modoki impacts on South American rainfall (Tesis de maestría). The University of New South Wales, Sydney, Australia. p. 191.
- Wang, G., Hendon, H. H.** (2007). Sensitivity of Australian Rainfall to Inter–El Niño Variations. *American Meteorological Society*. **20**: 4211-4226.
- Weng, H., Ashok, K., Behera, S. K., Rao, S. A., Yamagata, T.** (2007). Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. *Climate Dynamics*. **29**: 113-129.
- Wyrtki, K.** (1975). El Niño-The Dynamic Response of the Equatorial Pacific Ocean to Atmospheric Forcing. *Journal of Physical Oceanography*. **5**: 572-584.
- Yeh, S. W., Kug, J. S., Dewitte, B., Kwon, M. H., Kirtman, B. P., Jin, F. F.** (2009). El Niño in a changing climate. *Nature*. **461**: 511-514.

Caracterización de la turbulencia atmosférica en una gran zona verde de una megaciudad andina tropical

Edison Y. Ortiz¹, Rodrigo Jimenez^{1,*}, Gilberto J. Fochesatto², Luis A. Morales-Rincon¹

¹ Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Grupo de Investigación en Calidad del Aire, Bogotá D.C., Colombia

² Geophysical Institute, and Department of Atmospheric Sciences, University of Alaska, Fairbanks, Estados Unidos

Resumen

La turbulencia generada por las interacciones superficie-atmósfera, y su disipación, determinan en gran parte la dispersión de contaminantes y, por lo tanto, su impacto en la salud pública. La parametrización de la turbulencia en los modelos de transporte y dispersión de contaminantes ha sido observacionalmente obtenida y validada principalmente en latitudes medias, pero muy poco en el trópico. En este artículo se reporta la caracterización estadística de la turbulencia atmosférica en un sitio representativo del Área Metropolitana de Bogotá – Colombia (4°39'30.48"N, 74°5'2.38"O, 2577 m s.n.m.), una megaciudad andina tropical, a partir de mediciones de alta frecuencia con un anemómetro ultrasónico de tres ejes, validado en exposición y operado a 10 Hz, a 7.8 m de altura, entre agosto y noviembre del 2014. El análisis revela que, durante el periodo de medición, la turbulencia lateral en Bogotá, expresada como desviación estándar, fue elevada y comparable a la turbulencia longitudinal ($\sigma_v \cong \sigma_u \approx 0.2-1.3 \text{ m s}^{-1}$), lo que caracteriza su atmósfera como horizontalmente isotrópica. Las intensidades turbulentas observadas ($I_u \approx I_v \approx 0.6$, $I_w \approx 0.3$) fueron ~2 a ~3 veces más altas que las reportadas para latitudes medias a las bajas velocidades del viento en Bogotá. El análisis espectral es consistente con el estadístico, con espectros longitudinales y verticales comparables a los reportados para condiciones neutrales a ligeramente inestables, y espectros laterales con frecuencias pico de un orden de magnitud menor que los reportados en la literatura, lo que indica una elevada producción de turbulencia lateral. Se estima que los remolinos al inicio de la cascada de energía tuvieron longitudes características de ~120 m y ~10 m en los planos horizontal y vertical, respectivamente. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Andes tropicales; Turbulencia atmosférica; Anemómetro ultrasónico; Energía cinética turbulenta; Escalas de tiempo y longitud; Espectros de energía.

Characterization of the atmospheric turbulence in a tropical Andes megacity large urban park

Abstract

The turbulence produced by surface-atmosphere interactions and its dissipation largely determine the dispersion of pollutants and, therefore, their public health impact. Turbulence parameterizations in pollutant transport and dispersion models have been observationally obtained and validated mainly for mid-latitudes, but very little for the tropics. In this article, we report the statistical characterization of the atmospheric turbulence at a representative site of the Metropolitan Area of Bogota – Colombia (4°39'30.48"N, 74°5'2.38"W, 2577 m ASL), a tropical Andean megacity, using high frequency measurements obtained with a 3-axis ultrasonic anemometer validated for exposure and operated at 10 Hz, at 7.8 m height between August and November 2014. Our analysis reveals that during the measurement period the lateral turbulence in Bogota, expressed as standard deviation, was high and comparable to the longitudinal turbulence ($\sigma_v \cong \sigma_u \approx 0.2-1.3 \text{ m s}^{-1}$), which characterizes its atmosphere as horizontally isotropic. The turbulent intensities observed ($I_u \approx I_v \approx 0.6$, $I_w \approx 0.3$) were ~2 to ~3 times higher than those reported for mid-latitudes at the low wind speeds at Bogota. The spectral analysis was consistent with the statistical one, with longitudinal and vertical spectra comparable to those reported for neutral to slightly unstable conditions, and lateral spectra with peak frequencies an order of magnitude lower than the reported in the literature, which indicates high production of lateral turbulence. We estimate that the eddies at the beginning of the energy cascade had characteristic lengths of ~120 m and ~10 m in the horizontal and vertical, respectively. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Tropical Andes; Atmospheric turbulence; Ultrasonic anemometer; Turbulent kinetic energy; Time and length scales; Energy spectra.

*Correspondencia:

Rodrigo Jimenez; rjimenezp@unal.edu.co; **Recibido:** 19 de julio de 2018; **Aceptado:** 13 de marzo de 2019; **Editor:** Germán Poveda

Introducción

La turbulencia sigue siendo uno de los problemas no resueltos más importantes de la física clásica (She, 1991). Nuestro principal interés en la turbulencia se centra en la comprensión de la dispersión de contaminantes en atmósferas tropicales y su impacto en episodios de contaminación (Ren, *et al.*, 2018). El transporte, dispersión y deposición de emisiones en el trópico están en gran parte determinados por convección húmeda y, frecuentemente, por fenómenos meteorológicos locales y regionales modulados por condiciones sinópticas que condicionan la cobertura nubosa y, por lo tanto, la radiación solar. La actividad humana en las ciudades se desarrolla mayoritariamente en la capa de superficie, en la cual ocurre el intercambio de energía, de momento, de gases y de aerosoles entre la superficie y la atmósfera. La actividad humana y el cambio del uso del suelo, que altera el albedo, la rugosidad aerodinámica, la altura del dosel y la homogeneidad de la superficie, genera flujos de calor suficientemente elevados como para modificar sustancialmente el balance energético (Roth, 2017). Estas interacciones entre la superficie y la atmósfera producen movimientos turbulentos a distintas escalas espaciotemporales, que se manifiestan en remolinos intermitentes (She, 1991), coherentes (Starkenbug, *et al.*, 2013; Christen, *et al.*, 2007), anisotrópicos, o en ráfagas de viento.

Para estimar el transporte y dispersión de contaminantes en la atmósfera se emplean modelos eulerianos y lagrangianos, en los cuales los efectos de la turbulencia en la dispersión generalmente se han modelado con base en teorías de relación gradiente-transporte y de similitud (Arya, 1999; Hanna, 1979; Shao, 1992; Lin, *et al.*, 2003), entre las que se destaca la hipótesis de similitud de Monin-Obukhov (Arya, 1999). Las parametrizaciones de la turbulencia en estos modelos, y por tanto su habilidad para describir la dispersión de contaminantes, típicamente se ha basado en observaciones hechas en terrenos rurales, cuya superficie es mucho menos rugosa que la de las grandes ciudades (Christen, *et al.*, 2007), y se ha validado en latitudes medias y altas, pero muy poco en el trópico, y mucho menos en áreas urbanas tropicales de gran complejidad topográfica, sobre las cuales hay un enorme vacío de información.

Además, la comprensión de la turbulencia atmosférica también es importante en campos tan disímiles como la energía eólica (Hansen, *et al.*, 2012; Barlas, *et al.*, 2018), la aviación y la ingeniería aeronáutica (Richardson, *et al.*, 2014), y la óptica atmosférica (Pinzón, *et al.*, 2016).

En la revisión bibliográfica realizada se pudo establecer que este es el primer estudio observacional directo, es decir, basado en mediciones de alta frecuencia, de la turbulencia en Colombia, y uno de los pocos llevados a cabo en ciudades tropicales y subtropicales (Yadav, *et al.*, 1996; Roth, *et al.*, 2017) y, en general, en el trópico (Magnago, *et al.*, 2010; Silva da Santana, *et al.*, 2015). En el único reporte previo sobre Colombia, Montoya, *et al.* (2004) estimaron varios parámetros micrometeorológicos para Bogotá (flujo

de calor sensible, velocidad de fricción, temperatura de escala turbulenta y longitud de Obukhov), usando mediciones de baja frecuencia de la temperatura del aire a 2 m y 10 m de altura, y de la velocidad del viento a 10 m de altura en un periodo corto (3 días).

Las preguntas científicas que guían nuestra investigación son las siguientes: a) ¿cuáles son la magnitud, la variabilidad espaciotemporal y la distribución de frecuencia y espectral de la turbulencia atmosférica en Colombia? b) ¿qué factores meteorológicos, topográficos y de cobertura controlan esta variabilidad? c) ¿cuál es la estacionalidad y la variabilidad del intercambio entre superficie y atmósfera caracterizado como altura de capa de mezcla (Ortiz, 2016) y flujos de momento, calor y masa, particularmente de gases de efecto invernadero, medidos mediante covarianza de remolinos? d) ¿qué tan apropiada es la parametrización de la turbulencia en los modelos de dispersión de contaminantes para las condiciones de Colombia y cómo se podría mejorar (Ortiz, 2016)? El presente análisis contribuye a responder la primera pregunta mediante la caracterización estadística y espectral de la turbulencia atmosférica en la capa de superficie en un sitio meteorológicamente representativo del área metropolitana de Bogotá.

