



ISSN 0370-3908

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

Academia Colombiana de Ciencias  
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 38 • Número 146 • Págs. 1-124 • Enero - Marzo de 2014 • Bogotá - Colombia





ISSN 0370-3908

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

Academia Colombiana de Ciencias  
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 38 · Número 146 · Págs. 1-124 · Enero - Marzo de 2014 · Bogotá - Colombia

## Comité editorial

### Editoras

Elizabeth Castañeda  
Instituto Nacional de Salud,  
Bogotá, Colombia

Carmenza Duque  
Universidad de La Sabana, Chía, Colombia  
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

### Editores asociados

#### Ciencias físicas y Ciencias matemáticas

Bernardo Gómez  
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Pedro Fernández de Córdoba  
Universidad Politécnica de Valencia, España

Rubén Antonio Vargas  
Universidad del Valle,  
Cali, Colombia

Victor Albis  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia

#### Ciencias naturales (biología, botánica, zoología, ecología, bioquímica)

Gabriel Roldán  
Universidad Católica de Oriente,  
Rionegro, Antioquia, Colombia

M. Gonzalo Andrade  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia

Jaime Ricardo Cantera  
Universidad del Valle,  
Cali, Colombia

José Luis Fernández  
Real Jardín Botánico, Consejo Superior de  
Investigaciones Científicas, Madrid, España

Thomas Defler  
Universidad Nacional de Colombia,  
Leticia, Colombia

#### Ciencias de la tierra

Germán Poveda  
Universidad Nacional de Colombia,  
Medellín, Colombia

Armando Espinosa  
Universidad del Quindío,  
Armenia, Colombia

Carlos Alberto Vargas  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia

José Ignacio Martínez  
Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

#### Ciencias humanas

Guillermo Páramo  
Universidad Central, Bogotá, Colombia

Rubén Ardila  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia

#### Ciencias biomédicas

Felipe Guhl  
Universidad de Los Andes,  
Bogotá, Colombia

Luis Fernando García  
Universidad de Antioquia,  
Medellín, Colombia

#### Ciencias químicas

Fanor Mondragón  
Universidad de Antioquia,  
Medellín, Colombia

Moisés Wasserman  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia

Sonia Moreno  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia

## Comité científico internacional

Ángela María Guzmán  
University of Central Florida,  
Orlando, Estados Unidos

Antoine M. Cleef  
University of Amsterdam, Holanda

Carlos Jiménez  
Universidad de La Coruña, España

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

José Rubens Pirani  
Universidade de São Paulo, Brasil

Wolfgang Gieren  
Universidad de Concepción, Chile

---

**Asistencia y coordinación editorial** Carolina Acosta

**Corrección de estilo y ortografía**  
Marta Renza

**Diagramación**  
Johanna Morales

**Impresión y acabados**  
Gente Nueva

---

## Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Actualidad Iberoamericana

Agris

CIRS

Current Mathematical Publications

Dialnet

EBSCO

Historia Mathematica

Index Kewensis

Latindex

Mathematical Reviews

MathSciNet (on line data base)

OCLC (Online Computer Library Center)

PERIODICA

Publindex, Colciencias

RLG

SciELO

Zentralblatt für Mathematik

Zoological Record

---

**Periodicidad:** trimestral

**Fecha de inicio:** 1936

**Tamaño:** 21,5 x 27 cm

**Papel:** propalmate de 90 gr.

Solicitud de canje

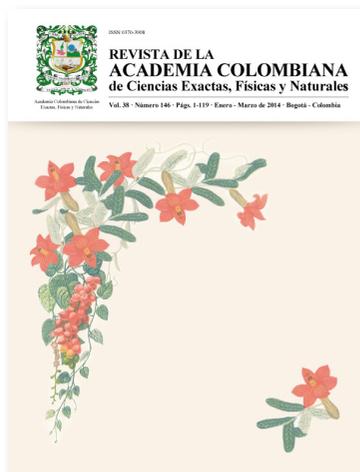
Esta publicación se ha financiado mediante la transferencia de recursos del Gobierno Nacional a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

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:

La especie *Mutisia clematis* fue dedicada por Linneo a José Celestino Mutis y luego una especie de este género, *Mutisia grandiflora* fue adoptada como símbolo en el escudo de la Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. En la parte superior: "clavellino". Nombre científico: *Mutisia clematis*, Familia: Asteraceae. A la izquierda, en posición vertical: *Cissampelos sp.* Familia: Menispermaceae.

**Página web de la revista:** [www.raccefyn.co](http://www.raccefyn.co)

**Correo electrónico:** [revista@accefyn.org.co](mailto:revista@accefyn.org.co)

**Sede de la Academia:** Cra. 28a No.39a - 63 Bogotá, Colombia

**Teléfonos:** (571) 244 3186 - 268 3290 - 268 2846



Academia Colombiana de Ciencias  
Exactas, Físicas y Naturales

ISSN 0370-3908

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

Vol. 38 · Número 146 · Págs. 1-124 · Enero - Marzo de 2014 · Bogotá - Colombia

## Contenido - Contents

Editorial	<b>Los tiempos cambian, la revista cambia</b> Times change and the ACCEFYN scientific journal changes <i>Carmenza Duque</i> ..... 5
	<b>Ciencias físicas y Ciencias matemáticas</b>
Ciencias naturales	<b>Inflación vectorial en el marco de las teorías de <i>gauge</i> no abelianas</b> Vector inflation in the framework of non-Abelian <i>gauge</i> theories. <i>Carlos Nieto, Yeinzon Rodríguez</i> ..... 7
	<b>Estado del conocimiento de la fauna de anfibios y reptiles del departamento de Casanare, Colombia</b> Current knowledge of the amphibian and reptile fauna in the department of Casanare, Colombia <i>Raúl Pedroza-Banda, Jhon Jairo Ospina-Sarria, Teddy Angarita-Sierra, Marvin Anganoy-Criollo, John D. Lynch</i> ..... 17
	<b>Obtención de escopolamina en biorreactor a partir de cultivos de raíces de <i>Brugmansia candida</i></b> Scopolamine production from <i>Brugmansia candida</i> roots culture using a bioreactor <i>Ángela María Otálvaro-Álvarez, Mario Enrique Velásquez-Lozano</i> ..... 35
	<b>Notas sobre la vegetación desértica del Parque Eólico Jepírachi, Alta Guajira, Colombia</b> Notes on desert vegetation of the Jepírachi wind farm in the Alta Guajira, Colombia <i>Gabriel Pinilla-Agudelo, Silvio Zuluaga-Ramírez</i> ..... 43
	<b>Diagnosis del estado de conservación del ensamble de anfibios y reptiles presentes en los ecosistemas de sabanas inundables de la cuenca del río Pauto, Casanare, Colombia</b> Diagnosis of the conservation state of the amphibian and reptile ensembles from flooded savannas in the river Pauto basin, Casanare, Colombia <i>Teddy Angarita-Sierra</i> ..... 53

**Ciencias  
naturales**

**Resultados preliminares del cultivo experimental de *Gracilaria verrucosa* (Hudson) Papenfuss (= *G. caudata* J. Agardh) (Rhodophyta: Gracilariaceae) en la Costa Caribe de Colombia**

Preliminary results of an experimental crop of *Gracilaria verrucosa* (Hudson) Papenfuss (= *G. caudata* J. Agardh) (Rhodophyta: Gracilariaceae) on the Colombian Caribbean Coast

*Jairo Napoleón Molina-Vargas, Ricardo Álvarez-León* ..... 79

**Primer registro de *Munidopsis cubensis* Chace, 1942 (Crustacea: Anomura: Munidopsidae) en el mar Caribe sur de Colombia**

First record of *Munidopsis cubensis* Chace, 1942 (Crustacea: Anomura: Munidopsidae) in the Colombian Southern Caribbean sea

*Yeison Herrera-Medina, Adriana Bermúdez-Tobón, Gabriel R. Navas-Suárez* ..... 88

**Ciencias  
químicas**

**Óxidos mixtos del tipo  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$  y su promoción con rutenio como catalizadores para la síntesis Fischer-Tropsch**

Mixed oxides of the type  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$  and their promotion with ruthenium as catalysts for the Fischer-Tropsch synthesis

*Mónica López, Angélica Forgionny, Diana López, Andrés Moreno* ..... 93

**Preferential solvation of some sulfonamides in 1,4-dioxane + water co-solvent mixtures at 298.15 K according to the inverse Kirkwood-Buff integrals method**

Solvatación preferencial de algunas sulfonamidas en mezclas cosolventes 1,4-dioxano + agua a 298,15 K según el método de las integrales inversas de Kirkwood-Buff

*Daniel Ricardo Delgado, María Ángeles Peña, Fleming Martínez* ..... 104

**Enfoque y alcance**

Focus and Scope ..... 115

## Los tiempos cambian, la Revista cambia

La visibilidad y la divulgación del conocimiento científico y tecnológico se han venido potenciando a través de las plataformas informáticas que permiten una interacción humana nunca antes vista, que trasciende las diferencias étnicas, culturales, geográficas e idiomáticas. Gracias a ello estamos viviendo en un mundo globalizado donde pueden observarse simultáneamente todos los procesos del mundo científico, especialmente por medio de las publicaciones que, como conducto de una interacción constructiva, fácil y rápida entre pares científicos, permiten la comunicación de los saberes potenciadora del avance del conocimiento. Los tiempos cambian y nosotros, inevitablemente, somos parte de ese cambio. No podemos llegar tarde a este gran diálogo científico global.

La revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales empezó su existencia el 1 de diciembre de 1936, poco tiempo después de su legalización por parte del Gobierno de Colombia a través del decreto 1218 de ese mismo año. Después de 78 años de publicación hemos llegado ya al número 146 del volumen 38. Como puede verse en este número, el equipo editorial de la revista ha cambiado y con él, también el proceso editorial, lo cual es de especial interés para los autores y para la audiencia lectora, pues se busca garantizar que cada artículo publicado reciba una adecuada evaluación por parte de pares de reconocimiento nacional e internacional y que el tiempo entre el sometimiento y la eventual publicación de los manuscritos se reduzca al mínimo. Además, la circulación del conocimiento y la necesidad de construir referencias estructuradas sobre las publicaciones en dominios particulares de la ciencia y la tecnología, así como de conocer lo que se produce y acceder a los documentos de las publicaciones, nos obligan a utilizar las mejores bases de datos especializadas en la indexación de revistas científicas.

En este sentido, considero de la mayor importancia dar a conocer aquí a nuestros lectores y contribuyentes, los integrantes del equipo editorial que nos acompañará a partir del número 146. Doy entonces la bienvenida a la doctora Elizabeth Castañeda, a quien tendré el gusto de acompañar en la tarea de editora en jefe, y a todos y cada uno de los miembros del Comité Editorial: Bernardo Gómez, Pedro Fernández, Rubén Antonio Vargas, Víctor Albis, Gabriel Roldán, Gonzalo Andrade, Jaime Cantera, José Luis Fernández, Thomas Defler, German Poveda, Armando Espinosa, Carlos Alberto Vargas, José Ignacio Martínez, Guillermo Páramo, Rubén Ardila, Felipe Guhl, Luis Fernando García, Fanor Mondragón, Moisés Wasserman y Sonia Moreno y a los miembros del Comité Científico Internacional: José Rubens Pirani, del Departamento de Botánica, Instituto de Biociencias, Universidad de Sao Paulo, Brasil; Gioconda San Blas, de la Oficina de Ciencia y Tecnología del Gobierno de Miranda, Venezuela, y Primera Vicepresidenta de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales de Venezuela; Carlos Jiménez, de la Facultad de Ciencias, Departamento de Química Fundamental, Universidad de La Coruña, España; Antoine M. Cleef, del Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics (BED), Faculty of Science, University of Amsterdam, Science Park, The Netherlands; Wolfgang Gieren, del Departamento de Astronomía, Universidad de Concepción, Chile; Ángela Guzmán, de la University of Central Florida, Orlando, EEUU, seleccionados por su producción científica y por su experiencia en el mundo de las publicaciones en el área de las Ciencias básicas. Estamos seguros que con el concurso de todos, cumpliremos con los objetivos que nos hemos trazado para los próximos años.

Por otro lado, es importante resaltar que la importancia de una revista científica constituye un criterio determinante para los autores en el momento de decidir dónde publicar. Está ampliamente aceptado en el seno de la comunidad científica que dicha importancia se puede determinar por la evaluación que de ella hagan los sistemas de indexación, particularmente aquellos que tienen mayor aceptación en el ámbito internacional, ya que desempeñan un papel orientador en la difusión de las publicaciones seriadas que cumplen con los requisitos científicos y editoriales, establecidos por las entidades responsables de estos servicios.