Materiales y métodos

Sitio y período de medición. Bogotá es la ciudad más poblada de Colombia y una de las más pobladas de Suramérica, con una población estimada para el 2015 (año representativo para las mediciones reportadas) de 7.88 millones de habitantes (Mhab) en su área urbana y de 9.36 Mhab en su área metropolitana (Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE, 2015). Se encuentra ubicada en la Sabana de Bogotá, una altiplanicie a ~2600 m de altitud, asentada en la trifurcación oriental de la cordillera de los Andes en Colombia (cordillera Oriental) (Figura 1SA-B, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/697/3573>). Como resultado de su posición en los Andes tropicales, su complejidad topográfica y la interacción entre la convección húmeda y efectos atmosféricos de escala sinóptica, mesoescala (vientos vallemontaña y anabáticos-catabáticos) y locales (canalización), la circulación atmosférica en Bogotá es relativamente compleja (Guerrero, 2013; Guerrero & Jimenez, 2014; Ortiz, *et al.*, 2015). La Sabana de Bogotá tiene un régimen bimodal de precipitación con picos climatológicos en abril y octubre y mínimos en enero y julio (Jaramillo-Robledo & Chaves-Córdoba, 2000). Gran parte de la humedad que se precipita en la Sabana es transportada desde la cuenca del río Orinoco (Orinoquia), con muy pocos ciclos de evaporación-condensación según el análisis isotópico (Saylor, *et al.*, 2009). Las observaciones operacionales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) indican que las nubes sobre Bogotá son mayoritariamente advectivas durante la primera temporada de lluvias (abril-mayo), es decir, formadas en la Orinoquia y transportadas

hasta la Sabana, y en su mayoría convectivas durante la segunda temporada de lluvias (octubre-noviembre), es decir, generadas regionalmente (Arango, 2018). El promedio de la precipitación acumulada anual en el Parque Metropolitano Simón Bolívar fue de 980 mm entre los años 2004 y 2013, siendo los meses de octubre y noviembre los de mayor precipitación mensual, con promedios mensuales superiores a los 120 mm acumulados. Las mayores velocidades del viento se presentan de julio a septiembre, cuando Bogotá está influenciada por los vientos alisios del este (Ortiz, et al., 2015).

Las mediciones de la turbulencia atmosférica se llevaron a cabo en la estación Parque Simón Bolívar (4°39'30.48" N, 74°5'2.38" O, 2577 m s.n.m.m.), conocida también como Centro de Alto Rendimiento (IDRD) de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RM CAB: <http://ambientebogota.gov.co/red-de-calidad-del-aire>). El Parque Simón Bolívar es una zona plana ubicada en el centro geográfico de Bogotá. Mediante un análisis de información mutua de las series temporales meteorológicas y de la calidad del aire de la RM CAB, y resultados de simulación meteorológica y lagrangiana estocástica, Guerrero (2013) y Guerrero & Jimenez (2012; 2014) encontraron que el Parque Simón Bolívar es uno de los sitios más representativos de la atmósfera de Bogotá, ya que está meteorológicamente influenciado por masas de aire que atraviesan la ciudad desde diferentes direcciones. Las mediciones aquí reportadas pueden considerarse altamente influenciadas por el dosel urbano, ya que el Parque está rodeado de edificaciones y su área verde (~4 km²) es muy pequeña comparada con la de Bogotá. El Parque puede dividirse en siete sectores según el uso del suelo (Morales-Rincon, et al., 2015a) (Figura 1S-C, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/697/3573>). Los sectores 1 y 2 tienen coberturas homogéneas de baja rugosidad (canchas de fútbol y campo de golf con pastos de menos de ~0.3 m). El sector 3 es ligeramente más heterogéneo y rugoso (pastos menos manejados y árboles dispersos). Los sectores 4, 5, 6 y 7 son los más heterogéneos y rugosos, ya que tienen pastos menos manejados y árboles dispersos entre canchas deportivas, edificios, algunos coliseos y una zona de parqueaderos. El *fetch*, es decir la distancia de cobertura homogénea viento arriba de la torre, para los sectores 1, 2, 3 y 6 es mayor a ~400 m, en tanto que para los sectores 4, 5 y 7 es mayor a 100 m (Figura 1S-C, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/697/3573>). La rugosidad del Parque se estima en ~0.5 m.

Las mediciones (“campana” de medición) se llevaron a cabo entre el 25 de agosto y el 24 de noviembre del 2014. La ausencia de datos en el período comprendido entre el 24 de octubre y el 9 de noviembre de 2014 se debió a fallas en el suministro de potencia.

Instrumento de medición. El anemómetro sónico tridimensional (3D) de alta frecuencia (AS3D; Windmaster Pro 3D, Gill Instruments) instalado en el Parque hace parte de

un sistema de medición de flujos de CO₂ y H₂O mediante covarianza de remolinos (*eddy covariance*, EC), el cual operó en Bogotá durante un período corto (Morales, et al., 2015a) antes de ser trasladado a un ecosistema agrícola (Morales, et al., 2015b; 2019). El sistema EC incluye el anemómetro AS3D, un analizador infrarrojo no dispersivo para la medición a alta frecuencia de la razón de mezcla de CO₂ y H₂O, y una estación meteorológica auxiliar (temperatura, humedad relativa de aire y suelo, precipitación, y radiación global y neta). El AS3D puede registrar datos hasta a 32 Hz, con una resolución nominal de 0.01 m s⁻¹, y una precisión (reportada como coeficiente de variación) de la velocidad escalar superior a una media cuadrática (*root mean square*, RMS) de 1.5 % en 10 s de medición a 12 m s⁻¹ (típicamente mejor que 1.3% RMS) Mc Kay, 2018, comunicación personal. A partir de esta información, se estima que la precisión normalizada (equivalente a ruido blanco) del AS3D es de 4.1 % Hz^{-1/2}, lo que equivale a una precisión de 13 % a 10 Hz, frecuencia de muestreo de los datos aquí reportados. Nuestra frecuencia máxima de observación según el teorema de Nyquist-Shannon (≤ 5 Hz) fue muy baja para poder observar la microescala de Kolmogorov (~10-30 Hz), pero suficientemente elevada para la microescala de Taylor (~0.01-5 Hz). El AS3D se instaló en la torre meteorológica del Parque a una altura no estándar de $z = 7.8$ m y al final de un brazo de 1 m de largo apuntado en la dirección NE, con el fin de garantizar que no afectara las mediciones del anemómetro propio de la estación (anemómetro de copa y veleta estándar, ACE; 034B Wind Sensor, Met One Instruments), instalado en la cima de la torre a 10 m de altura y sin obstáculos. El ACE tiene una exactitud nominal de ±4° y ±0.1 m s⁻¹ por encima del umbral de detección de 0.4 m s⁻¹. El AS3D registró mediciones a 10 Hz de cada uno de los componentes del viento, en tanto que el ACE registró la velocidad y la dirección horizontales del viento cada 10 minutos. Se compararon las rosas de los vientos de los dos anemómetros con una finalidad informativa, y se analizó la dependencia de las intensidades turbulentas de la dirección y la velocidad del viento medidas por el AS3D, con el fin de detectar posibles obstáculos.

Dado que los remolinos son transportados por el viento, la turbulencia observada por el AS3D (receptor) proviene, en general, de zonas aire arriba (*upwind*) de la torre meteorológica, cuyo mapa de influencia relativa en la medición se conoce como huella (*footprint*). En una investigación anterior (Morales-Rincon, et al., 2015a), se calcularon y promediaron las huellas de observación del AS3D en cada uno de los cuatro meses de medición, las cuales se reproducen en el material suplementario (Figura 1S D-G). El cálculo se hizo en EddyPro (<http://www.licor.com/EddyPro>) usando la parametrización de Kljun, et al. (2004). En general, el “campo de visión” (*field-of-view*) del AS3D tuvo un alcance de ~600 m alrededor de la torre. El sector 3 fue el de mayor influencia durante agosto y septiembre, y los sectores 7, 1 y 2, los de mayor contribución durante octubre y noviembre.

Caracterización de la turbulencia. El AS3D midió los tres componentes ortogonales del viento, u , v , y w (este o zonal, norte o meridional, y hacia arriba en la vertical, respectivamente) cada 0.1 s. En terrenos suficientemente planos como el del Parque, se espera que para un tiempo de promediación apropiado, el promedio de la velocidad vertical del viento sea cero ($\bar{w} \approx 0$). Sin embargo, es inevitable que haya pequeñas pendientes en el terreno y que errores menores de instalación impidan que el anemómetro sea instalado en una posición perfectamente vertical. Con el fin de evitar que esto genere sesgos en la velocidad vertical y flujos escalares artificiales, se aplicó rotación (*tilt correction*) de tres ejes (Foken, 2008) cada 10 minutos (tiempo de promediación para la descomposición de Reynolds, t_{avg}), previa eliminación de los picos de señal (*despiking*) (Starkenbourg, et al., 2016). Esta rotación estableció dos nuevos ejes ortogonales en la horizontal, uno en la dirección promedio del viento durante el período de promediación, llamado “longitudinal” u “horizontal”, y el perpendicular a este, llamado “lateral”, y un eje vertical corregido, ortogonal a los dos horizontales. La rotación preserva la notación de las variables: u , longitudinal, v , lateral, y w , vertical corregida (libre de sesgos, $\bar{w} \approx 0$). Los componentes advectivos (\bar{u} , \bar{v} , \bar{w}), se determinaron promediando las mediciones de alta frecuencia durante $t_{avg} = 10$ minutos. Los componentes turbulentos (u' , v' , w') se calcularon como los residuales alrededor de estos promedios usando las ecuaciones 1, 2 y 3 (por ejemplo, $u' = u - \bar{u}$),

$$u = \bar{u} + u' \quad \text{Ecuación 1}$$

$$v = \bar{v} + v' \quad \text{Ecuación 2}$$

$$w = \bar{w} + w' \quad \text{Ecuación 3.}$$

Inicialmente se hizo la descomposición de Reynolds con $t_{avg} = 30$ minutos, tiempo que resultó ser demasiado largo para la alta turbulencia lateral (Hanna, 1983) en Bogotá, por lo que generaba artificialmente turbulencia elevada y picos espectrales de baja frecuencia, similares a los observados por Magnago, et al. (2010). La magnitud y la variabilidad de los componentes turbulentos se expresaron como desviaciones estándar (sigmas) o medias cuadráticas, por ejemplo, en el caso de la velocidad longitudinal,

$$\sigma_u = \sqrt{\sum (u_k - \bar{u})^2 / n} = RMS(u_k - \bar{u}) = \sqrt{\overline{u_k'^2}}, \quad \text{Ecuación 4}$$

donde \bar{u} es la velocidad longitudinal promedio, y u_k y u'_k son, respectivamente, la velocidad medida a alta frecuencia y su componente turbulento en el instante k -ésimo (a 10 Hz esto implica que para el cálculo de cada componente advectivo a $t_{avg} = 10$ min, se requieren $n = 6000$ mediciones). La magnitud del vector viento, \bar{U} (velocidad escalar), observada con el AS3D se calculó usando la Ecuación 5,

$$\bar{U} = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Las intensidades turbulentas por componente representan la relación entre la desviación estándar del componente turbulento y la velocidad escalar (comparable a coeficientes de variación), tal como se presenta en la ecuación 6 para el componente longitudinal,

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{U}} \quad \text{Ecuación 6.}$$

La energía cinética turbulenta (*turbulent kinetic energy*, TKE) (ecuación 7) es la energía cinética media por unidad de masa disipada por los remolinos, cuya dependencia del tamaño de los remolinos se describe mediante distribuciones espectrales de energía (Arya, 1999),

$$TKE = 0.5 \cdot (\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2 + \bar{w}'^2) = 0.5 \cdot \bar{U}^2 \cdot (I_u^2 + I_v^2 + I_w^2) \quad \text{Ecuación 7.}$$

En el rango de frecuencia de interés para la micrometeorología (~30 minutos), la TKE de los remolinos se transfiere en cascada de las escalas grandes a las pequeñas. El ciclo de vida de los remolinos en la atmósfera incluye tres escalas de energía (Foken, 2008; Katul & Chu, 1998): 1) producción (~10⁻⁴ Hz), en la que las energías mecánica y convectiva, entre otras, forman y alimentan grandes remolinos en la atmósfera, por lo que son las propiedades de esta escala las que determinan la tasa de disipación de la energía (Mouri, et al., 2012); 2) subrango de transferencia inercial de energía (microescala de Taylor, ~0,01-5 Hz), en la que los grandes remolinos se dividen progresivamente en pequeños remolinos, y 3) disipación viscosa (microescala de Kolmogorov, ~10-30 Hz), en la que los pequeños remolinos terminan por disiparse térmicamente vía transferencia de momento.

La función de autocorrelación, R , revela la similitud temporal de una variable mediante la correlación de su serie temporal con una copia rezagada de ella misma. La ecuación 8 presenta la autocorrelación para la turbulencia longitudinal en función del rezago de tiempo τ ,

$$R_{uu}(\tau) = \frac{u'(t) \cdot u'(t+\tau)}{u'^2} \quad \text{Ecuación 8.}$$

Por definición, $R = 1$ cuando $\tau = 0$, valor que decae rápidamente a cero en el caso de la turbulencia. El tiempo de escala integral, T_i , es el tiempo máximo en el cual la variable aún se encuentra suficientemente correlacionada con sus valores anteriores, que, por definición, se calcula como el área bajo la curva de R (ecuación 9) (Arya, 1999),

$$T_{i,u} = \int_0^\infty R_{uu}(\tau) \cdot d\tau \quad \text{Ecuación 9.}$$

Cuando $R(\tau)$ cambia a valores negativos, se usa la primera raíz de R como límite superior de integración (Swamy, et al., 1979). Según la hipótesis de turbulencia estacionaria de Taylor (Arya, 1999), el tiempo (T_i) y la longitud de escala integral (L_i , ecuación 10) turbulentos representan la duración promedio de creación de los grandes remolinos y su longitud (~10-500 m) (Foken, 2008),

$$L_{i,u} = T_{i,u} \cdot \bar{U} \quad \text{Ecuación 10.}$$

El tiempo de la escala de Taylor, τ_s (ecuación 11), es un estimador del tiempo con el cual los grandes remolinos se transforman en remolinos más pequeños en el subrango inercial,

$$\tau_{s,u}^2 = -2 \left[\frac{d^2 R_{uu}(0)}{d\tau^2} \right]^{-1} \quad \text{Ecuación 11,}$$

y la longitud de la escala de Taylor, $\lambda_{s,u}$, representa el tamaño promedio de los remolinos más pequeños generados por la división de remolinos grandes (ecuación 12) (Arya, 1999),

$$\lambda_{s,u} = \tau_{s,u} \cdot \bar{U} \quad \text{Ecuación 12.}$$

Por último, a partir de la transformada de Fourier, se determinaron los espectros de energía, $S(n)$ (unidades [m^2s^{-1}]), para los días de menor y mayor TKE diaria acumulada (equivalente a los días de menor y mayor TKE promedio), los cuales se redujeron a la densidad espectral adimensional (normalizada por la tasa de disipación de la energía y el inverso de la frecuencia), $\hat{S} = n \cdot S(n) \cdot (k \cdot z \cdot \varepsilon)^{-2/3}$, y presentados en función de la frecuencia normalizada (adimensional), $f = n \cdot z \cdot (\bar{U})^{-1}$, donde n es la frecuencia [Hz], k es la constante adimensional de von Karman ($k = 0.4$), z es la altura de medición [m], y ε es la tasa promedio de disipación de la energía turbulenta por unidad de masa [$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$] (ecuación 13),

$$\varepsilon = \frac{TKE^{3/2}}{(L_e/C_e)}, \quad \text{Ecuación 13}$$

donde L_e es la longitud de escala de la energía disipada o longitud característica de disipación [m], tradicionalmente definida como la longitud de correlación turbulenta de 2 puntos (Mouri, *et al.*, 2012), y C_e es una constante adimensional de compleja definición (Therry & Lacarrere, 1983), ya que depende de la configuración a gran escala del fluido. En condiciones de turbulencia estacionaria (Andreas, *et al.*, 2008), es geoméricamente razonable estimar la longitud de escala de la energía disipada como el tamaño característico de los grandes remolinos, dejando implícita la constante adimensional, es decir como $L_e / C_e \approx (L_{i,u}^2 + L_{i,v}^2 + L_{i,w}^2)^{1/2}$. Los espectros se promediaron para intervalos de 6 horas a partir de los componentes turbulentos derivados de la descomposición de Reynolds (10 minutos) y valores horarios de \bar{U} y ε (Tabla 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/697/3577>).

Discusión y análisis de resultados

Exposición del anemómetro sónico. La Figura 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/697/3574>, muestra la rosa de los vientos observada por los dos anemómetros con un tiempo de promediación de 10 minutos. La mayor diferencia entre las frecuencias observadas por el AS3D y el ACE fue de 2 % en la dirección SSO. Las discrepancias para el resto de las direcciones no superaron el 1 % (0.8 % en promedio). La excelente comparabilidad a baja frecuencia del AS3D y el ACE, especialmente en la dirección SO (donde está ubicada la torre para el AS3D), muestra que la torre no constituye un obstáculo significativo para el AS3D. Más aun, un obstáculo significativo, incluida la torre misma, generaría estelas y turbulencia sustancial, lo que se manifestaría como una mayor intensidad turbulenta en la dirección del obstáculo. La gran isotropía y la homogeneidad de las intensidades turbulentas, que se presentan promediadas para toda la campaña en función de la dirección y la velocidad del viento horizontal (Figura 3S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/697/3575>), es indicativa de la ausencia de obstáculos mayores en el sitio de medición. Estas dos evaluaciones confirman la buena exposición del

AS3D. Las rosas muestran, además, que las direcciones predominantes del viento fueron E y SE. Las mediciones del ACE no se usaron en el resto del artículo.

Distribución de frecuencia y variabilidad temporal de los componentes turbulentos. Con el fin de evaluar que tan gaussiano es el comportamiento aleatorio de la turbulencia, las distribuciones de frecuencia empíricas de los componentes turbulentos instantáneos se normalizaron por la desviación estándar, por ejemplo, $\hat{w}' = w'/\sigma_w$, y se compararon con la distribución normal (subíndice N: $\mu_N = 0$, $\sigma_N = 1$) usando diagramas cuantil-cuantil. La Figura 4S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/697/3576>, presenta los resultados para una selección aleatoria de 1000 intervalos de 10 minutos. Este análisis revela que la distribución gaussiana representa apropiadamente la turbulencia observada en las tres direcciones del viento en el rango ± 1 -sigma, pero con desviaciones significativas a partir de ± 2 -sigma. Estas desviaciones son, en promedio, simétricas tanto en signo como en magnitud. Sin embargo, no se espera que la turbulencia atmosférica sea puramente gaussiana, ya que los remolinos se correlacionan débilmente (She, 1991) y de otro modo su autocorrelación sería cero para cualquier retraso de tiempo diferente a cero (Hanna, 1979).

Las series temporales muestran la sucesión de ciclos diarios de turbulencia, expresada como desviaciones estándar y TKE de amplitud variable, pero típicamente caracterizados por máximos de $\sigma_u \approx \sigma_v \approx 0.6\text{-}1.3 \text{ m s}^{-1}$ y $\sigma_w \approx 0.5\text{-}0.7 \text{ m s}^{-1}$ al mediodía local (12:00-14:00 tiempo local, LT), y mínimos de $\sigma_u \approx \sigma_v \approx 0.2\text{-}0.4 \text{ m s}^{-1}$ y $\sigma_w \approx 0.1 \text{ m s}^{-1}$ poco antes del amanecer (04:00-05:00 LT) (Figuras 1 y 2). Este análisis también revela menor turbulencia y variabilidad de la turbulencia en el periodo octubre a noviembre (meses de menor radiación) comparada con las registradas en septiembre (aunque fueron de buena de calidad, solo se hicieron mediciones válidas durante 6 días de agosto, por lo que no se incluyeron en la comparación). Resulta notable que la turbulencia lateral fuera comparable y, en algunos casos, ligeramente mayor que la turbulencia longitudinal. Las fluctuaciones de la dirección del viento en Bogotá a $\sim 2 \text{ m s}^{-1}$ ($\sigma_a \approx 30^\circ$) fueron un factor ~ 4 mayores que las reportadas por Hanna (1983) para un terreno plano interrumpido por una pequeña colina en el sur de Idaho, Estados Unidos. Más aun, la similitud en forma funcional y la magnitud del perfil promedio diario (PPD) de los componentes turbulentos horizontales ($\sigma_u \approx \sigma_v$) (Figura 2C-D), indican que la turbulencia fue esencialmente isotrópica en el plano horizontal. Por otro lado, los PPD de la turbulencia en la horizontal y en la vertical tienen formas similares, pero la magnitud de los componentes horizontales fue un factor ~ 2 mayor que en la vertical ($\sigma_u^2 / \sigma_w^2 \approx 4$). Yadav, *et al.* (1996) reportaron cocientes de σ_u^2 / σ_w^2 en los intervalos 3-4 y 3-7 en condiciones estables e inestables, respectivamente, para un sitio de características comparables al Parque Simón Bolívar en una megaciudad subtropical (Nueva Delhi).