En la actualidad, la revista está reseñada en varios índices internacionales tales como Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (International Center for Scientific Research), Current Mathematical Publications, EBS-CO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet, PERIODICA, SciELO, Online Computer Library Center-OCLC, Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record, RLG, y en Colombia se encuentra en la base de datos Publindex. Los planes para el inmediato futuro comprenden la indexación de la revista en ISI/SCOPUS, consideradas las bases de datos de revistas científicas con mayor índice de citación en el ámbito internacional.

Por otra parte, con el fin de mejorar la gestión de edición hemos seleccionado al Open Journal System (OJS), un *software* de código abierto para la gestión en línea de revistas científicas, el cual ha sido desarrollado y es continuamente actualizado por el Public Knowledge Project (PKP) (una iniciativa de varias universidades americanas a través de la cual se desarrolló el *software* mencionado con el objetivo de mejorar la calidad del proceso de publicación y el acceso a las publicaciones científicas). El OJS agiliza la comunicación entre los contribuyentes, el equipo editorial y los lectores en cada uno de los pasos del proceso, desde el sometimiento de los artículos hasta su publicación en línea y su indexación, es decir, el envío y la recepción de artículos y contribuciones en línea, la selección de los editores, la elección de revisores, el establecimiento de recordatorios automáticos, el manejo de fechas límite para la entrega de correcciones, la decisión final de aceptación por parte de los editores, el envío de los documentos al corrector de estilo y al diagramador, hasta llegar finalmente a la publicación electrónica de los artículos y su transferencia para la indexación en las bases de datos y los buscadores. Actualmente, el PKP es utilizado por cerca de 15.000 revistas científicas en todo el mundo (<http://www.pkp.sfu.ca>, 31 de mayo de 2014).

Además, la apariencia externa de la revista también está teniendo cambios. La carátula, por ejemplo, mostrará anualmente los símbolos de la Academia o aquellos relacionados con las diferentes secciones de la revista y su contenido. Para el número 146 hemos seleccionado la especie de *Mutisia* que aparece en la parte superior derecha del escudo de la Academia. Esta planta fue dedicada por Linneo a José Celestino Mutis, quien fue el primer gran promotor de la actividad científica institucional en Colombia durante la segunda mitad del siglo XVIII. De igual forma, la contraportada, la página legal y las portadillas de los artículos se han ajustado a las exigencias del ISI/SCOPUS. Igualmente, en algunas ocasiones solicitaremos editoriales a científicos de alto reconocimiento para exaltar temas de investigación que se publiquen en la revista. Por último es importante mencionar que en los próximos meses haremos el tránsito de la revista también a versión electrónica.

Naturalmente, no podemos concluir este editorial sin invitar a nuestros contribuyentes y autores, así como a todos los editores y personal que trabaja con nosotros a construir este nuevo camino hacia la modernización de ésta importante revista científica.

**Carmenza Duque**

Editora en Jefe

# Inflación vectorial en el marco de las teorías de *gauge* no abelianas

Carlos Nieto<sup>1,\*</sup>, Yeinzon Rodríguez<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Ciudad Universitaria, Bucaramanga, Colombia

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones en Ciencias Básicas y Aplicadas, Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia

## Resumen

Se encuentra en la literatura científica que gran parte de los modelos inflacionarios carecen de soportes observacionales o conceptuales. Es así como recientes observaciones sobre una posible dirección privilegiada en el universo implican que no es conveniente tomar campos escalares como generadores de inflación. Por otra parte, los recientes modelos inflacionarios que emplean campos vectoriales requieren modificar la gravedad o las condiciones muy finas para su apropiado comportamiento; además, carecen de naturalidad y no presentan una de las características más importantes de las teorías de la física moderna: la existencia de simetrías internas. En este artículo se presenta un modelo inflacionario vectorial enmarcado en una teoría de *gauge*  $SU(2)$  compuesto por tres campos vectoriales sobre los cuales se hace una suposición bien fundamentada con respecto a su dirección, su norma, y su dependencia temporal. Lo anterior permite obtener una era de inflación isótropa en un fondo rotacionalmente invariante si se tiene en cuenta la relación homomórfica entre los grupos  $SU(2)$  y  $O(3)$ . Se estudia, en este escenario, la dinámica de los campos vectoriales y las condiciones para tener expansión acelerada; además, se analiza la evolución del sistema en el régimen de rodadura lenta y se obtienen soluciones numéricas de las ecuaciones de movimiento. Debido a la naturalidad del modelo, los resultados numéricos observados y la generalidad de la suposición propuesta, se concluye que este tipo de inflación representa de manera adecuada el comportamiento del universo primordial a la luz de las más recientes observaciones.

**Palabras clave:** paradigma inflacionario, campos vectoriales, teorías de *gauge* no abelianas, inflación del tipo rodadura lenta.

## Vector inflation in the framework of non-Abelian *gauge* theories

### Abstract

According to the literature, there is a significant number of inflationary models that lack observational and conceptual support. Such is the case with recent observations regarding a possible preferred direction in the universe, which imply that scalar fields are not suitable as generators of inflation. On the other hand, recent inflationary models that employ vector fields require a modification of gravity and/or fine-tuning in order to have the appropriate behaviour; besides, they lack naturalness and do not exhibit one of the most important properties of theories in modern physics: the existence of internal symmetries. In this paper, we present a vector inflationary model embodied in a  $SU(2)$  *gauge* theory composed of three vector fields over which we make a well supported assumption about their direction, their norm, and their time dependence. Such an assumption allows us to obtain isotropic inflation in a rotationally invariant background if we take into account the homomorphic relation between  $SU(2)$  and  $O(3)$  groups. In this scenario, we study the dynamics of the vector fields and the conditions to obtain accelerated expansion; we also analyze the evolution of the system in the slow-roll regime and obtain numerical solutions for the equations of motion. Due to the naturalness of the model, the observed numerical results and the generality of the proposed assumption, we conclude that this type of inflation represents well the behaviour of the primordial universe in view of the most recent observations.

**Key words:** Inflationary paradigm, vector fields, non-Abelian *gauge* field theories, slow-roll inflation.

## Introducción

La base de la cosmología moderna se encuentra en el paradigma inflacionario, ya que éste representa una buena solución para los llamados problemas de la cosmología estándar, a saber: el problema de la planitud, el problema

del horizonte y el problema de las reliquias no deseadas (Weinberg, 2008); además, la inflación es crucial para estudiar la generación de estructura a gran escala y la producción de ondas gravitacionales primordiales (BICEP2 Collaboration, Ade, *et al.*, 2014; Lyth & Liddle, 2009;

**Rubakov, 1982; Starobinsky, 1980; Starobinsky, 1982; Weinberg, 2008**). Dicho mecanismo elimina la necesidad de realizar ajustes finos en las condiciones iniciales del universo primitivo, explicando de manera dinámica por qué el universo presenta las características observadas en la actualidad, por ejemplo, el alto grado de isotropía en la radiación cósmica de fondo (**Penzias & Wilson, 1965**) y la aparente planitud del universo (**Planck Collaboration, Ade, et al., 2013a; WMAP Collaboration, Hinshaw, et al., 2013**). En general, el periodo inflacionario se sitúa antes de la era dominada por la radiación y está caracterizado por presentar expansión acelerada, lo cual implica que también esté dominado por la energía de vacío (**Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008**).

Por estas razones, es indispensable construir modelos del comportamiento primordial del universo que presenten las características fundamentales del mecanismo inflacionario, que tengan fundamentos físicos sólidos y que estén de acuerdo con las observaciones (**Planck Collaboration, Ade, et al., 2013a; WMAP Collaboration, Hinshaw, et al., 2013**). En general, la dinámica inflacionaria se asocia con la existencia de uno o muchos campos escalares en un espacio con un promedio de partículas de aproximadamente cero y un potencial que controla su comportamiento (**Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008**). Esta primera aproximación produce directamente homogeneidad e isotropía espacial y su tratamiento teórico es bastante sencillo, lo cual permite hacer comparaciones con los datos obtenidos de la observación. Sin embargo, existe un factor que no respalda el modelo inflacionario escalar: recientes mapas de la radiación cósmica de fondo muestran la posible existencia de una dirección privilegiada en el universo (**Axelsson, et al., 2013; Cai, Ma, Tang & Tuo, 2013; Groeneboom, Ackerman, Wehus & Eriksen, 2010; Groeneboom & Eriksen, 2009; Kalus, Schwarz, Seikel & Wiegand, 2013; Kim & Komatsu, 2013; Paci, et al., 2013; Planck Collaboration, Ade, et al., 2013b; Ramazanov & Rubtsov, 2014; Singal, 2013; Zhao, Wu & Zhang, 2013**). Este hecho no puede explicarse a partir de campos escalares, lo que implica la necesidad de intentar un tratamiento con cantidades que introduzcan la noción de dirección para poder hacer un estudio que esté de acuerdo con los resultados derivados de la observación. De esta manera, los campos vectoriales adquieren gran importancia en la dinámica inflacionaria, ya que, por su naturaleza, introducen el concepto de dirección espacial.

Mediante los campos vectoriales es posible edificar modelos inflacionarios anisótropos (**Maleknejad, Sheikh-Jabbari & Soda, 2013**) siempre y cuando la razón entre el *shear*  $\Sigma$  y

el parámetro de expansión global  $H$  esté dentro de las cotas observacionales  $|\Sigma/H| < 0,012$  (**Campanelli, Cea, Fogli & Marrone, 2011; Kalus, Schwarz, Seikel & Wiegand, 2013**); sin embargo, es igualmente factible construir modelos inflacionarios vectoriales isótropos bajo consideraciones muy específicas. La introducción de muchos campos vectoriales con direcciones aleatorias puede en promedio generar inflación isótropa en un fondo rotacionalmente invariante, al igual que la introducción de tres vectores mutuamente ortogonales y de igual norma genera inflación isótropa en el marco de una teoría de *gauge*  $U(1)$  (**Armendáriz-Picón, 2007**). No obstante, la dinámica inflacionaria en estos modelos cesa muy pronto, llevando a que no se resuelvan los problemas de la cosmología estándar. Una solución para este problema se encuentra a través de modificaciones en la gravedad (**Golovnev, Mukhanov & Vanchurin, 2008**). Sin embargo, se encuentra que dichas modificaciones a la gravedad, más el hecho de trabajar con campos vectoriales, puede conllevar a inestabilidades y fantasmas (**Golovnev, 2010; Golovnev, 2011; Himmetoglu, Contaldi & Peloso, 2009a; Himmetoglu, Contaldi & Peloso, 2009b; Himmetoglu, Contaldi & Peloso, 2009c**). Así, el ajuste especial en la disposición de los campos en ambos modelos, más la necesaria modificación de la gravedad, genera una carencia de naturalidad e implica que estos dos modelos pierdan interés en el contexto científico.

De ahí la necesidad de edificar un modelo que disminuya el número de consideraciones *ad hoc* y que, por supuesto, involucre campos vectoriales, produzca inflación isótropa (como primera aproximación a un modelo más general), no modifique la gravedad y, como ingrediente adicional, tenga una semejanza con los modelos de la física de partículas (**Kane, 1993; Ryder, 1985; Weinberg, 1996**). Esto último se fundamenta en el hecho de tener una conexión entre la física durante y después de la inflación. Por ende, se debe tener en cuenta alguna simetría interna del modelo; si bien muchos modelos poseen invariancia ante transformaciones del grupo abeliano  $U(1)$ , en la naturaleza hay más simetrías del tipo no abeliano, por ejemplo, la simetría ante los grupos  $SU(2)$  y  $SU(3)$  (**Weinberg, 1996**).

En el presente artículo se estudia un modelo enmarcado en una teoría invariante de *gauge*  $SU(2)$ , ya que así se introducen de forma natural tres campos vectoriales, los cuales generarán la expansión acelerada. Además, a través de una suposición sobre la forma de los campos vectoriales y las propiedades topológicas del grupo  $SU(2)$ , se logra retener la simetría rotacional del fondo espacial y producir inflación isótropa (**Maleknejad & Sheikh-Jabbari, 2011; Maleknejad & Sheikh-Jabbari, 2013**). Una vez especificada la forma de los campos vectoriales, se construye un lagrangiano que satisfaga la condición necesaria y suficiente para que se produzca una era inflacionaria ( $\rho + 3P < 0$ ); se hace un estudio de la dinámica en el régimen de rodadura lenta, y se encuentra

\* Correspondencia:

Carlos Nieto, carlosfisartnieto@gmail.com

Recibido: 26 de junio de 2013

Aceptado: 16 de abril de 2014

una expresión para el monto de expansión en términos de los parámetros de rodadura lenta al inicio de la inflación y las constantes de acoplamiento en la acción del modelo. Por último, se resuelven de manera numérica las ecuaciones de movimiento para encontrar la evolución temporal de las cantidades más importantes del modelo y verificar si el monto de expansión es coherente con lo exigido por las observaciones (Kim & Murphy, 1985; Lyth & Liddle, 2009; Weinberg, 2008). De acuerdo con los resultados obtenidos, queda claro que tanto la forma de los campos vectoriales como el lagrangiano del modelo producen de manera exitosa las propiedades buscadas con un número bajo de consideraciones *ad hoc*, abriendo la posibilidad de hacer estudios sobre recalentamiento, la producción de partículas o la teoría de perturbaciones cosmológicas enmarcados en este modelo inflacionario (Abbott, Farhi & Wise, 1982; Albrecht, Steinhardt, Turner & Wilczek, 1982; Allahverdi, Brandenberger, Cyr-Racine & Mazumdar, 2010; Greene, Kofman, Linde & Starobinsky, 1997).