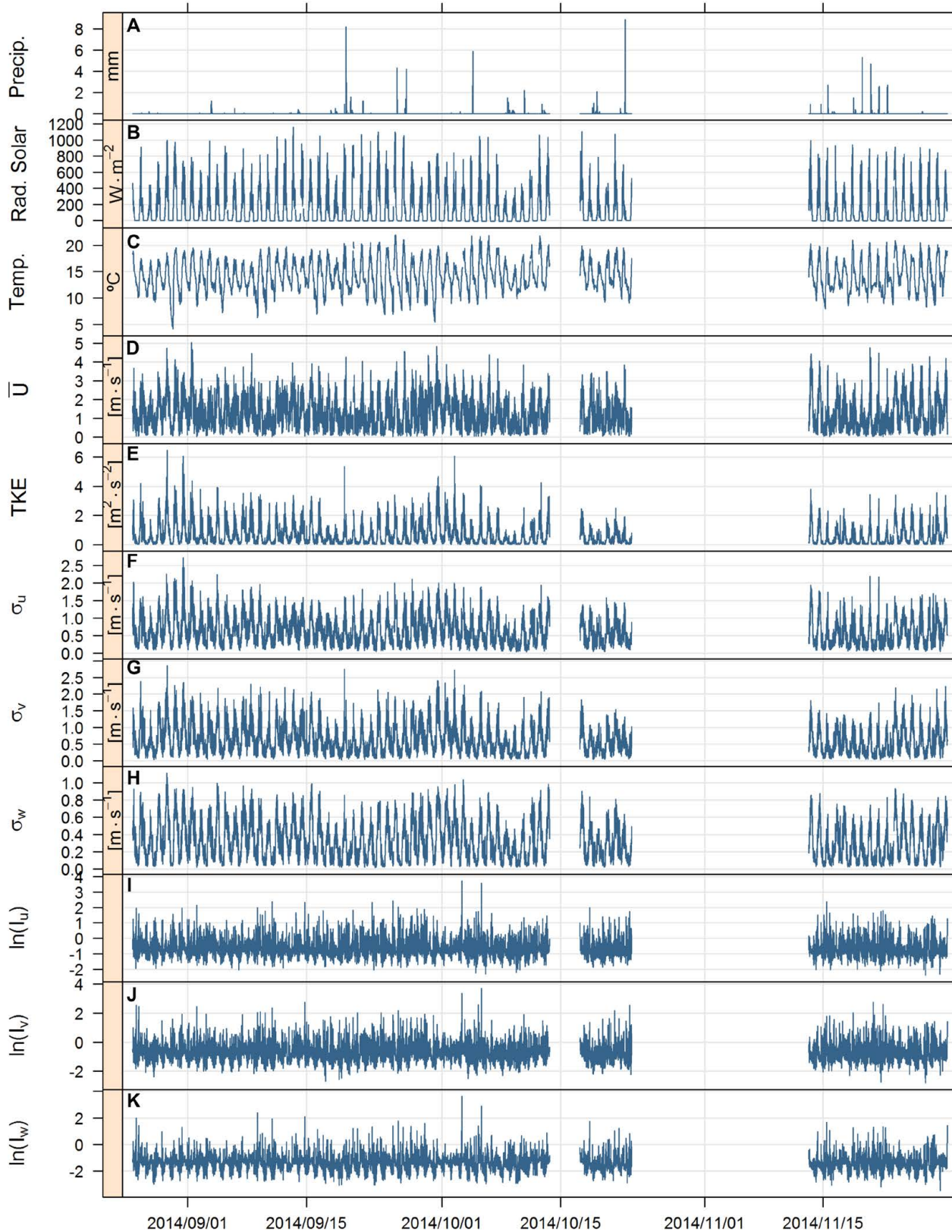


Figura 1. Series temporales de las observaciones meteorológicas realizadas en el Parque Simón Bolívar promediadas a 10 minutos. **A)** Precipitación; **B)** Radiación solar global; **C)** Temperatura del aire; **D)** Velocidad escalar del viento; **E)** *TKE*; **F-H)** Turbulencia expresada como desviaciones estándar de los tres componentes rotados de la velocidad del viento; **I-K)** Intensidad turbulenta por componente rotado. Las mediciones anemométricas (D-K) se hicieron con el AS3D, y las otras (A-C) con instrumentos auxiliares.

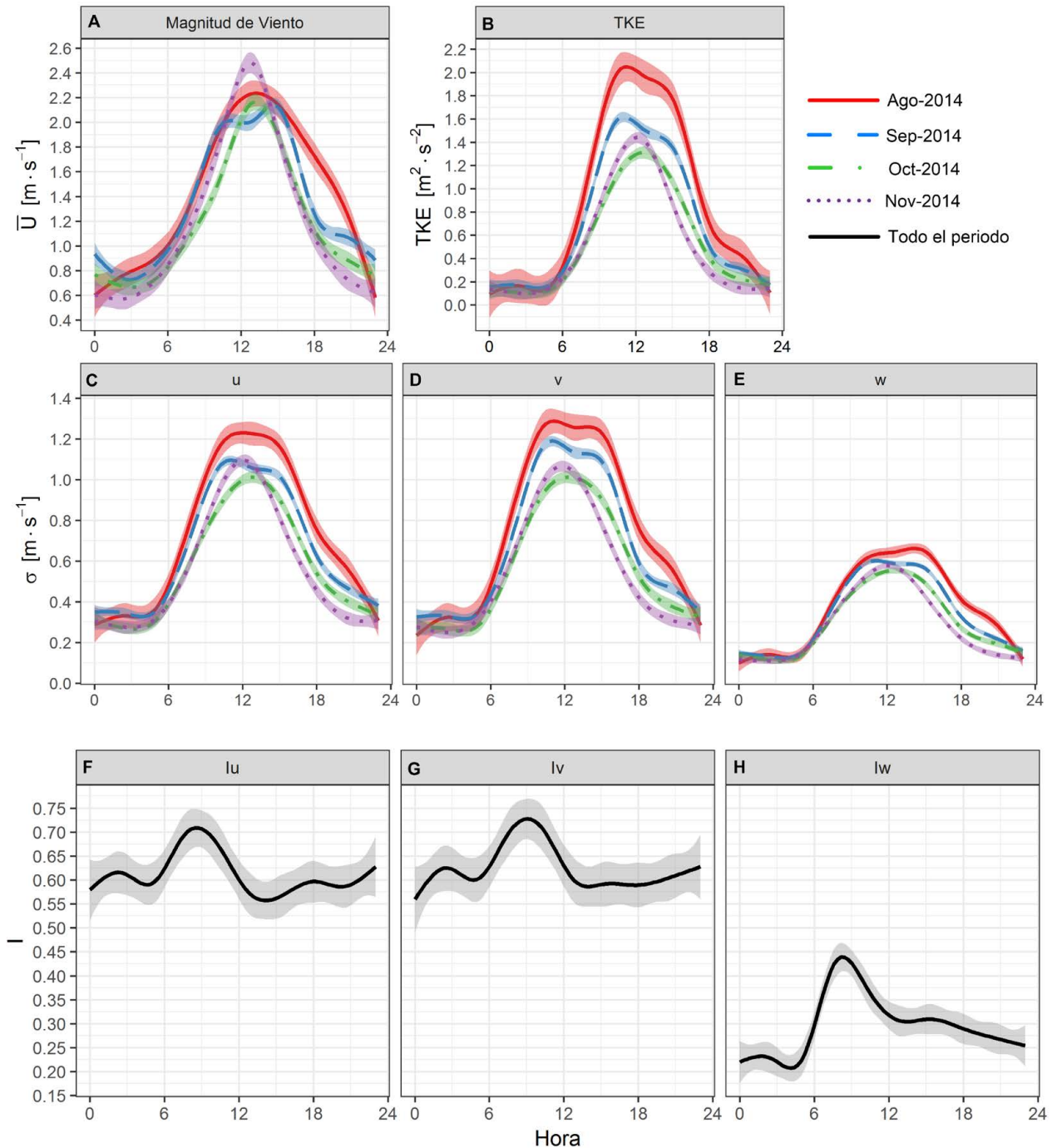


Figura 2. Perfil promedio diario (PPD) de la turbulencia en el Parque Simón Bolívar durante los cuatro meses de medición (año 2014) expresada como **B)** TKE; **C-E)** desviaciones estándar para los tres componentes rotados de la velocidad del viento, y **F-H)** intensidad turbulenta por componente rotado. La sombra indica la variación 2-sigma alrededor del promedio.

Magnitud del viento, intensidad turbulenta y energía cinética turbulenta. Durante la campaña, la velocidad escalar promediada a 10 minutos (\bar{U}) varió típicamente en el intervalo de $0.5-2.3 \text{ m s}^{-1}$ ($0.01-5.06 \text{ m s}^{-1}$ para intervalo completo) (Figura 1D). Estas bajas velocidades del viento son comunes en el trópico (Yadav, *et al.*, 1996). El PPD de \bar{U} muestra un máximo bien definido alrededor del mediodía

y valores base entre la medianoche y el amanecer (Figura 2A). De forma similar, la TKE horaria varió típicamente en el intervalo de $0.1-2.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ ($0.002-6.48 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ para el intervalo completo) (Figuras 1E y 2B). Estas TKE son varias veces más altas que las observadas en la Amazonia brasileña bajo la influencia de corrientes de chorro nocturnas de bajo nivel (Silva da Santana, *et al.*, 2015), y comparables con

las reportadas para Nueva Delhi (**Yadav, et al., 1996**), donde las velocidades del viento a una altura menor de medición ($\bar{U} = 0.6\text{-}3.5 \text{ m s}^{-1}$ a 4 m) fueron mayores que en Bogotá, lo cual indica que para los periodos reportados, la intensidad turbulenta (I) fue mayor en Bogotá que en Nueva Delhi. Por otro lado, el máximo diario de la TKE pasó de ser un valor meseta casi constante, entre $\sim 10:00\text{-}15:00$ LT, en septiembre a ser a un pico bien definido a las $\sim 12:00$ LT en noviembre (agosto se excluyó por las razones ya expuestas). Los valores mínimos nocturnos no presentaron variaciones significativas durante la campaña (Figura 2B).