**Modelo inflacionario: escogencia de los campos vectoriales**

El modelo inflacionario propuesto se construye en el marco de una teoría invariante ante transformaciones del grupo  $SU(2)$ . Por ende, deben existir tres campos vectoriales  $A^a_\mu$  con los cuales se mantiene el lagrangiano invariante ante dichas transformaciones (Kane, 1993; Ryder, 1985; Weinberg, 1996). Aquí,  $a = 1, 2, 3$  corresponden a los índices del álgebra de *gauge* y  $\mu = 0, 1, 2, 3$  representan los índices espaciotemporales. En general, las componentes de cada uno de los campos son diferentes los unos de los otros. Sin embargo, debido a la simetría del modelo, es posible fijar un *gauge* de tal manera que se logren las características deseadas: inflación isotrópica en un fondo homogéneo e isotrópico descrito por la métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) (Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008) cuya forma es

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t)\delta_{ij}dx^i dx^j, \tag{1}$$

en donde  $a(t)$  es el parámetro de expansión global e  $i, j$  son los índices a lo largo de una hipersuperficie tridimensional de tipo espacio con tensor métrico descrito por  $h_{ij} = a^2(t)\delta_{ij}$  en coordenadas cartesianas. El *gauge* temporal

$$A^a_0 = 0, \tag{2}$$

se manifiesta como una adecuada escogencia debido a que permite hacer una conexión entre los índices del álgebra de *gauge* y las componentes espaciales de los campos. Al escribir los campos vectoriales en términos de una tétrada ortonormal, se tiene que

$$A^a_\mu = \hat{e}^{(\alpha)}_\mu A^a_{(\alpha)}, \tag{3}$$

en donde  $\hat{e}^{(\alpha)}_\mu$  son los  $(\alpha)$  vectores ortonormales de la tétrada y  $A^a_{(\alpha)}$  son las componentes de cada vector  $A^a_\alpha$  a lo largo de los vectores ortonormales. Ahora, usando el *gauge* de la ecuación (2) y la tétrada

$$\begin{aligned} \hat{e}^{(0)}_\mu &= (1, 0, 0, 0), \quad \hat{e}^{(1)}_\mu = (0, a(t), 0, 0), \\ \hat{e}^{(2)}_\mu &= (0, 0, a(t), 0), \quad \hat{e}^{(3)}_\mu = (0, 0, 0, a(t)), \end{aligned} \tag{4}$$

se tiene que

$$A^a_i = \hat{e}^{(j)}_i A^a_{(j)}. \tag{5}$$

Es aquí donde se introduce la suposición comentada anteriormente, escogiendo los vectores  $A^a_{(j)}$  de tal forma que estén dirigidos a lo largo de cada vector espacial de la tétrada y que tengan la misma magnitud, es decir,

$$A^a_{(j)} = \psi(t)\delta^a_{(j)}, \tag{6}$$

con lo cual se obtiene

$$A^a_i = \psi(t)\hat{e}^a_i = a(t)\psi(t)\delta^a_i. \tag{7}$$

Se observa, entonces, que los tres vectores son espaciales, ortogonales y de igual norma; dada la manera en que se definieron los vectores, se pueden identificar los índices espaciales con los índices del álgebra de *gauge* y, teniendo en cuenta que el grupo  $O(3)$  es una imagen homomórfica del grupo  $SU(2)$  (Ryder, 1985), se puede ver una rotación de los ejes del espacio interno como una rotación tridimensional. Así, la simetría *gauge* del modelo es concebida como una simetría de rotación en el espacio y, consecuentemente, el fondo permanece homogéneo e isotrópico. Es claro que el ampo  $\psi$  transforma como lo hace un campo escalar usual porque se definió en la tétrada ortogonal. Sin embargo, en este caso resulta más conveniente tratar las ecuaciones de evolución con un campo escalar auxiliar  $\phi(t) = a(t)\psi(t)$ , con lo cual

$$A^a_i = \phi(t)\delta^a_i. \tag{8}$$

Aunque la anterior escogencia luzca como un ajuste fino, se ha demostrado que la expresión  $A^a_i = \phi(t)\delta^a_i$  es la solución atractor de un modelo inflacionario vectorial anisótropo en un fondo descrito por la métrica de Bianchi tipo I (Maleknejad, Sheikh-Jabbari & Soda, 2012; Maleknejad, Sheikh-Jabbari & Soda, 2013). Dicho de otra manera, a pocos *e-folds* de expansión después del inicio de la inflación, la configuración espacial de los campos evoluciona hasta la forma dada en la ecuación (8). Por ende, la forma propuesta para los campos vectoriales no hace parte de una escogencia fina sino que presenta un soporte físico sólido.

**Ecuaciones de campo y de evolución**

Habiendo encontrado la forma de los campos vectoriales necesaria para tener las propiedades deseadas, se requiere ahora definir un lagrangiano que caracterice el modelo inflacionario. Debido a que se trabaja en el marco de una

teoría invariante de *gauge*  $SU(2)$ , el lagrangiano sólo puede tener una dependencia de  $A^a_\mu$  en el tensor de esfuerzos tipo Maxwell  $F^a_{\mu\nu}$ , el cual está definido de la siguiente manera (Kane, 1993; Ryder, 1985; Weinberg, 1996):

$$F^a_{\mu\nu} = \partial_\mu A^a_\nu - \partial_\nu A^a_\mu - g\epsilon^a_{bc}A^b_\mu A^c_\nu, \quad (9)$$

en donde  $g$  es la constante de acoplamiento y  $\epsilon^a_{bc}$  son las constantes de estructura del grupo  $SU(2)$ . Entonces, el lagrangiano se escribe en general como  $\mathcal{L} = \mathcal{L}(F^a_{\mu\nu}, g_{\mu\nu})$  y, por ende, las ecuaciones de movimiento y el tensor momentum-energía se escriben de la siguiente manera, respectivamente,

$$D_\mu \frac{\partial(\sqrt{-g}\mathcal{L})}{\partial F^a_{\mu\nu}} = 0, \quad (10)$$

y

$$T_{\mu\nu} = -2 \frac{\delta\mathcal{L}}{\delta F^a_{\sigma\mu}} F^a_{\sigma\nu} + g_{\mu\nu}\mathcal{L}, \quad (11)$$

en donde  $g_{\mu\nu}$  es el tensor métrico y  $D_\mu$  es la derivada covariante en una teoría de *gauge*  $SU(2)$ . Para un vector en el espacio interno  $B^a$ , la derivada covariante se define como (Kane, 1993; Ryder, 1985; Weinberg, 1996)

$$D_\mu B^a = \partial_\mu B^a - g\epsilon^a_{bc}A^b_\mu B^c, \quad (12)$$

en donde  $A^b_\mu$  es el vector de *gauge* en el espacio interno. Ahora, si se utiliza la métrica de FLRW y el ansatz definido en la sección anterior, la ecuación (10) se convierte en

$$\frac{d}{a^3 dt} \left( a^3 \frac{\partial\mathcal{L}_{red}}{\partial\dot{\phi}} \right) - \frac{\partial\mathcal{L}_{red}}{\partial\phi} = 0, \quad (13)$$

en donde  $\mathcal{L}_{red}$  es el lagrangiano reducido obtenido al reemplazar la configuración de los campos vectoriales dada en la ecuación (8) y la métrica de FLRW en  $\mathcal{L} = \mathcal{L}(F^a_{\mu\nu}, g_{\mu\nu})$ .

Esta ecuación es idéntica a la ecuación de movimiento de un modelo de inflación isótropa con sólo un campo escalar  $\phi$  y un lagrangiano  $\mathcal{L}(\phi, \dot{\phi}, a(t))$ , es decir, el modelo vectorial planteado presenta el tipo de evolución deseado. Por otra parte, se encuentra que las únicas componentes no nulas del tensor momentum-energía del sistema son las correspondientes a la densidad de energía  $\rho$  y la presión del fluido  $P$

$$\rho = \frac{\partial\mathcal{L}_{red}}{\partial\dot{\phi}}\dot{\phi} - \mathcal{L}_{red}, \quad (14)$$

y

$$P = \frac{\partial(a^3\mathcal{L}_{red})}{\partial a^3}, \quad (15)$$

confirmándose de esta manera que el universo compuesto por los campos definidos en la ecuación (8) puede modelarse como un fluido perfecto. Es importante anotar que los resultados mostrados son válidos para cualquier lagrangiano  $\mathcal{L} = \mathcal{L}(F^a_{\mu\nu}, g_{\mu\nu})$  siempre y cuando se haga uso de la suposición dada en la ecuación (8) y la métrica de FLRW. Por lo tanto, el *gauge* escogido y la forma

utilizada para las componentes espaciales de los campos resultan satisfactorias, ya que reproducen las propiedades geométricas requeridas independientemente del lagrangiano escogido para el modelo. Sin embargo, si se quiere producir una era caracterizada por expansión exponencial se debe dar forma a  $\mathcal{L} = \mathcal{L}(F^a_{\mu\nu}, g_{\mu\nu})$ .

## El lagrangiano del modelo

Como se afirmó en la sección anterior, el lagrangiano debe incluir términos que incluyan a  $F^a_{\mu\nu}$  para que la teoría sea invariante de *gauge*. El término más sencillo, que es a la vez invariante de *gauge* y de Lorentz, es  $-\frac{1}{4}F^a_{\mu\nu}F^{\mu\nu}_a$  (término de Yang-Mills). Este primer término tiene una forma análoga al término cinético del lagrangiano electromagnético y produce una ecuación de estado  $P = \rho/3$  que caracteriza un fluido compuesto por radiación, lo cual es bueno, puesto que se espera que después de la inflación se tenga una era dominada por la radiación. No obstante, es indispensable que a través del lagrangiano escogido se satisfaga la condición necesaria y suficiente para tener expansión acelerada (Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008)

$$\rho + 3P < 0. \quad (16)$$

Se debe tener, entonces, un término adicional que lleve a dicha relación, al menos durante los tiempos tempranos. Una opción es aumentar el grado de  $F^a_{\mu\nu}$  dentro del lagrangiano, pero esto llevaría a una expresión algebraicamente complicada para la condición en la ecuación (16). Sin embargo, si se multiplica el producto  $F^a_{\mu\nu}F^{\mu\nu}_a$  por el tensor  $\epsilon^{\mu\nu\lambda\sigma}$  asociado al símbolo de Levi-Civita, se obtienen resultados atractivos y se encuentra una dinámica interesante entre este nuevo término y el término de Yang-Mills. Entonces, se propone el nuevo término para el lagrangiano

$$(\epsilon^{\mu\nu\lambda\sigma}F^a_{\mu\nu}F^a_{\lambda\sigma})^2, \quad (17)$$

en donde el tensor contravariante  $\epsilon^{\mu\nu\lambda\sigma}$  se define a través de la densidad tensorial contravariante  $\epsilon^{\mu\nu\lambda\sigma}$  (símbolo de Levi-Civita) y el determinante de la métrica, así:

$$\epsilon^{\mu\nu\lambda\sigma} = \frac{\epsilon^{\mu\nu\lambda\sigma}}{\sqrt{-g}}. \quad (18)$$

En síntesis, el lagrangiano total sería

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F^a_{\mu\nu}F^{\mu\nu}_a + \frac{\kappa}{384}(\epsilon^{\mu\nu\lambda\sigma}F^a_{\mu\nu}F^a_{\lambda\sigma})^2, \quad (19)$$

en donde  $\kappa$  es un parámetro libre y 384 es un número entero necesario para facilitar el tratamiento de las ecuaciones dinámicas. La idea de postular el lagrangiano en la ecuación (19) es tener un balance dinámico entre los dos términos, de tal manera que uno de ellos sea el que genere y mantenga la era inflacionaria y el otro el que le dé fin en el momento justo.

Una vez definido el lagrangiano, se procede a encontrar la ecuación de evolución de los campos y las componentes no nulas del tensor momentum-energía. Para esto, se hace indispensable encontrar  $\mathcal{L}_{red}$  y usar las ecuaciones (13), (14) y (15). Tomando la configuración de  $A_i^a$  presentada en la ecuación (8) y la métrica de FLRW, se obtienen las componentes de  $F_{\mu\nu}^a$

$$F_{00}^a = 0, \quad F_{0i}^a = \dot{\phi}\delta_{ai}, \quad F_{ij}^a = -g\dot{\phi}^2\epsilon_{ij}^a, \quad (20)$$

y el producto

$$\epsilon^{\mu\nu\lambda\sigma} F_{\mu\nu}^a F_{\lambda\sigma}^a = 4\epsilon^{ijk0} g\dot{\phi}^2\epsilon_{ij}^k. \quad (21)$$

De esta manera, el lagrangiano en la ecuación (19) se convierte en

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \frac{\dot{\phi}^2}{a^2} \delta_{ai}^a \delta_{ai} - \frac{1}{4} \frac{g^2 \phi^4}{a^4} \epsilon_{akj} \epsilon_{akj} + \frac{\kappa}{24} \epsilon^{ijk0} \epsilon^{mnp0} g^2 \dot{\phi}^2 \phi^4 \epsilon_{ijk} \epsilon_{mnp}, \quad (22)$$

en donde se utiliza la definición de  $\epsilon^{\mu\nu\lambda\sigma} = \epsilon^{\mu\nu\lambda\sigma} / \sqrt{-g}$  y se hacen las debidas sumatorias para encontrar, finalmente,

$$\mathcal{L}_{red} = \frac{3}{2} \left[ \frac{\dot{\phi}^2}{a^2} - \frac{g^2 \phi^4}{a^4} + \kappa \frac{g^2 \dot{\phi}^2 \phi^4}{a^6} \right]. \quad (23)$$

Entonces, la densidad de energía y la presión del fluido son

$$\rho = \frac{3}{2} \left( \frac{\dot{\phi}^2}{a^2} + \frac{g^2 \phi^4}{a^4} + \kappa \frac{g^2 \dot{\phi}^2 \phi^4}{a^6} \right), \quad (24)$$

$$P = \frac{1}{2} \left( \frac{\dot{\phi}^2}{a^2} + \frac{g^2 \phi^4}{a^4} \right) - \frac{3}{2} \kappa \frac{g^2 \dot{\phi}^2 \phi^4}{a^6}, \quad (25)$$

de donde se puede hallar la ecuación de Friedmann  $H^2 = \rho/3$  para este modelo

$$H^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\dot{\phi}^2}{a^2} + \frac{g^2 \phi^4}{a^4} + \kappa \frac{g^2 \dot{\phi}^2 \phi^4}{a^6} \right), \quad (26)$$

al igual que su derivada temporal

$$\dot{H} = - \left( \frac{\dot{\phi}^2}{a^2} + \frac{g^2 \phi^4}{a^4} \right). \quad (27)$$

Por otra parte, la ecuación de evolución de los campos adquiere la forma

$$\left( 1 + \kappa \frac{g^4 \phi^4}{a^4} \right) \ddot{\phi} + \left( 1 + \kappa \frac{\dot{\phi}^2}{a^2} \right) \frac{2g^2 \phi^3}{a^2} + \left( 1 - 3\kappa \frac{g^2 \phi^4}{a^4} \right) \dot{\phi} H = 0. \quad (28)$$

Como se precisó al principio, se debe estudiar la condición necesaria y suficiente para que se dé la inflación. Para esto, se definen dos cantidades asociadas a la densidad de energía

$$\rho_{YM} = \frac{3}{2} \left( \frac{\dot{\phi}^2}{a^2} + \frac{g^2 \phi^4}{a^4} \right), \quad (29)$$

$$\rho_{\kappa} = \frac{3}{2} \kappa \frac{g^2 \phi^4 \dot{\phi}^2}{a^6}, \quad (30)$$

con las cuales la ecuación de Friedmann (26) y su derivada temporal (27) se reducen a

$$H^2 = \frac{1}{3} (\rho_{YM} + \rho_{\kappa}), \quad (31)$$

$$\dot{H} = -\frac{2}{3} \rho_{YM}. \quad (32)$$

Se dice que  $\rho_{YM}$  es la densidad de energía asociada al término de Yang-Mills y  $\rho_{\kappa}$  es la densidad de energía asociada al término  $\kappa$ . Por ende, la densidad total de energía y la presión se escriben como

$$\rho = \rho_{YM} + \rho_{\kappa}, \quad (33)$$

y

$$P = \frac{1}{3} \rho_{YM} - \rho_{\kappa}. \quad (34)$$

Así, la suma  $\rho + 3P$  es

$$\rho + 3P = 2(\rho_{YM} - \rho_{\kappa}), \quad (35)$$

de donde se concluye que la condición para tener expansión acelerada es

$$\rho_{\kappa} > \rho_{YM}. \quad (36)$$

Es decir, se espera que al inicio de la evolución del universo la densidad de energía asociada al término  $\kappa$  domine sobre la densidad de energía asociada al término de Yang-Mills. Después de cierto tiempo,  $\rho_{\kappa}$  debe decrecer con respecto a  $\rho_{YM}$  de tal manera que la inflación termine y empiece la era dominada por la radiación. Con la solución numérica de las ecuaciones, se debe analizar la condición en la ecuación (36) y, de esta manera, garantizar parte del éxito del modelo.

### Inflación del tipo rodadura lenta

Una vez obtenidas las ecuaciones de movimiento y las ecuaciones de Einstein, se hace un estudio dinámico en el régimen de rodadura lenta. Este tipo de inflación es importante por dos razones: primero, permite obtener un tiempo apreciable de expansión acelerada, de tal manera que se puedan resolver los problemas de la cosmología estándar (Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008) y, segundo, estaría de acuerdo con las observaciones sobre la invariancia de escala en la perturbación primordial en la curvatura (Planck Collaboration, Ade, et al., 2013a; WMAP Collaboration, Hinshaw, et al., 2013). Para empezar, se introducen los parámetros que caracterizan la inflación de tipo rodadura lenta para un modelo inflacionario escalar, es decir,  $\epsilon$  y  $\eta$  así:

$$\epsilon = -\frac{\dot{H}}{H^2}, \quad |\eta - \epsilon| = \left| -\frac{\ddot{\phi}}{H\dot{\phi}} \right|, \quad (37)$$

en donde  $H = \dot{a}/a$  es el parámetro de Hubble y  $\phi$  es el campo escalar del modelo (Lyth & Liddle, 2009). Sin embargo, para hacer el estudio más general, estos parámetros se escribirán sólo en términos de  $H$  y sus derivadas como sigue<sup>1</sup>

$$\varepsilon \equiv -\frac{\dot{H}}{H^2}, \quad \eta \equiv \frac{\ddot{H}}{2\dot{H}H}, \quad (38)$$

de donde se obtiene la siguiente relación entre ellos:

$$\eta = \varepsilon - \frac{\dot{\varepsilon}}{2\varepsilon H}. \quad (39)$$

Ahora, debido a que los parámetros estándar  $\varepsilon$  y  $\eta$  fueron escritos en términos de  $H$ , se requiere un nuevo parámetro que muestre de manera explícita el comportamiento del campo escalar  $\psi$  del modelo. Por esto, además de asegurarse de tener una variación pequeña de  $H$ , se definirá un parámetro que caracterice la evolución del campo  $\psi$  durante la inflación:

$$\delta \equiv -\frac{\dot{\psi}}{\psi H}. \quad (40)$$

Así, con el nuevo parámetro se completa el conjunto de parámetros de rodadura lenta del modelo inflacionario vectorial de *gauge* no abeliano:

$$\varepsilon \equiv -\frac{\dot{H}}{H^2}, \quad \eta \equiv -\frac{\ddot{H}}{2\dot{H}H}, \quad \delta \equiv -\frac{\dot{\psi}}{\psi H}. \quad (41)$$

Antes de encontrar las expresiones para  $\varepsilon$ ,  $\eta$  y  $\delta$  concernientes al modelo propuesto, se examinarán las condiciones que deben existir sobre estos parámetros y las implicaciones sobre las cantidades dinámicas como la densidad de energía. Se sabe que  $\varepsilon$ ,  $|\eta| \ll 1$  para tener una dinámica de rodadura lenta; así, usando la expresión para  $\varepsilon$  se encuentra que

$$\varepsilon = \frac{2\rho_{YM}}{\rho_{YM} + \rho_\kappa} \ll 1, \quad (42)$$

de donde se deduce que  $\rho_\kappa$  debe dominar sobre  $\rho_{YM}$  para tener el comportamiento deseado, es decir,

$$\rho_\kappa \gg \rho_{YM}. \quad (43)$$

Por lo tanto, se espera que la densidad de energía asociada al término  $\kappa$  sea mucho mayor que la densidad de energía asociada al término de Yang-Mills en los tiempos tempranos. Una desigualdad similar se encontró cuando se analizaba la condición para tener una era de expansión acelerada; en ese caso, se había observado que  $\rho + 3P < 0$  implicaba  $\rho_\kappa > \rho_{YM}$ . Sin embargo, aquí se exige que  $\rho_\kappa$  sea mucho mayor que  $\rho_{YM}$ , por lo que se concluye que  $\rho_\kappa \gg \rho_{YM}$  es una condición suficiente mas no necesaria para que se produzca

una era de expansión acelerada. En resumen, se tiene que, al inicio de la inflación, la evolución de los campos debe ser tal que  $\rho_\kappa \gg \rho_{YM}$  para tener dinámica de rodadura lenta; luego, después de un tiempo de evolución,  $\rho_{YM}$  aumentará más rápidamente que  $\rho_\kappa$  de tal manera que cuando  $\rho_{YM} \sim \rho_\kappa$ , la inflación del tipo rodadura lenta finalice, y cuando  $\rho_{YM} > \rho_\kappa$ , la era de expansión acelerada llegue a su fin habiendo resuelto los problemas de la cosmología estándar.

A continuación se procede a encontrar las expresiones para los parámetros de rodadura lenta y el monto de expansión  $N_e$  (Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008). Con la expresión para  $\varepsilon$  en la ecuación (38) y las expresiones para  $\rho_{YM}$  y  $\rho_\kappa$  de las ecuaciones (29) y (30), se obtiene la igualdad

$$\varepsilon = 2 - 2\frac{\rho_\kappa}{\rho_{YM} + \rho_\kappa} = 2 - \frac{\kappa g^2 \phi^4 \dot{\phi}^2}{a^6 H^2}, \quad (44)$$

la cual puede ser convertida en

$$\varepsilon = 2 - \kappa g^2 \psi^6 (1 - \delta)^2, \quad (45)$$

teniendo en cuenta que  $\psi = \phi/a$  y  $\delta = 1 - \dot{\phi}/H\phi$ . A partir de la ecuación (39) y del resultado anterior, se encuentra una expresión para  $\eta$  en términos de los parámetros  $\varepsilon$  y  $\delta$

$$\eta = \varepsilon - (2 - \varepsilon) \left[ \frac{\dot{\delta}}{H(1 - \delta)\varepsilon} + \frac{3\delta}{\varepsilon} \right]. \quad (46)$$

Ahora, imponiendo las condiciones usuales sobre  $\varepsilon$  y  $\eta$  (i.e.  $\varepsilon, |\eta| \ll 1$ ) (Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008), se encuentra el orden de magnitud de  $\delta$ , es decir, la condición de variación lenta del campo físico  $\psi$  durante la inflación. A través de la ecuación (39) y las condiciones señaladas anteriormente, se encuentra que se debe cumplir

$$\dot{\varepsilon} \sim H\varepsilon^2, \quad \eta \sim \varepsilon, \quad (47)$$

para evitar ajustes finos en las cantidades  $\varepsilon$  y  $\eta$ . Con esto se deduce, a través de la ecuación (46), que el orden de magnitud del parámetro  $\delta$  es

$$\delta \sim \varepsilon^2, \quad (48)$$

lo que evidencia que  $\psi$  varía lentamente durante la inflación.