I varió típicamente en los intervalos de 0.55 a 0.70 y de 0.20 a 0.45 para los componentes horizontales y vertical del viento, respectivamente (Figuras 1I-K y 2F-H). Estas intensidades turbulentas son aún más altas de lo esperado a las bajas velocidades del viento características de Bogotá. **Hansen, et al.** (2012) reportaron bajas I horizontales ($\sim 0.05\text{-}0.2$ a $\sim 5 \text{ m s}^{-1}$) a 20 m de altura en un parque eólico costa afuera en Dinamarca, lo cual es esperable sobre la superficie marina a velocidades altas. Para una colina aislada en terreno plano, **Hanna** (1983) reportó una dependencia hiperbólica de I_v con la velocidad del viento, con valores a $\sim 2 \text{ m s}^{-1}$ en el intervalo de $\sim 0.1\text{-}0.6$ y una mediana de ~ 0.2 , es decir, ~ 3 veces más baja que en Bogotá. Las intensidades turbulentas en los tres componentes reportadas más recientemente para dos sitios (urbano y parque suburbano) en Essen, Alemania (**Weber & Kordowski, 2010**), son, en promedio, un factor ~ 2 más bajas que en Bogotá. Estas comparaciones sugerirían que la turbulencia “adicional” observada en Bogotá es atribuible a la turbulencia derivada de la convección húmeda, del dosel urbano y de la complejidad topográfica. La convección húmeda contribuiría a la turbulencia: 1) antes y durante la precipitación; 2) a través de la formación regional de nubes, particularmente en la segunda temporada de lluvias, y 3) de forma indirecta, debido al forzamiento rápido generado por la variación de la nubosidad y la radiación (**Andreas, et al., 2008**). En la Figura 1 se

presentan los períodos de precipitación (y su impacto en la radiación solar y la temperatura) durante la campaña, y sugiere un vínculo de estos con aumentos sustanciales de la turbulencia, particularmente la lateral. Sin embargo, identificar claramente la turbulencia debida a la convección húmeda es una tarea compleja (**Andreas, et al., 2008**) que excede los propósitos de este artículo.

El PPD para I_u y I_v fue casi constante a ~ 0.6 , con valores ligeramente más elevados en el periodo de $\sim 06:00$ a $12:00$ LT. El PPD para I_w fue ligeramente diferente, con un pico más marcado de ~ 0.45 a las $\sim 09:00$ LT, y valores más bajos (~ 0.2) antes de las $\sim 06:00$ que después de mediodía (~ 0.3). En los meses de mayor turbulencia (agosto y septiembre) durante la campaña, la turbulencia típicamente alcanzó su nivel máximo a media mañana ($\sim 10:00$ LT), lo que podría estar asociado con la “ruptura” de la inversión térmica (**Ortiz, 2016**), mientras que la velocidad del viento aumentaba hasta mediodía ($\sim 13:00$ LT). Como consecuencia, el pico de intensidad turbulenta ocurre a media mañana (Figuras 2F-H).

Autocorrelaciones, tiempos y longitudes de escala. Las funciones de autocorrelación por componente (Ecuación 8) se calcularon para cada período de descomposición de Reynolds (10 minutos), y se promediaron por componente para cuatro períodos del día (00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00 y 18:00-24:00 LT), lo que permitió evidenciar que los componentes turbulentos tienden a durar correlacionados más tiempo en la noche que en el día (Figura 3). Los tiempos de la escala de Taylor variaron en los intervalos de 10 a 90 s y de 6 a 11 s para los componentes horizontales y vertical del viento, respectivamente. Los tiempos de escala integral para el componente vertical y los componentes horizontales variaron en los intervalos de 2 a 500 s y de 11 a 500 s, respectivamente (Figura 4A). Las longitudes de escala integral resultantes, asimilables al tamaño de remolinos en la zona de producción, variaron en los intervalos de 2 a 80 m y de 10 a 1000 m para el componente vertical y los componentes horizontales, respectivamente (Figura 4B).

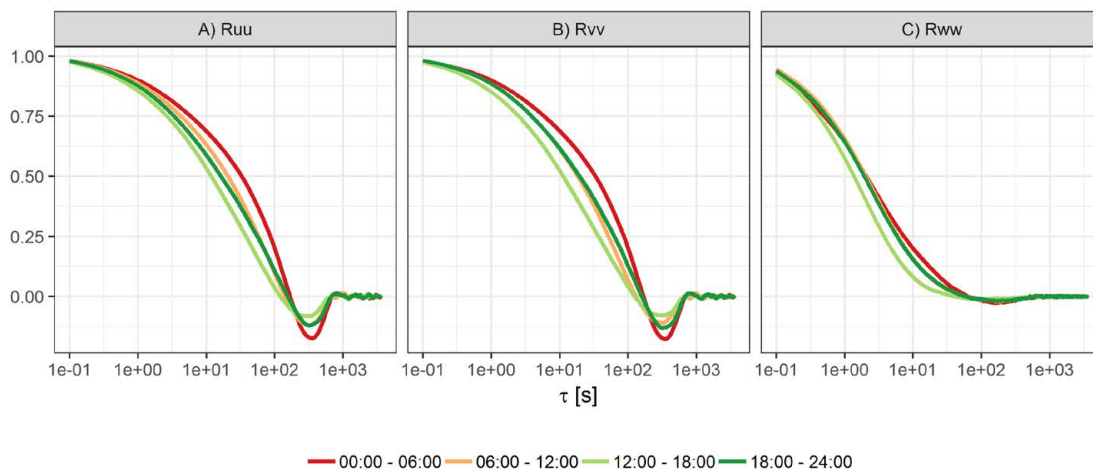


Figura 3. Funciones de autocorrelación promedio para los componentes turbulentos: **A)** longitudinal, **B)** lateral, y **C)** vertical de la velocidad del viento en el Parque Simón Bolívar en los cuatro intervalos horarios del día

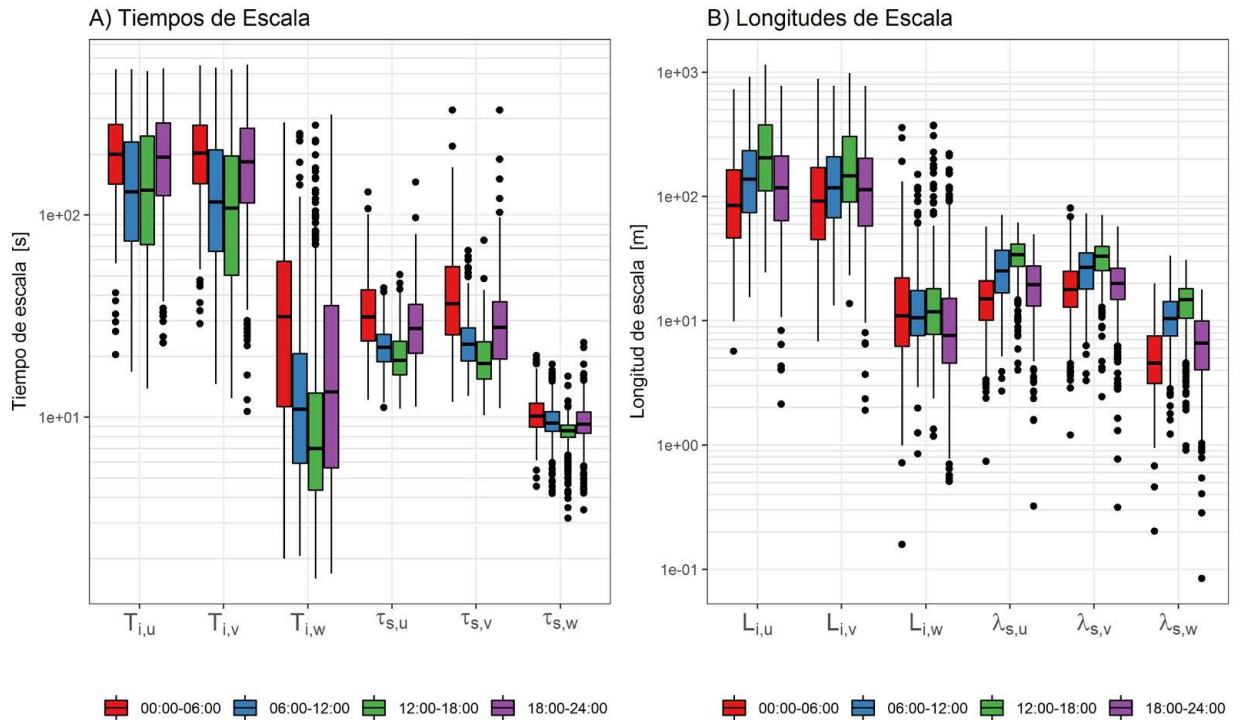


Figura 4. Diagramas de cajas y bigotes para: **A)** los tiempos y **B)** las longitudes de escala integral y de Taylor para los tres componentes rotados de la turbulencia atmosférica en el Parque Simón Bolívar en los cuatro intervalos horarios del día durante la campaña.