Para encontrar la forma funcional de los parámetros  $\varepsilon, \eta$  y  $\delta$  en el régimen de rodadura lenta se usa la condición (43), por lo cual la ecuación de Friedmann (26) se convierte en

$$H^2 \simeq \frac{1}{3}\rho_\kappa, \quad (49)$$

y el parámetro  $\varepsilon$  toma la forma

$$\varepsilon \simeq \frac{\dot{\phi}^2/a^2}{H^2} + \frac{g^2 \phi^4/a^4}{H^2}, \quad (50)$$

<sup>1</sup> Se puede mostrar que las expresiones en la ecuación (38) aplicadas a un modelo inflacionario compuesto por un campo escalar se reducen a las expresiones en la ecuación (37).

o, en términos de  $\psi$ ,

$$\varepsilon \simeq \frac{2}{\kappa g^2 \psi^4} + \frac{g^2 \psi^4}{H^2}. \quad (51)$$

Por otra parte, de la ecuación (44) se tiene que durante el período de rodadura lenta

$$\kappa = \frac{2}{g^2 \psi^6}, \quad (52)$$

y, por ende, el parámetro  $\varepsilon$  se convierte en

$$\varepsilon \simeq \psi^2 + \frac{g^2 \psi^4}{H^2}, \quad (53)$$

o 
$$\varepsilon \simeq \psi^2(\gamma + 1), \quad (54)$$

definiendo la cantidad  $\gamma = \psi^2 g^2 / H^2$ . Siguiendo la misma línea de análisis, se puede encontrar una expresión para el parámetro  $\eta$  en el régimen de rodadura lenta; por medio de la ecuación (39) y la forma de  $\varepsilon$  mostrada en (54) se encuentra

$$\eta \simeq \psi^2. \quad (55)$$

Por último, para hallar la ecuación que relaciona  $\delta$  con el campo  $\psi$ , se usan las ecuaciones (46), (54) y (55), y se obtiene

$$\left[ \frac{\dot{\delta}}{H\delta} + 3 \right] \simeq \frac{\gamma}{2(\gamma + 1)} \varepsilon^2, \quad (56)$$

de donde se observa que si  $\dot{\psi}/H\psi \ll 1$  entonces  $\delta \simeq \frac{\gamma}{6(\gamma+1)} \varepsilon^2 \simeq \frac{\gamma(\gamma+1)\psi^4}{6}$ , lo cual es consecuente con el análisis hecho acerca de los órdenes de magnitud de cada parámetro (véase la ecuación (48)).

Una de las motivaciones para el uso de las condiciones de rodadura lenta es el monto de inflación  $N_e$  que indica cuánto se expandió el universo en los tiempos tempranos (Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008). Dicho valor es importante porque determina si los problemas clásicos de la cosmología estándar se resuelven satisfactoriamente (Kim & Murphy, 1985; Lyth & Liddle, 2009; Weinberg, 2008). Por ende, es interesante encontrar una expresión para el monto de expansión en términos de los parámetros de rodadura lenta del modelo propuesto. Para esto, se tiene en cuenta que  $\delta \equiv -\dot{\psi}/H\psi$  y  $\delta \sim \varepsilon^2$ , ya que esto permite establecer que  $\gamma H^2$  permanece constante durante el régimen de rodadura lenta y, por lo tanto, se establecen las relaciones

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_i} \simeq \frac{\gamma + 1}{\gamma_i + 1}, \quad \frac{\gamma}{\gamma_i} \simeq \frac{H^2}{H_i^2}, \quad (57)$$

en donde el subíndice  $i$  indica el inicio de la inflación. Ahora, considerando que al final de la inflación del tipo rodadura lenta  $\varepsilon = 1$ , se llega a

$$\gamma \simeq \frac{\gamma_i + 1}{\varepsilon_i}, \quad \frac{H_i^2}{H^2} \simeq \frac{\gamma_i}{\gamma_i + 1} \varepsilon_i, \quad (58)$$

de donde es posible encontrar el monto de expansión acelerada. De manera general, el monto de expansión está definido de la siguiente manera:

$$N_e \equiv \int_{t_i}^{t_f} H dt, \quad (59)$$

en donde  $t_i$  y  $t_f$  son los tiempos inicial y final de la inflación. Sin embargo, debido a que no se conoce  $H$  como función del tiempo, se hace necesario hacer el cambio de variable  $dt = dH/H$ , puesto que de esta manera se tiene

$$N_e = - \int_{H_i}^{H_f} \frac{dH}{H\varepsilon}. \quad (60)$$

En la anterior expresión se hace otro cambio de variable  $dH = -\frac{H^3}{2g^2\psi^2} d\gamma$  para encontrar una expresión integrable

$$N_e \simeq -\frac{1}{2\psi^2} \int_{\gamma_i}^{\gamma_f} \frac{-1/\gamma^2}{(\gamma + 1)/\gamma} d\gamma, \quad (61)$$

a partir de la cual se encuentra el monto de expansión para el modelo de estudio

$$N_e \simeq \frac{\gamma_i + 1}{2\varepsilon_i} \ln \left[ \frac{\gamma_i + 1}{\gamma_i} \right]. \quad (62)$$

Se aprecia que  $N_e$  depende de los valores iniciales de  $\gamma$  y  $\varepsilon$ , y no de su evolución temporal a lo largo de la inflación. Debido a que  $\gamma$  y  $\varepsilon$  dependen de  $\psi$  y  $H$ , es claro que para resolver los problemas de la cosmología estándar se deben fijar los valores iniciales de  $\psi$  y  $H$ , así como el valor de las constantes  $g$  y  $\kappa$ ; el ajuste de estas cantidades se hace a partir de las cotas observacionales sobre la escala de energía durante la inflación. Una vez encontrado el valor de las condiciones iniciales de  $\gamma$  y  $\varepsilon$ , se reemplazan en la ecuación (62) para comprobar que el valor de  $N_e$  satisface la cota inferior ( $N \geq 60$ ) (Kim & Murphy, 1985; Lyth & Liddle, 2009; Weinberg, 2008).

### Solución numérica de las ecuaciones de evolución

En esta sección se muestra la solución numérica del sistema de ecuaciones dinámicas (26), (27) y (28). Se espera que las variables físicas presenten las características apropiadas durante la inflación: pequeña variación del campo escalar  $\psi$  y subsecuente oscilación, dominio de  $\rho_\kappa$  sobre  $\rho_{YM}$  al principio de la evolución temporal, un valor de  $\varepsilon \ll 1$  y una pequeña variación durante la inflación del tipo rodadura lenta, y el monto de expansión  $N_e$  superior a 60 al final de la inflación. Debido a que las ecuaciones (26), (27) y (28) están escritas en términos del factor de expansión, debe hacerse una modificación para que éstas queden escritas en términos de  $H$  (cantidad física medible). Además, como se busca la evolución temporal de  $\psi$ , es mejor escribir todas las ecuaciones en términos de  $\psi$  en lugar de  $\phi$ .

Así, el nuevo conjunto de ecuaciones es

$$2H^2 = (\dot{\psi} + \psi H)^2 (1 + \kappa g^2 \psi^4) + g^2 \psi^4, \quad (63)$$

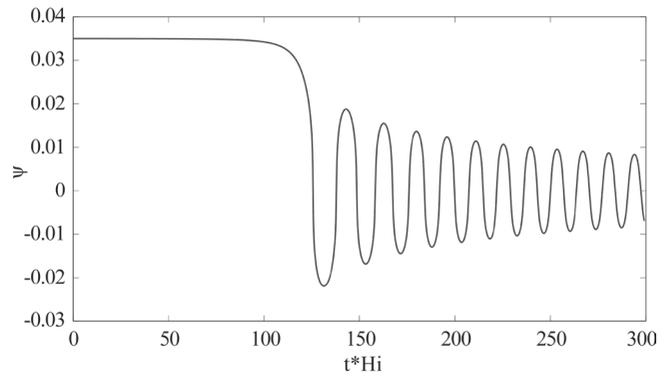
$$\dot{H} = -(\dot{\psi} + \psi H)^2 - g^2 \psi^4, \quad (64)$$

$$\begin{aligned} & (1 + \kappa g^2 \psi^4)(\ddot{\psi} + 2\dot{\psi}H + \psi\dot{H} + \psi H^2) \\ & + (1 + \kappa(\dot{\psi} + \psi H)^2)2g^2\psi^3 \\ & + (1 - 3\kappa g^2 \psi^4)(\dot{\psi} + \psi H)H = 0. \end{aligned} \quad (65)$$

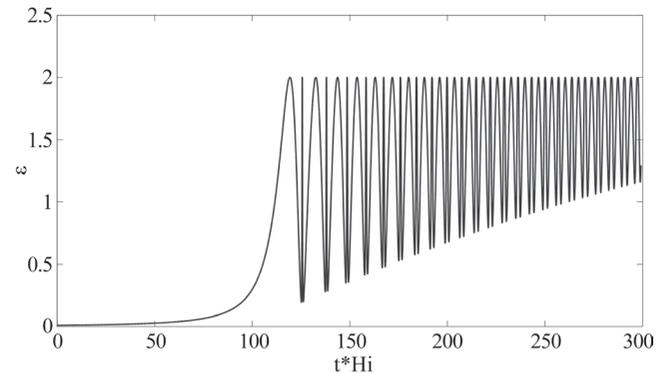
En cuanto a las condiciones iniciales y los parámetros libres del modelo, estos se escogen de acuerdo a las cotas sobre la escala de energía durante la inflación fijadas por los resultados de WMAP y Planck (**Planck Collaboration, Ade, et al.**, 2013a; **WMAP Collaboration, Hinshaw, et al.**, 2013). Entonces, para encontrar la solución del sistema de ecuaciones se toman las condiciones  $\psi_i = 0,035M_{pl}$  y  $\psi_i = -1 \times 10^{-10}M_{pl}$ ,  $H_i = 3,4 \times 10^{-5}$ ,  $M_{pl}$ ,  $g = 2,5 \times 10^{-3}$  y  $k = 1,733 \times 10^{14} M_{pl}^{-4}$  en donde  $M_{pl}$  es la masa reducida de Planck, la cual se define como  $M_{pl} \equiv (8\pi G_N)^{-1/2} = 2,43 \times 10^{18}$  GeV. Dado que los resultados son numéricos, resulta interesante observar los gráficos de evolución temporal de las cantidades físicas más importantes:  $\psi$  (campo escalar),  $\varepsilon$  (parámetro de rodadura lenta) y  $N_e$  (monto de expansión). Además, se grafica la relación  $\rho_\kappa/\rho_{YM}$  para observar cómo evoluciona  $\rho_\kappa$  con respecto a  $\rho_{YM}$ .

En la figura (1) se aprecia claramente que  $\psi$  varía muy lentamente en los tiempos tempranos, conduciendo a una era de inflación del tipo rodadura lenta en consecuencia con la condición encontrada líneas atrás, es decir,  $\delta \ll 1$ ; luego de cierto tiempo de evolución, el campo empieza a variar hacia un período de oscilación en el cual el campo  $\psi$  decaerá en otras partículas, dando inicio al proceso de recalentamiento (**Greene, Kofman, Linde & Starobinsky**, 1997; **Lyth & Liddle**, 2009). En la figura (2) se observa que  $\varepsilon$  empieza su evolución con un valor muy pequeño ( $\varepsilon \ll 1$ ) y varía lentamente durante cierto tiempo; luego, en el mismo instante en que  $\psi$  empieza a variar, se observa un aumento en el valor de  $\varepsilon$  hasta que llega a ser 1 debido a que  $\rho_\kappa \sim \rho_{YM}$  y la inflación del tipo rodadura lenta llega a su fin (en este momento la ecuación de estado es  $\rho + 3P = 0$ ); finalmente,  $\varepsilon$  llega a su valor máximo ( $\varepsilon = 2$ ) y, en este momento,  $\rho_{YM} \sim \rho_\kappa$ , por lo cual finaliza la era inflacionaria y empieza la época dominada por la radiación.

Estas últimas conclusiones están respaldadas por el comportamiento de  $\rho_\kappa/\rho_{YM}$  en función del tiempo, como se muestra en la figura (3); allí se evidencia que en los tiempos tempranos,  $\rho_\kappa$  es mayor que  $\rho_{YM}$  al menos en dos órdenes de magnitud (lo que hace posible la inflación del tipo rodadura lenta); sin embargo,  $\rho_\kappa$  decae rápidamente, de tal manera que al final de la inflación  $\rho_{YM}$  domina notablemente; así, es claro que las condiciones para la inflación ( $\rho_\kappa > \rho_{YM}$ ) y para la inflación del tipo rodadura lenta ( $\rho_\kappa \gg \rho_{YM}$ ) se cumple satisfactoriamente. Por último, en la figura (4) se muestra el comportamiento del monto de expansión en función del tiempo; allí se observa que durante la inflación,  $N_e$  aumenta rápidamente hasta conseguir el valor requerido para poder resolver los problemas de la cosmología estándar (**Kim & Murphy**, 1985; **Lyth & Liddle**, 2009; **Weinberg**, 2008); luego, su aumento es lento debido a que la expansión del universo deja de ser exponencial.