Por su parte, las longitudes de escala de Taylor, comparables con el tamaño de los remolinos más pequeños asociados a la transferencia inercial de energía, variaron en los intervalos de 1 a 30 m y de 5 a 80 m para el componente vertical y los componentes horizontales, respectivamente. Además, los tiempos de las escalas integral y de Taylor fueron significativa y sistemáticamente mayores en la noche que en el día. Cuando se considera la mayor velocidad del viento en el día, las longitudes de escala, asimilables al tamaño de los remolinos, resultaron ser mayores en el día que en la noche. Los remolinos más grandes ocurrieron en el período de 12:00 a 18:00 LT. En resumen, los grandes remolinos tuvieron duraciones (tamaños) modales de producción de ~ 11 s (~ 10 m) y ~ 160 s (~ 120 m) en la vertical y la horizontal, respectivamente. Por su parte, los remolinos pequeños, representativos del subrango inercial de energía, tuvieron tamaños (duraciones) modales de ~ 9 m (~ 9 s) y ~ 23 m (~ 24 s) en la vertical y la horizontal, respectivamente. Las longitudes de escala integral horizontales fueron de un orden de magnitud mayores que en la vertical, aproximadamente. Esta enorme disparidad de escalas es el resultado principalmente del confinamiento espacial de los remolinos, cuya relación de tamaños máximos hipotéticos sigue la proporción de longitud característica del área urbana a la altura de la capa de mezcla. En contraste, no hubo diferencias tan grandes entre los tiempos necesarios para transformar estos remolinos en remolinos más pequeños en la horizontal y la vertical y, por lo tanto, la diferencia entre las longitudes horizontales y vertical de la escala de Taylor fue mucho menor.

Tasa de disipación de energía turbulenta y espectros normalizados de energía. Nuestras estimaciones de la longitud de escala de la energía disipada son comparables a los valores reportados por **Therry & Lacarrère (1983)** para mediciones en la capa de superficie ($L_e/C_e \approx 200$ m para una altura de capa de mezcla de ~ 1000 m), y nuestras estimaciones resultantes de la tasa de disipación de energía por unidad de masa, de $\sim 10^{-3}$ m²/s³ y $\sim 2 \cdot 10^{-2}$ m²/s³, para los días de menor y mayor TKE, respectivamente (ver Tabla 1S), son comparables a los valores reportados por **Kaimal, et al. (1973)**.

La estabilidad atmosférica condiciona la forma funcional de los espectros normalizados al menos de tres formas (**Kaimal, et al., 1976**): 1) cuanto mayor es la estabilidad menor es la turbulencia, lo que se refleja en un pico espectral menos pronunciado; 2) una mayor inestabilidad desplaza la frecuencia pico (frecuencia a la densidad espectral máxima) hacia frecuencias más bajas, y 3) los espectros en diferentes momentos del día y de los tres componentes turbulentos convergen, es decir se superponen, a frecuencias relativamente altas, independientemente de la estabilidad atmosférica, debido a que en el subrango inercial, donde ocurre la transferencia inercial de energía de los remolinos grandes a los pequeños, no hay forzamiento directo, es decir, la interacción de los remolinos con fuerzas mecánicas y convectivas es despreciable. La teoría de Kolmogorov predice que la densidad espectral normalizada en la zona inercial decrece dos décadas por cada tres décadas de aumento de la frecuencia normalizada, es decir, $\hat{S} \propto f^{-2/3}$ (**Kaimal, et al., 1972; Foken, 2008**).

La Figura 5 presenta los espectros normalizados de energía (suavizados mediante Kernel con una fracción de 0.75) para períodos de seis horas en los días de menor (10 de septiembre de 2014) y mayor TKE (30 de septiembre de 2014) durante la campaña. Los espectros de los cuatro períodos del día presentan la pendiente característica del subrango inercial, lo que marca su inicio, a frecuencias normalizadas de $f_w \approx f_v \approx 1$ en la horizontal y de $f_w \approx 3$ en la vertical. En el día de menor TKE, los espectros se superponen a partir de esas mismas frecuencias. Como resultado de una mayor variación de L_e , los espectros son mucho menos compactos en el día de mayor TKE, en el cual tienden a converger solamente al final del subrango inercial y al comienzo de la microescala de Kolmogorov a $f \approx 100$.

Los picos espectrales caracterizan la zona de producción. Todos los espectros en la vertical tuvieron picos bien definidos a $f_w \approx 0.4$. En contraste, la mayoría de los espectros horizontales en el día de menor TKE son monotónicos. Para el día de mayor TKE, y los períodos alrededor de mediodía en el día de menor TKE, los picos ocurrieron a $f_u \approx 0.02$ y $f_v \approx 0.03$. Las densidades espectrales y formas funcionales de los espectros son comparables a las ya clásicas reportadas por **Kaimal, et al.** (1972), las cuales a su vez son muy similares en forma y magnitud a las reportadas para el norte de la India (**Yadav, et al.**, 1996) y el noreste del Brasil (**Magnago, et al.**, 2010). Para el día de mayor TKE,

las frecuencias y densidades espectrales normalizadas para los componentes longitudinal y vertical corresponden a condiciones neutras a ligeramente inestables en las curvas generalizadas de **Kaimal, et al.** (1972). En contraste, para el componente lateral, incluso en el día de menor TKE, las frecuencias pico en Bogotá ($f_v = 0.01-0.07$) son comparables a las del componente longitudinal, y un orden de magnitud menores que las reportadas en los tres artículos mencionados arriba ($f_v = 0.1-0.3$), lo que concuerda con una turbulencia lateral elevada e isotropía horizontal. Además, las densidades espectrales son sustancialmente mayores, lo que caracterizaría los espectros laterales en Bogotá como significativamente inestables según **Kaimal, et al.** (1972).

Tal como era de esperar, las frecuencias pico se desplazaron hacia frecuencias menores en la zona de producción cuando la TKE aumentó, lo cual es indicativo de una mayor generación de turbulencia. Asimismo, independientemente de la TKE, las frecuencias pico aumentaron a medida que disminuía la producción de turbulencia entre el día y la noche. No se observaron diferencias sustanciales en la densidad espectral entre los días con menor y mayor TKE.

Conclusiones y perspectivas

Este es el primer estudio observacional directo y la primera caracterización estadística de la turbulencia en Colombia, y uno de los primeros sobre ciudades tropicales. La excelente

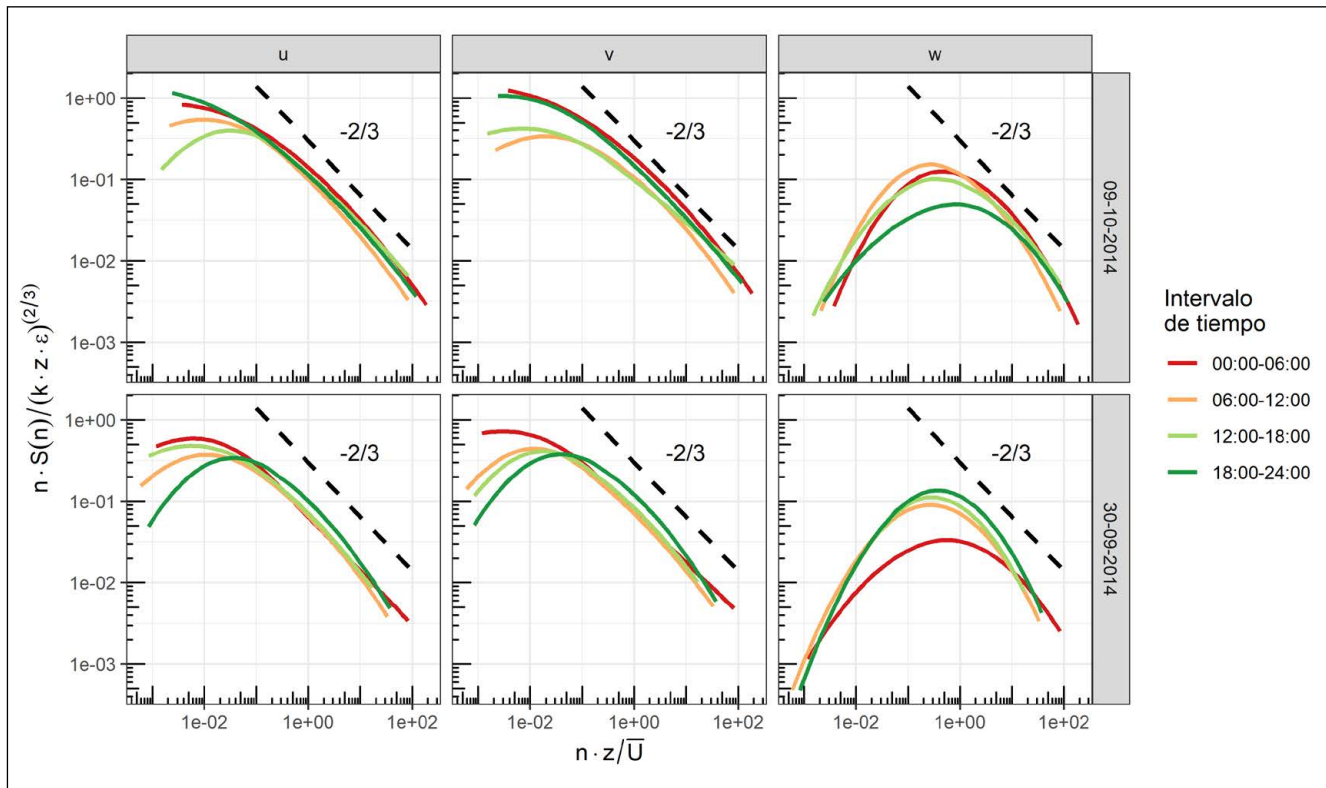


Figura 5. Espectros reducidos de energía de los tres componentes rotados de la turbulencia atmosférica en el Parque Simón Bolívar en los cuatro intervalos horarios en los días de menor (09/10/2014) y mayor (30/09/2014) TKE durante la campaña

comparabilidad a baja frecuencia con un anemómetro de copa estándar, y la isotropía polar de las intensidades turbulentas observadas a alta frecuencia, validan la buena exposición del anemómetro sónico y de las mediciones reportadas.

La distribución gaussiana de frecuencia representa apropiadamente la turbulencia observada en las tres direcciones del viento en el rango ± 1 -sigma.

Los ciclos diarios de la velocidad escalar, la turbulencia expresada como desviación estándar, y la TKE se caracterizan por máximos alrededor del mediodía y mínimos antes del amanecer. El presente estudio revela que, durante el periodo de medición, la turbulencia lateral en Bogotá fue elevada y comparable a la turbulencia longitudinal ($\sigma_v \cong \sigma_u \approx 0.2$ - 1.3 m s^{-1} PPD), lo que permite caracterizar su atmósfera como horizontalmente isotrópica. La turbulencia vertical ($\sigma_w \approx 0.1$ - 0.7 m s^{-1} PPD) fue ~ 2 veces menor que la longitudinal, similar a lo reportado en la literatura. Las intensidades turbulentas observadas ($I_u \approx I_v \approx 0.6$, $I_w \approx 0.3$) fueron ~ 2 a ~ 3 veces más altas que lo reportado para latitudes medias a las bajas velocidades del viento en Bogotá. Esta turbulencia “adicional” podría tener su origen en la convección húmeda, y en la complejidad topográfica y del dosel urbano.