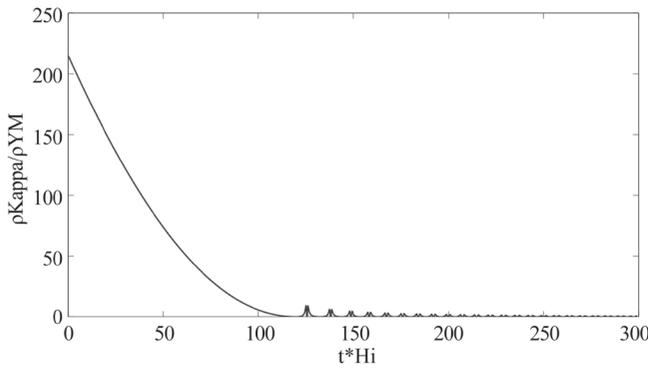


**Figura 1.** Evolución obtenida para  $\psi$  en función de  $tH_i$

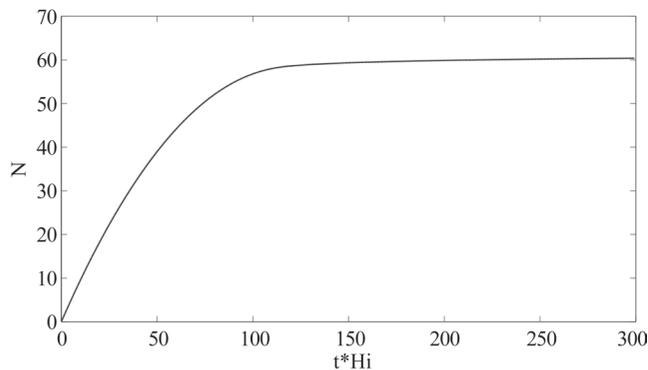


**Figura 2.** Evolución encontrada para  $\varepsilon$  en función de  $tH_i$

Con estos resultados gráficos se muestra que hay coherencia entre el estudio analítico del modelo durante la inflación del tipo rodadura lenta y el comportamiento de las variables físicas encontrado a partir de la solución numérica de las ecuaciones de movimiento. De manera natural, el modelo satisface la condición necesaria y suficiente para obtener un comportamiento de expansión acelerada y, además, presenta las propiedades representativas de la inflación del tipo rodadura lenta. Por lo tanto, se evidencia la relevancia de asumir las condiciones de rodadura lenta, puesto que ellas permiten tener una idea acerca del comportamiento de las variables físicas en este momento, así como conocer el monto de expansión sin necesidad de conocer el comportamiento de  $N_e$  a lo largo del tiempo: basta simplemente con usar la expresión (62) y las condiciones iniciales de  $\varepsilon$  y  $\gamma$  para conocer su valor. En síntesis, se hace claro que el aspecto clave del modelo recae en la dinámica combinada del término de Yang-Mills y el término  $\kappa$ , ya que de esta manera se generan las características deseadas (por ejemplo,  $\rho + 3P < 0$ ) y su acción conjunta hace que la expansión se prolongue durante el tiempo suficiente para que  $N_e$  alcance el valor mínimo requerido.



**Figura 3.** Evolución obtenida para  $\rho_\kappa/\rho_{YM}$  en función de  $tH_i$



**Figura 4.** Evolución obtenida para el monto de expansión  $N$  en función de  $tH_i$ . Aquí se puede ver que  $N$  alcanza el valor cercano a la cota inferior conocida ( $N_e \geq 60$ ), resolviendo así los problemas clásicos de la cosmología estándar.

### Conclusiones

En este artículo se presentó la construcción de un modelo inflacionario vectorial en un marco de teorías de *gauge* no abelianas (Maleknejad & Sheikh-Jabbari, 2011; Maleknejad & Sheikh-Jabbari, 2013) con el objetivo de acercar la física durante la inflación con la física conocida en el modelo estándar de partículas elementales, en la que la invariancia ante el grupo  $SU(2)$  caracteriza las interacciones débiles.

En dicha presentación se aprecia que la forma escogida para los campos vectoriales es crucial debido a que produce expansión isótropa en un fondo rotacionalmente invariante (gracias, igualmente, al hecho de trabajar en el marco de una teoría invariante de *gauge*  $SU(2)$ ). Por otra parte, a pesar de que el término cinético canónico del lagrangiano usual para una teoría de *gauge* no abeliana (lagrangiano de Yang-Mills) no sirve para generar una época inflacionaria, se encuentra una adecuada modificación, introduciendo un término cuártico en  $F_{\mu\nu}^a$  multiplicado por un tensor de Levi-Civita, que permite obtener de manera satisfactoria las propiedades deseadas ( $\rho$

+  $3P < 0$ ). Como se observa en la solución numérica de las ecuaciones, el término  $\kappa$ , además de contribuir a la ecuación de estado con un signo menos, presenta un mayor efecto sobre la dinámica inflacionaria al inicio de la evolución temporal, haciendo que la variación del parámetro  $\epsilon$  sea lenta al inicio de la inflación. La dinámica conjunta de  $\rho_\kappa$  y  $\rho_{YM}$  es esencial para dar inicio y final a la inflación, ya que se espera que la expansión acelerada no sea eterna sino que tenga un final y dé paso a las demás eras existentes en la historia del universo. El estudio de la inflación del tipo rodadura lenta permitió tener una idea acerca del comportamiento de las variables físicas relevantes y, a través de él, se obtuvo una expresión para el monto de inflación expresado en la ecuación (62), a partir de la cual se encuentra que  $N_e \sim 60$  usando los valores iniciales tomados en la solución numérica. Es importante anotar que la solución numérica de las ecuaciones no se obtuvo teniendo en cuenta aproximaciones de rodadura lenta ni con suposiciones adicionales; los resultados observados surgieron del conjunto completo de ecuaciones y, como se dijo anteriormente, de la dinámica de los dos términos del lagrangiano propuesto. Otro aspecto importante es la escala de energía encontrada en el modelo, la cual es del orden de la escala de energía de gran unificación ( $\sim 10^{16}$  GeV) (BICEP2 Collaboration, Ade, *et al.*, 2014; Dine, 2007), lo que permite tener una idea de la física en esta época del universo y su relación con la física de partículas conocida, planteando así la posibilidad de construir modelos de recalentamiento en el marco de la inflación vectorial basados en teorías de *gauge* no abelianas. Se concluye, entonces, que el modelo presenta de manera natural todas las características propias de un modelo inflacionario con expansión isótropa sin modificación de la gravedad ni ajustes finos *ad hoc*, haciendo de éste un buen descriptor del comportamiento del universo primordial.

### Agradecimientos

Y.R. cuenta con el apoyo financiero de la Fundación para la Promoción de la Investigación y la Tecnología del Banco de la República mediante proyecto de investigación número 3025 CT-2012-02, de la DIF de Ciencias (UIS) mediante proyecto de investigación número 5709, de la VCTI (UAN) mediante proyecto de investigación número 20131041, y de Colciencias mediante proyecto de investigación número RC 0384-2013. Y.R. y C.M.N. cuentan con el apoyo financiero de Colciencias - ECOS-NORD mediante proyecto de investigación número RC 0899-2012. C.M.N. cuenta con el apoyo financiero de la UIS a través de su programa de becas de posgrado.

### Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.

### Bibliografía

Abbott L., Farhi E., Wise M. B., 1982. Particle production in the new inflationary cosmology. *Phys. Lett.* **117B**: 29.

- Albrecht A., Steinhardt P. J., Turner M. S., Wilczek F.**, 1982. Reheating an inflationary universe. *Phys. Rev. Lett.* **48**: 1437.
- Allahverdi R., Brandenberger R., Cyr-Racine F.-Y., Mazumdar A.**, 2010. Reheating in inflationary cosmology: Theory and applications. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **60**: 27.
- Armendáriz-Picón, C.**, 2007. Creating statistically anisotropic and inhomogeneous perturbations. *JCAP* **0709**: 014.
- Axelsson, M., et al.**, 2013. Directional dependence of  $\Lambda$ CDM cosmological parameters. *Astrophys. J.* **773**: L3.
- BICEP2 Collaboration, Ade P. A. R., et al.**, 2014. BICEP2 I: Detection of B-mode polarization at degree angular scales. arXiv:1403.3985 [astro-ph.CO].
- Cai R.-G., Ma Y.-Z., Tang B., Tuo Z.-L.** 2013. Constraining the anisotropic expansion of the Universe. *Phys. Rev. D* **87**: 123522.
- Campanelli P., Cea G., Fogli G., Marrone A.** 2011. Testing the isotropy of the Universe with type Ia supernovae. *Phys. Rev. D* **83**: 103503.
- Dine M.** 2007. Supersymmetry and string theory: Beyond the standard model. Cambridge University Press, Cambridge - UK.
- Golovnev A.**, 2010. Linear perturbations in vector inflation and stability issues. *Phys. Rev. D* **81**: 023514.
- Golovnev A.**, 2011. On cosmic inflation in vector field theories. *Class. Quant. Grav* **28**: 245018.
- Golovnev A., Mukhanov V., Vanchurin V.** 2008. Vector inflation. *JCAP* **0806**: 009.
- Greene P. B., Kofman L., Linde A. D., Starobinsky, A. A.** 1997. Structure of resonance in preheating after inflation. *Phys. Rev. D* **56**: 6175.
- Groeneboom N. E., Ackerman L., Wehus I. K., Eriksen H. K.** 2010. Bayesian analysis of an anisotropic universe model: Systematics and polarization, *Astrophys. J.* **722**: 452.
- Groeneboom N. E., Eriksen H. K.** 2009. Bayesian analysis of sparse anisotropic universe models and application to the 5-yr WMAP data. *Astrophys. J.* **690**: 1807.
- Himmetoglu B., Contaldi C. R., Peloso M.** 2009a. Instability of the Ackerman-Carroll-Wise model, and problems with massive vectors during inflation. *Phys. Rev. D* **79**: 063517.
- Himmetoglu B., Contaldi C. R., Peloso M.**, 2009b. Instability of anisotropic cosmological solutions supported by vector fields. *Phys. Rev. Lett.* **102**: 111301.
- Himmetoglu B., Contaldi C. R., Peloso M.** 2009c. Ghost instabilities of cosmological models with vector fields non-minimally coupled to the curvature. *Phys. Rev. D* **80**: 123530.
- Kalus B., Schwarz D. J., Seikel M., Wiegand A.** 2013. Constraints on anisotropic cosmic expansion from supernovae. *Astron. Astrophys.* **553**: A56.
- Kane G. L.** 1993. Modern elementary particle physics: The fundamental particles and forces. Addison-Wesley Press, Boston - USA.
- Kim J., Komatsu E.** 2013. Limits on anisotropic inflation from the Planck data. *Phys. Rev. D* **88**: 101301.
- Kim C. W., Murphy P.** 1985. On the minimum amount of inflation to solve the flatness and horizon problems. *Phys. Rev. D* **32**: 3303.
- Lyth D. H., Liddle A. R.** 2009. The primordial density perturbation: Cosmology, inflation, and the origin of structure. Cambridge University Press, Cambridge - UK.
- Maleknejad A., Sheikh-Jabbari M. M.** 2011. Non-abelian gauge field inflation. *Phys. Rev. D* **84**: 043515.
- Maleknejad A., Sheikh-Jabbari M. M.** 2013. Gauge-flation: Inflation from non-abelian gauge fields. *Phys. Lett. B* **723**: 224.
- Maleknejad A., Sheikh-Jabbari M. M., Soda J.** 2012. Gauge-flation and cosmic no-hair conjecture. *JCAP* **1201**: 016.
- Maleknejad A., Sheikh-Jabbari M. M., Soda J.** 2012. Gauge fields and inflation. *Phys. Rep.* **528**: 161.
- Mukhanov V.** 2005. Physical foundations of cosmology. Cambridge University Press, Cambridge - UK.
- Paci F., et al.** 2013. Hemispherical power asymmetries in the WMAP 7-year low-resolution temperature and polarization maps. arXiv:1301.5195 [astro-ph.CO].
- Penzias A. A., Wilson R. W.** 1965. A measurement of excess antenna temperature at 4080  $-Mc/s$ . *Astrophys. J.* **142**: 419.
- Planck Collaboration, Ade, et al.**, 2013a. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters. arXiv:1303.5076 [astro-ph.CO].
- Planck Collaboration, Ade, et al.**, 2013b. Planck 2013 results. XXIII. Isotropy and statistics from the CMB. arXiv:1303.5083 [astro-ph.CO].
- Ramazanov S. R., Rubtsov G.** 2014. Constraining anisotropic models of the early Universe with WMAP9 data. *Phys. Rev. D* **89**: 043517.
- Rubakov V. A.** 1982. Graviton creation in the inflationary universe and the grand unification scale. *Phys. Lett.* **115B**: 189.
- Ryder L. H.** 1985. Quantum field theory. Cambridge University Press, Cambridge - UK.
- Singal A. K.** 2013. Is there a violation of the Copernican principle in radio sky? arXiv:1305.4134 [astro-ph.CO].
- Starobinsky A. A.** 1980. A new type of isotropic cosmological models without singularity. *Phys. Lett.* **91B**: 99.
- Starobinsky A. A.** 1982. Dynamics of phase transition in the new inflationary universe scenario and generation of perturbations. *Phys. Lett.* **117B**: 175.
- Weinberg S.** 1996. The quantum theory of fields, Volume 2: Modern applications. Cambridge University Press, Cambridge - UK.
- Weinberg S.** 2008. Cosmology. Oxford University Press, Oxford - UK.
- WMAP Collaboration, Hinshaw, G., et al.**, 2013. Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Cosmological parameter results. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **208**: 19.
- Zhao W., Wu P., Zhang Y.** 2013. Anisotropy of cosmic acceleration. *Int. J. Mod. Phys. D* **22**: 1350060.