Con base en análisis de autocorrelación, se estima que los remolinos grandes en la zona de producción, es decir al inicio de la cascada de energía, tuvieron longitudes características de $\sim 120 \text{ m}$ y $\sim 10 \text{ m}$ en la horizontal y la vertical, respectivamente.

El análisis espectral revela frecuencias y densidades espectrales de producción e inerciales concordantes con el análisis estadístico. El subrango inercial se extiende de frecuencias normalizadas de $f_u' \approx f_v' \approx 1$, y $f_w' \approx 3$ hasta de $f \approx 100$. La zona de producción está caracterizada por picos espectrales a $f_u' \approx 0.02$, $f_v' \approx 0.03$, y $f_w' \approx 0.04$. Las densidades espectrales y las formas funcionales de los espectros longitudinales y verticales son comparables a las reportadas en la literatura para condiciones neutrales a ligeramente inestables. En contraste, durante el periodo de medición, las frecuencias pico en Bogotá para el componente lateral ($f_v' = 0.01$ - 0.07) fueron un orden de magnitud menores que las reportadas en la literatura, lo que concuerda con una turbulencia lateral elevada e isotropía horizontal.

Entre otros aportes, la caracterización hecha en este estudio provee las variables y parámetros necesarios para refinar y validar la simulación de huellas lagrangianas estocásticas en los Andes tropicales, con las cuales es posible, por ejemplo, ubicar fuentes de contaminación. Estas huellas se estiman a partir de trayectorias definidas cinemáticamente, por ejemplo, $dx/dt = \bar{u} + u'$ para el componente zonal de una parcela de aire no sometida a deposición; \bar{u} generalmente se interpola a partir de campos meteorológicos simulados. En el caso más simple (turbulencia homogénea), el componente turbulento puede estimarse asumiendo “caminata aleatoria”, $u'(t + \Delta t) = R_{L,u}(\Delta t) \cdot u'(t) + u''$, donde $R_{L,u}$ es el coeficiente lagrangiano de autocorrelación (el cual puede estimarse a partir del tiempo de escala integral y la intensidad turbulenta),

y u'' es la turbulencia puramente aleatoria (la cual puede estimarse a partir de la desviación estándar longitudinal y $R_{L,u}$) (Lin, *et al.*, 2003; Arya, 1999).

Información suplementaria

Figura 1S. **A)** Mapa y topografía del norte de Suramérica, mostrando la ubicación de Bogotá en la Cordillera Oriental de los Andes. **B)** Mapa de localización del sitio de medición en Bogotá, incluyendo topografía y división política de Bogotá (“localidades”). **C)** Imagen satelital centrada en el sitio de medición en el Parque Simón Bolívar (PSB) en Bogotá. Los alrededores de la estación de monitoreo, incluyendo la torre donde fue instalado AS3D, fueron divididos en 7 sectores según el uso del suelo. Huellas de observación de AS3D para cada uno de los 4 meses de medición durante 2014: **D)** agosto, **E)** septiembre, **F)** octubre, y **G)** noviembre. Vea la figura 1S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/697/3573>

Figura 2S. Rosas de viento observadas por los anemómetros **A)** sónico (AS3D) y **B)** de copa (ACE) en el PSB entre 2014-08-25 y 2014-11-24. Vea la figura 2S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/697/3574>

Figura 3S. Intensidad turbulenta (promedio durante la campaña de medición) en los tres componentes de rotados de la velocidad del viento en función de la magnitud de la velocidad y dirección horizontal del viento. La isotropía de estas “rosas” de la intensidad turbulenta del viento sugieren que no hay ausencia de obstáculos mayores al flujo atmosférico en la proximidad de la torre meteorológica. De haberlo, un obstáculo mayor generaría estelas que se manifestarían como sectores de mayor intensidad turbulenta en la dirección del obstáculo. Vea la figura 3S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/697/3575>

Figura 4S. Diagramas cuantil-cuantil Gaussianos de la turbulencia normalizada en los 3 componentes rotados de la velocidad del viento en el PSB (muestra aleatoria de 1000 intervalos de 10 minutos de medición). Vea la figura 4S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/697/3576>

Tabla 1S. Longitud de escala integral, longitud característica de disipación, y tasa de disipación de energía cinética turbulenta medidas desde el PSB para los días de mayor (2014-09-30) y menor (2014-10-09) TKE promedio. Vea la tabla 1S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/697/3577>

Agradecimientos

Esta investigación fue conjuntamente financiada por Colciencias, con recursos del proyecto de investigación “Emisiones atmosféricas e impacto en calidad del aire y salud pública asociados al cambio de uso del suelo y la agricultura intensiva en la Orinoquia colombiana” (Código 1101-569-35161/Convocatoria 569-2012/Contrato RC 0009-2013), y mediante la beca del Programa Jóvenes Investigadores otorgada a E.Y. Ortiz, así como por la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá. Los autores agradecen también la disponibilidad y apoyo logístico de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá para realizar mediciones colocalizadas

en el Parque Simón Bolívar, y las mediciones meteorológicas gentilmente suministradas. Por último, agradecemos a los dos revisores anónimos de este manuscrito, quienes con su cuidadosa revisión, comentarios y preguntas perspicaces lo enriquecieron sustancialmente.

Contribución de los autores

Edison Y. Ortiz preparó la base de datos, desarrolló el código en R para su procesamiento, procesó y analizó la información, interpretó resultados y preparó el manuscrito. Rodrigo Jimenez dirigió el proyecto de investigación, contextualizó y comparó los resultados y preparó el manuscrito. Gilberto J. Fochesatto asesoró el procesamiento y análisis de la información y revisó el manuscrito. Luis A. Morales-Rincon estableció el sistema de medición en el Parque Simón Bolívar, llevó a cabo las mediciones y revisó el procesamiento, el análisis de la información y el manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Andreas, E.L., Geiger, C.A., Treviño, G., Claffey, K.J.** (2008). Identifying nonstationarity in turbulence series. *Boundary-Layer Meteorol.* **127**: 37-56.
- Arango, C.D.** (2018). Comunicación personal.
- Arya, S.P.** (1999). *Air pollution meteorology and dispersion*, New York, USA: Oxford University Press, pp. 85-96, 108-110, 112-113, 123-124, 183-187, 260-261.
- Barlas, E., Wu, K.L., Zhu, W.J., Porté-Agel, F., Shen, W.Z.** (2018). Variability of wind turbine noise over a diurnal cycle. *Renew. Energ.* **126**: 791-800.
- Christen, A., van Gorsel, E., Vogt, R.** (2007). Coherent structures in urban roughness sublayer turbulence. *Int. J. Climatol.* **27**: 1955-1968.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística – Colombia (DANE)** (2015). *Demografía y población – proyecciones de población – Colombia. “Proyecciones de población municipales por área 2005-2020”*, Bogotá. Fecha de consulta: 01/07/2018. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- Foken, T.** (2008). *Micrometeorology*. Heidelberg, Germany: Springer, pp. 52-60, 109-111.
- Guerrero, O.J., Jimenez, R.** (2012). Mutual information in the air quality monitoring network of Bogota – Colombia, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2012, Abstract IN23B-1505, San Francisco (CA), USA. Fecha de consulta: 01/07/2018. Disponible en: http://fallmeeting.agu.org/2012/files/2012/12/agu_fm_2012_poster_ojg_rjp.pdf
- Guerrero, O.J.** (2013). Desarrollo de una metodología para evaluar la cobertura espacial de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Fecha de consulta: 01/07/2018. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/10269/>
- Guerrero, O.J., Jiménez, R.** (2014). Spatial representativeness of the Bogota air quality monitoring network. A&WMA’s 107th Annual Conference & Exhibition, Paper 33622, Long Beach (CA), USA. Fecha de consulta: 1 de julio de 2018. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Rodrigo_Jimenez2/publications
- Hanna, S.R.** (1979). Some statistics of Lagrangian and Eulerian wind fluctuations. *J. Appl. Meteor.* **18** (4): 518-525.
- Hanna, S.R.** (1983). Lateral turbulence intensity and plume meandering during stable conditions. *J. Climate Appl. Meteor.* **22**: 1424-1430.
- Hansen, K.S., Barthelmie, R.J., Jensen, L.E., Sommer, A.** (2012). The impact of turbulence intensity and atmospheric stability on power deficits due to wind turbine wakes at Horns Rev wind farm. *Wind Energ.* **15** (1): 183-196.
- Jaramillo-Robledo, A. & Chaves-Córdoba, B.** (2000). Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. *Cenicafé.* **51** (2): 102-113 Fecha de consulta: 9 de noviembre de 2018. Disponible en: <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc051%2802%29102-113.pdf>
- Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C., Izumi, Y., Coté, O.R.** (1972). Spectral characteristics of surface-layer turbulence, *Q.J.R. Meteorol. Soc.* **98**: 563-589.
- Kaimal, J.C.** (1973). Turbulence spectra, length scales and structure parameters in the stable surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.* **4**: 289-309.
- Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C., Izumi, Y., Coté, O.R., Haugen, O.R., Caughey, S.J., Readings, C.J.** (1976). Turbulence structure in the convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.* **33**: 2152-2169.
- Katul, G. & Chu, C.-R. A.** (1998). A theoretical and experimental investigation of energy-containing scales in the dynamic sub-layer of boundary-layer flows. *Boundary-Layer Meteorol.* **86** (2): 279-312.
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M.W., Schmid, H.P.** (2004). A simple parameterisation for flux footprint predictions. *Boundary-Layer Meteorol.* **112**: 503-523.
- Lin, J.C., Gerbig, C., Wofsy, S.C., Andrews, A.E., Daube, B.C., Davis, K.J., Grainger, C.A.** (2003). A near-field tool for simulating the upstream influence of atmospheric observations: The Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT) model. *J. Geophys. Res.* **108** (D16): 4493-4511.
- Magnago, R., Fisch, G., Moraes, O.** (2010). Análise espectral do vento no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). *Rev. Bras. Meteorol.* **25** (2): 260-269.
- Montoya, G.J., Cepeda, W., Eslava, J.A.** (2004). Características de la turbulencia y de la estabilidad atmosférica en Bogotá. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **28** (108): 327-335.
- Morales-R, L.A., Cañas Soler F., Hernández, A.J., Jimenez, R.** (2015a). Captura y emisión de bióxido de carbono en una gran zona verde de Bogotá medidos mediante covarianza de remolinos. V Congreso Colombiano y Conferencia Inter-nacional de Calidad del Aire y Salud Pública (CASAP), Bucaramanga, Colombia. Fecha de consulta: 1 de julio de 2018. Disponible en: http://casap.com.co/2015/es/memorias/libro_memorias.pdf?v=2
- Morales-R, L.A., Hernández, A.J., Cañas-Soler, F., Jiménez, R.** (2015b). Flujos de CO₂ durante un periodo de descanso de cultivos transitorios mecanizados en una unidad agroindustrial en la altillanura colombiana. V CASAP,

- Bucaramanga, Colombia. Fecha de consulta: 1 de julio de 2018. Disponible en: http://casap.com.co/2015/es/memorias/libro_memorias.pdf?v=2
- Mouri, H., Hori, A., Kawashima, Y., Hashimoto, K.** (2012). Large-scale length that determines the mean rate of energy dissipation in turbulence. *Phys. Rev. E* **86**: 026309-1 – 026309-7.
- Ortiz, E.Y., Galvis, B.R., Pachón, J.E., Cuadros, N.** (2015). Analysis of 2002-2013 ambient air quality trends in Bogotá. V CASAP, Bucaramanga, Colombia. Fecha de consulta: 1 de julio de 2018. Disponible en: http://casap.com.co/2015/es/memorias/libro_memorias.pdf?v=2
- Ortiz, E.Y.** (2016). Medición y caracterización de la turbulencia atmosférica en Bogotá y su influencia en la dispersión de contaminantes. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, pp. 84-88. Fecha de consulta: 9 de noviembre de 2018. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/55987/>
- Pinzón, G., González, D., Ramírez, A.** (2016). Análisis comparativo de seis lugares de interés para la ubicación de instrumentación astronómica en Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Exact. Fis. Nat.* **40** (154): 53-68.
- Ren, Y., Zhang, H., Wei, W., Wu, B., Cai, X., Song, Y.** (2019). Effects of turbulence structure and urbanization on the heavy haze pollution process. *Atmos. Chem. Phys.* **19**: 1041-1057. <https://doi.org/10.5194/acp-19-1041-2019>
- Richardson, J.R., Kabamba, P.T., Atkins, E.M., Girard, A.R.** (2014). Safety margins for flight through stochastic gusts. *J. Guid. Control Dyn.* **37** (6): 2026-2030.
- Roth, M., Jansson, C., Velasco, E.** (2017). Multi-year energy balance and carbon dioxide fluxes over a residential neighbourhood in a tropical city. *Int. J. Climatol.* **37**: 2679-2698.
- Saylor, J.E., Mora, A., Horton, B.K., Nie, J.** (2009). Controls on the isotopic composition of surface water and precipitation in the Northern Andes, Colombian Eastern Cordillera, *Geochimica et Cosmochimica Acta.* **73**: 6999-7018.
- Shao, Y.** (1992). Turbulent dispersion in coastal atmospheric boundary layers: An application of a Lagrangian model. *Boundary-Layer Meteorol.* **59** (4): 363-385.
- She, Z.-S.** (1991). Intermittency and non-gaussian statistics in turbulence. *Fluid Dyn. Res.* **8** (1-4): 143-158.
- Silva Da Santana, R.A., Tota, J., Nascimento Dos Santos, R.M., Souza Do Vale, R.** (2015). Estabilidade e estrutura da turbulência sob a influência de jatos de baixos níveis noturnos no sudoeste da Amazônia. *Rev. Bras. Meteorol.* **30** (4): 405-414.
- Starkenbug, D., Metzger, S., Fochesatto, G.J., Alfieri, J.G., Gens, R., Prakash, A., Cristóbal, J.** (2016). Assessment of despiking methods for turbulence data in micrometeorology. *J. Atmospheric Ocean. Technol.* **33** (9): 2001-2013.
- Starkenbug, D., Fochesatto, G.J., Prakash, A., Cristóbal, J., Gens, R., Kane D.L.** (2013). The role of coherent flow structures in the sensible heat fluxes of an Alaskan boreal forest. *J. Geophys. Res. Atmospheres.* **118** (15): 8140-8155.
- Swamy, N.V.C., Gowda, B.H.L., Lakshminath, V.R.** (1979). Auto-correlation measurements and integral time scales in three-dimensional turbulent boundary layers. *Appl. Sci. Res.* **35** (4): 237-249.
- Therry, G. & Lacarrère, P.** (1983). Improving the eddy kinetic energy model for planetary boundary layer description. *Bound.-Layer Meteorol.* **25**: 63-88.
- Weber, S. & Kordowski, K.** (2010). Comparison of atmospheric turbulence characteristics and turbulent fluxes from two urban sites in Essen, Germany, *Theor. Appl. Climatol.* **102**: 61-74.
- Yadav, A.K., S. Raman, M. Sharan.** (1996). Surface layer turbulence spectra and dissipation rates during low winds in tropics. *Boundary-Layer Meteorol.* **79** (3): 205-223.

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.racefyn.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.racefyn.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 Research and Contributor ID* (Identificación del Investigador y del colaborador abierto)
7. Direcciones electrónicas de todos los coautores y códigos ORCID *Open Research 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 arábica 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.
- 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 (Key words).
- Introducción.
- Materiales y métodos.
- Resultados y Discusión para comunicaciones cortas.
- Discusión.
- Agradecimientos a colaboradores y a las 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 JPEG o PNG.

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



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, Online Computer Library Center – OCLC, Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record, RLG. Within the Colombian citation system, the journal is register in Publindex (The Journal index Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias).

The journal's website (www.racefyn.co) allows free and open access to full-text articles with the purpose of contributing to the visibility, access and dissemination of Colombian scientific production.

The first issue was published in December 1936, year of the official creation of the National Academy, led by Jorge Álvarez Lleras. The journal has been edited 41 volumes since then.

Peer Review Process

Manuscripts that meet the author guidelines are welcomed. Manuscripts will be assessed by the editor in chief and associate editors' expert in the topic of the manuscript.

If the editors see fit, the manuscript will be sent to, at least, two peers knowledgeable in the topic of the manuscript. It is estimated the peer reviewing process will take around 90 days.

The reviewers can decide to a) accept the article without any modification, b) accept it if some recommendations are addressed, or c) reject the manuscript. If peers exhibit contradicting assessments, an extra reviewer will be approached to settle disparities and reach a final decision.

The corresponding author will be notified of the results of the peer review process. The author should return an amended version, along with a documenting reporting the response to the reviewers, four weeks after receiving the results of the reviewers.

If the author does not send these documents past the suggested time, the journal will assume the manuscript has been withdrawn. If the author send these documents past the suggested time, the journal takes the manuscript as a new submission and the reviewing process starts anew.

Accepted manuscripts are considered property of the journal. Thus, the journal is free to reproduce an entire manuscript or parts of it.

The journal is not responsible of the contents of the published manuscripts and related legal implications.

Publication Ethics and Publication Malpractice Statement

The journal abides by the *Committee on Publication Ethics* (COPE) standards. These guidelines can be consulted in the following links:

COPE guidelines on good publication practice:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct:

<https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

See document pdf (annex)

Open access policy

The journal enables open access to published articles via its website (www.racefyn.co) to contribute to the dissemination, accessibility, and visibility of scientific work.

Author Guidelines

Research articles. A manuscript documenting the results of at least one experiment/study by following the following structure: introductions, methodology, results, discussion, conclusions, and references. Extra material can be reported as an appendix.

Brief articles. Manuscripts reporting the results of novel experiments/study in a succinct manner and that require prompt diffusion.

Inaugural articles or Review articles. Manuscripts reporting literature reviews on a topic. It is one requirement for the Academics to be admitted to the Academy

Letters to the editor. Manuscripts proposing critical comments, novel analysis or re-interpretations of published work.

Book reviews. Short manuscripts reporting a review of a book recently published within an area of interest to the journal.

Authors correction

Errata

Information for Authors

Authors should bear in mind the following

1. Submitted manuscripts must be original and of outstanding quality. They can be written in Spanish or English in an area related to the **Exact, Physical or Natural Sciences**. All works accepted will remain permanent property of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences so that such work can be published in hard copy or in electronic format, including web posting. (See transference of authors' rights).
 2. The corresponding author will be required to state that the work is original, has not been published elsewhere, is not under review elsewhere and that co-authors agree as to the version submitted. Equally important, the corresponding author will be asked to state whether copyrights have been passed on to other parties. (See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
 3. It is assumed all listed authors have contributed substantially to the manuscript. Their order in the manuscript should be reached by agreement. Finally, each author's contribution should be explicitly stated. Collaborators whose contribution was not substantial (see above) should be mentioned in the 'acknowledgments' section (see <http://www.icmje.org/> for a reference). Financial supports and grants should also be mentioned in this section.
 4. The terminology used in the manuscript should follow that used in specific areas (we therefore recommend authors to consult specialised references in this regards as to their own fields of research). Scientific names should follow recommendations such as those stated, for example, by the International Code of Botanical Nomenclature and the International Committee on Systematics of Prokaryotes.
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 tiff format.

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.

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*. Worldwide 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 tiff format.

3. Structure of the article

The following sections are to be included:

1. An abstract should be included in both Spanish and English.
2. Key words (no more than 6) should be included in both Spanish and English.
3. Introduction.
4. Materials and methods.
5. Results and Discussion for short communications.
6. Discussion.
7. Acknowledgments to collaborators and institutions and organizations which financed the research.
8. Declaration of conflict of interest.

4. Additional information: Figures

- Each figure is included in a separate page in jpg or tiff format
- Corresponding legends are included in a separate page
- Figures should be charged in JPG o PNG 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.