# Estado del conocimiento de la fauna de anfibios y reptiles del departamento de Casanare, Colombia

Raúl Pedroza-Banda<sup>1,2,\*</sup>, Jhon Jairo Ospina-Sarria<sup>1,2</sup>, Teddy Angarita-Sierra<sup>1,2</sup>, Marvin Anganoy-Criollo<sup>1</sup>, John D. Lynch<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de investigación en Biogeografía y Cladística Profunda, Laboratorio de Anfibios, Instituto de Ciencias naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

<sup>2</sup>Yoluka ONG, Fundación de Investigación en Biodiversidad y Conservación

## Resumen

Este estudio presenta la revisión actualizada de la riqueza, composición y distribución de los anfibios y reptiles del departamento del Casanare. Se revisaron 1.012 ejemplares depositados en las principales colecciones biológicas del país y se recolectaron 658 ejemplares en cuatro municipios de Casanare. Se obtuvo el registro de 46 especies de anfibios y 65 especies de reptiles, de las cuales, seis corresponden a nuevos registros y dos amplían la distribución conocida en el país. Los municipios de Sácama, Támara y Recetor presentaron los mayores vacíos de información.

**Palabras clave:** Orinoquia colombiana, herpeto fauna, llanos, piedemonte, distribución.

## Current knowledge of the amphibian and reptile fauna in the department of Casanare, Colombia

### Abstract

The present study is an updated revision of the richness, composition and distribution of amphibians and reptiles in Casanare. A total of 1,012 specimens from the main Colombian biological collections were examined and 658 specimens were collected in four Casanare municipalities. As a result, we reported 46 species of amphibians and 65 species of reptiles of which six are new records and two extend their known distribution in Colombia. Additionally, we identified Sácama, Támara and Recetor as the municipalities with the poorest knowledge of their amphibians and reptiles.

**Key words:** Orinoquia, herpeto fauna, distribution, savanna, foothill.

## Introducción

Durante la última década, tanto el gobierno nacional, como la empresa privada, las organizaciones no gubernamentales, las universidades y los centros de investigación han volcado su atención sobre los diferentes ecosistemas de Casanare motivados por el acelerado crecimiento económico de la región y las radicales transformaciones de los paisajes naturales de las llanuras y el piedemonte. Esto ha generado un creciente número de investigaciones que han significado avances en el conocimiento de los anfibios y reptiles del departamento.

A pesar de su vasta extensión y de la importancia que ha tomado esta región para el país, en términos biológicos los esfuerzos han sido insuficientes, ya que el desconocimiento de su fauna sigue siendo evidente, sobre todo en lo concerniente a la fauna de anfibios y reptiles, cuya composición se conoce de manera aceptable en la zona del piedemonte llanero, pero no así en la zona de las sabanas o llanuras del Orinoco.

Los primeros registros sobre la herpeto fauna del departamento se deben a **Amaral** (1931) y **Medem** (1965, 1981) en lo concerniente a los reptiles y a **Cochran & Goin** (1970)

en cuanto a los anfibios. Tuvieron que pasar tres décadas para que figuraran nuevos registros del departamento, cuando **Ruiz, et al.**, (1996) actualizaron la lista de especies de anfibios del país, con cuyos registros, y los de otras publicaciones, **Acosta-Galvis** (2000) realizó una nueva revisión de los anfibios de Colombia en la que reportó 22 especies en Casanare. Recientemente, **Acosta-Galvis & Alfaro-Bejarano** (2011) actualizaron la información sobre los anfibios de este departamento en los últimos cinco años, pero con base en los registros del piedemonte, los cuales tienen una baja representatividad de los paisajes de sabana, que son los ecosistemas dominantes en Casanare.

Después de los reportes de **Amaral** (1931) y **Medem** (1965, 1981), los estudios sobre los reptiles de este departamento escasearon y no fue hasta la década de 1980 cuando se obtuvieron nuevos registros de los saurios de Colombia

### \*Correspondencia:

Raúl Pedroza-Banda, pedrozabanda@gmail.com

Recibido: 4 de julio de 2013

Aceptado: 16 de abril de 2014

reportados por **Ayala** (1986), quien registró siete especies de lagartijas presentes en Casanare. Posteriormente, **Sánchez-C, et al.**, (1987) presentaron una lista de especies de Colombia en la cual se registraron 52 especies de reptiles asignadas a este departamento. La contribución más reciente al conocimiento de la fauna de reptiles en esta región del país la realizaron **Peñuela Recio, et al.**, (2011) quienes se refirieron a los reptiles de las reservas de la sociedad civil en cuatro municipios de este departamento. **Alfaro, et al.**, (2011) actualizaron la lista de especies de reptiles de Casanare y **Cortés & Sánchez** (2011) evaluaron el estado de conservación de los reptiles presentes en el bloque petrolero Cubiro del municipio de San Luis de Palenque.

Hasta el momento, los aportes al conocimiento de la herpeto fauna de Casanare se han centrado en proveer listas de especies, las cuales son una herramienta útil para iniciar cualquier estudio, pero no se ha evaluado la distribución ni se ha intentado detectar sus patrones e identificar las áreas en las que aún hay desconocimiento en el departamento.

Motivados por los problemas a los que se enfrenta la región de la Orinoquía, y con el fin de dar a conocer la diversidad de la herpeto fauna y su distribución en Casanare, en el año 2012 se realizaron exploraciones de campo en busca de anfibios y reptiles en los municipios de Aguazul, Paz de Ariporo, San Luis de Palenque y Trinidad. Se revisaron, así mismo, las

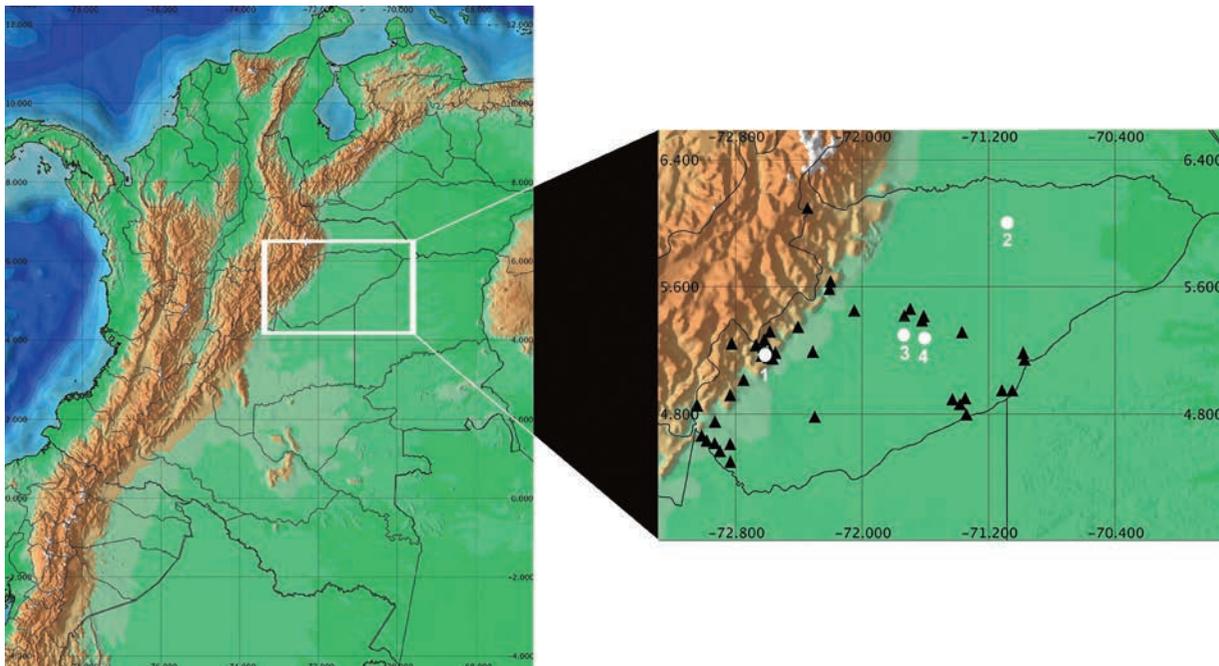
principales colecciones de anfibios y reptiles del país en busca de registros de ejemplares de este departamento. Los resultados mostraron un profundo vacío en el conocimiento tanto de la diversidad como de la distribución de la herpeto fauna en este departamento.

## Materiales y métodos

### Muestreo

Se realizaron tres visitas a ocho localidades del departamento de Casanare durante la época seca y el periodo de lluvias. Se visitaron las veredas Cupiagua ( $5^{\circ}19'0.12''$  N,  $72^{\circ}34'59.95''$  O) y Manoguía ( $5^{\circ}10,082'$  N,  $72^{\circ}38,190'$  O) en el municipio de Aguazul, en el piedemonte llanero; Guaracura ( $5^{\circ}8'40,4''$  N,  $70^{\circ}58'22,6''$  O), La Lucha ( $5^{\circ}23'15,0''$  N,  $71^{\circ}37'16,9''$  O) y La Riverita ( $5^{\circ}8'41,2''$  N,  $70^{\circ}57'27,9''$  O) en el municipio de San Luis de Palenque; San Vicente ( $5^{\circ}18'47,2''$  N,  $71^{\circ}22'5,4''$  O) y La Cañada ( $5^{\circ}26'18,9''$  N,  $71^{\circ}36'49''$  O) en el municipio de Trinidad y la vereda La Colombina ( $6^{\circ}2'36,5''$  N,  $71^{\circ}5'34,2''$  O) en el municipio de Paz de Ariporo, sobre los llanos orinocenses (Figura 1).

En el trabajo de campo se empleó la técnica de inventario por búsqueda libre sin restricciones (**Rueda, et al.**, 2006), con salidas diurnas y nocturnas de ocho horas diarias durante un periodo de 36 días (31 días en las localidades sobre los llanos orientales y cinco en la localidad del piedemonte).



**Figura 1.** Distribución de las localidades con registros de anfibios y reptiles en el departamento de Casanare, Colombia (**Anexo 1**). 1. Círculo blanco: localidad visitada en Aguazul (piedemonte); 2. Círculo blanco: localidad visitada en Paz de Ariporo (llanos); 3. Círculo blanco: localidades visitadas en San Luis de Palenque (llanos). 4. Círculo blanco: localidades visitadas en Trinidad.

Tres investigadores participaron en los muestreos de las localidades en los municipios de Aguazul y Paz de Ariporo, en tanto que en las localidades del municipio de San Luis de Palenque participaron dos investigadores. Se capturaron adultos y renacuajos. Los individuos adultos se almacenaron en etanol (70%) y los renacuajos, en formaldehído (10%), y se depositaron en la colección de anfibios del Instituto de Ciencias Naturales (ICN) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

### **Revisión de colecciones**

Se visitaron las colecciones del Museo de La Salle, Bogotá, del Museo de Historia Natural de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, del Museo de Historia Natural ANDES, Bogotá, del Instituto Alexander von Humboldt y del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia para la búsqueda y revisión de ejemplares de anfibios y reptiles del departamento de Casanare. Esta revisión incluyó tanto ejemplares catalogados como aquellos en proceso de inclusión en las colecciones, para lo cual los datos de las localidades se obtuvieron directamente de las notas de campo.

### **Determinación taxonómica**

La determinación de las especies se realizó con base en revisiones y claves taxonómicas, ejemplares tipo depositados en el Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional, ejemplares de referencia, descripciones originales de las especies y ayuda de los expertos M. Harvey (teiidos) y R. Caicedo Portilla (gekkonidos).

Las taxonomías empleadas en el presente artículo fueron las de **Grant, et al.**, (2006) para Aromobatidae, la de **Faivovich, et al.**, (2005) para Hylidae, la de **Hedges, et al.**, (2008) para Strabomantidae y la de **Frost, et al.**, (2006) para el resto de familias. En el caso de los reptiles, se siguió a **Wüster** (2001), a **Lehr** (2002) y a **Campbell y Lamar** (2004), en cuanto a las serpientes, a **Pyron, et al.**, (2011), a **Harvey** (2012), a **Caicedo-Portilla & Dulcey-Cala** (2011), y a **Poe** (2013) para las lagartijas del género *Anolis*. En el caso de las tortugas y cocodrilos se siguió a **Rueda-Almonacid** (2007).

### **Análisis de datos**

**Fase de campo.** Para los registros obtenidos en campo, la diversidad alfa o riqueza de especies se definió como el número de especies en el área de estudio; la riqueza esperada se calculó por medio del estimador no paramétrico Jackknife de primer y segundo orden. Con el valor máximo de riqueza estimado, se determinó la representatividad del estudio en términos de porcentaje. Los estimadores se calcularon con el programa EstimateS 8.2.0 (**Colwell**, 2006). Este análisis no se realizó para el ensamble de reptiles, puesto que los resultados con los estimadores clásicos arrojaron resultados no confiables.

Conscientes de que la interpretación de los estimadores de diversidad comúnmente utilizados (**Shannon, Simpson**) es bastante compleja porque estos incorporan tanto la riqueza de especies como la equidad en un único valor (**Ludwing y Reynolds**, 1988), es decir, el mismo valor de diversidad puede obtenerse para una comunidad con baja riqueza y alta equidad como para una con alta riqueza y baja equidad, se utilizaron los números de Hill como estimadores debido a la facilidad para interpretarlos, ya que sus resultados se dan en unidades que corresponden al número de especies. Estos números permiten una aproximación a la estructura de las comunidades en el área de estudio (especies en relación con su abundancia) y garantizan que los resultados puedan compararse en el tiempo. La serie de números de Hill considerada fue la siguiente:

$N_0$ : número total de especies (S)

$N_1$ : número de especies abundantes =  $e H'$ , y

$N_2$ : número de especies muy abundantes =  $1/\lambda$ ,

donde  $H'$  es el índice de Shannon-Wiener y  $\lambda$  corresponde al índice de Simpson. Los resultados se dan en unidades de número de especies. Como se puede observar,  $N_1$  y  $N_2$  dan la estimación del número de especies abundantes y muy abundantes por cada una de las unidades de muestreo.

### **Análisis de distribución de anfibios**

Con base en la información obtenida en las salidas de campo y la recopilada de los registros en las colecciones biológicas visitadas, se buscó identificar patrones de distribución que permitieran delimitar las zonas del piedemonte y de los llanos orientales en las que tradicionalmente se ha subdividido el departamento de Casanare. Para este análisis se partió de la lista general de especies de anfibios del departamento, excluyendo los registros de especies con poblaciones transandinas, es decir, especies con distribuciones al occidente de los Andes. De esta manera se obtuvo una lista final de especies con distribución restringida al oriente de los Andes que fue empleada para determinar si existía o no un patrón de distribución.

## **Resultados**

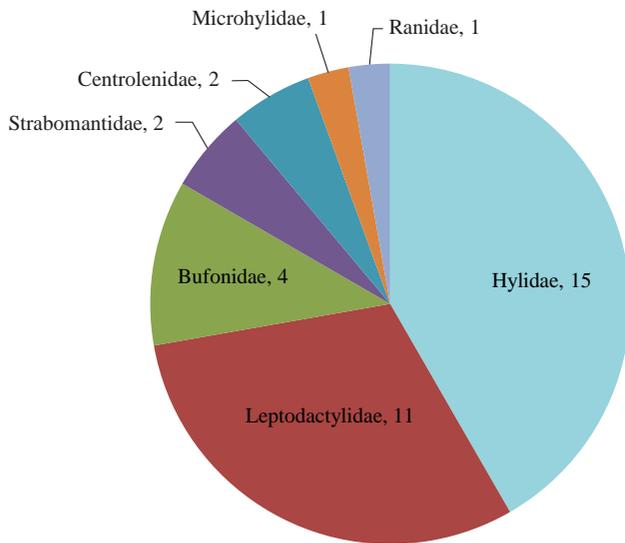
### **Fase de campo**

Se registraron 658 individuos adultos y cuatro lotes de renacuajos y se registraron posturas y cantos del centro-lénido *Hyalinobatrachium munozorum* después de un esfuerzo de muestreo de 640 horas/hombre. Estos registros correspondieron a 35 especies de anfibios (anexo 1) del orden Anura y 28 especies de reptiles (anexo 2).

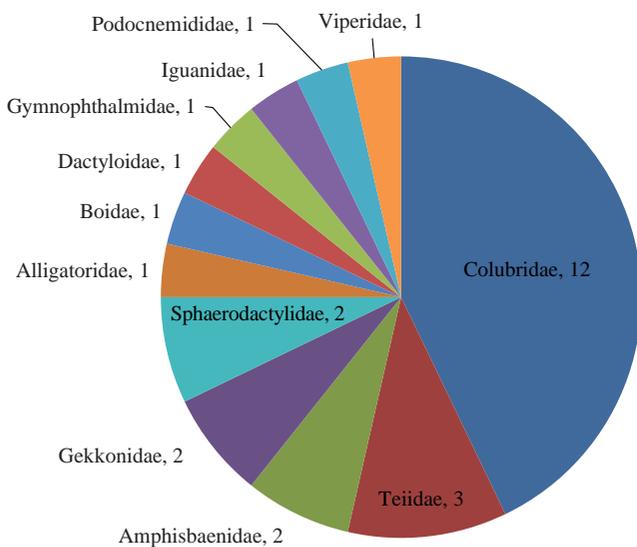
Las familias de anfibios más representativas fueron la Hylidae, con quince especies y Leptodactylidae con once especies; de la familia Bufonidae se registraron cuatro

especies y de Strabomantidae y Centrolenidae, dos especies en cada una. En las familias restantes (Microhylidae y Ranidae) se registró una especie en cada una (Figura 2).

En el caso de los reptiles, las familias más diversas fueron la Colubridae, con doce especies, Teiidae, con tres especies, y Amphisbaenidae, Gekkonidae y Sphaerodactylidae, con dos especies cada una. De las familias restantes (Boidae, Testudinidae, Dactyloidea, Gymnophthalmidae, Iguanidae, Podocnemididae y Viperidae) se registró una especie en cada una (Figura 3).



**Figura 2.** Número de especies de anfibios por familia registradas en la fase de campo



**Figura 3.** Número de especies de reptiles por familia registradas en la fase de campo

### Representatividad del muestreo

La ausencia de tendencia a alcanzar la asíntota de la curva de acumulación de especies de anfibios en el municipio de Aguazul indica que el muestreo no fue suficiente para acercarse a la representatividad total de especies en el área. Por esto, el número de 14 especies registradas en la localidad de este municipio estuvo por debajo del número estimado de especies esperado (Figura 4a). La curva de acumulación de especies de anfibios en las localidades de los llanos orientales indica que el muestreo fue insuficiente para lograr la representatividad de especies esperada para el ensamble de anfibios de estas localidades (Figura 4b).

Los estimadores empleados indican que el número posible de especies de anfibios para las localidades del municipio de Aguazul estaba en el rango de 19 a 20 especies, por lo cual las especies observadas corresponden a un 74,5 % de representatividad según el estimador Jackknife de primer orden y a 69,5% según el estimador Jackknife de segundo orden. Los estimadores también indicaron un mejor desempeño en la muestra de las localidades de los llanos orientales, donde se esperaba encontrar entre 29 y 31 especies de anfibios. Por lo tanto, se estima que se logró una representatividad entre 86,6 % (Jackknife de primer orden) y 81,2 % (Jackknife de segundo orden) de la fauna anfibia en esta zona.

### Estructura de los ensambles de anfibios

La abundancia proporcional obtenida para cada una de las localidades visitadas durante los muestreos demostró que en el municipio de San Luis de Palenque y Aguazul se encontraron siete especies abundantes, mientras que en Paz de Ariporo se encontraron seis especies abundantes (Figura 5). Al comparar la identidad de estas especies consideradas abundantes, se demostró que las siete especies registradas en Aguazul (*Pristimantis medemi*, *Rhaebo glaberrimus*, *Rhinella margaritifera*, *Leptodactylus colombiensis*, *Hypsiboaspunctatus*, *Hypsiboas boanse* *Hypsiboas lanciformis*) eran diferentes a las especies consideradas como abundantes en San Luis de Palenque (*Leptodactylus fragilis*, *Pseudopaludicola llanera*, *Leptodactylus macrosternum*, *Leptodactylus fuscus*, *Hypsiboas crepitans*, *Dendropsophus mathiassoni* y *Rhinella humboldti*) y en Paz de Ariporo (*P. llanera*, *L. fuscus*, *Trachycephalus typhonius*, *Engystomops pustulosus*, *H. crepitans* y *Scinax wandae*), mientras que estos dos últimos municipios compartían tres especies abundantes (*P. llanera*, *L. fuscus*, *H. crepitans*). Por otro lado, cada una de las localidades muestreadas presentó una especie muy abundante (Figura 5), única para cada una de ellas; en el caso del municipio de Aguazul, la especie muy abundante fue *P. medemi*, en San Luis de Palenque fue *L. fragilis* y en el municipio de Paz de Ariporo, *P. llanera*.

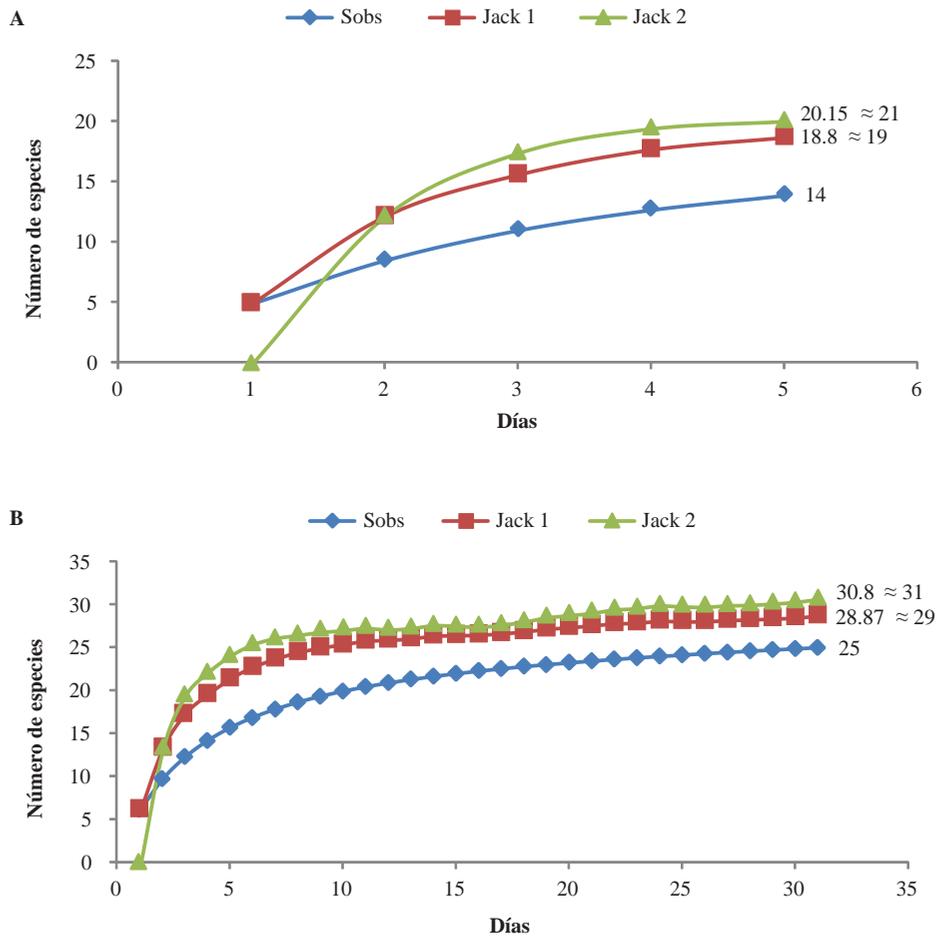


Figura 4. Curva de acumulación de especies para las especies de anfibios registradas en las localidades de (A) piedemonte y (B) llanos.

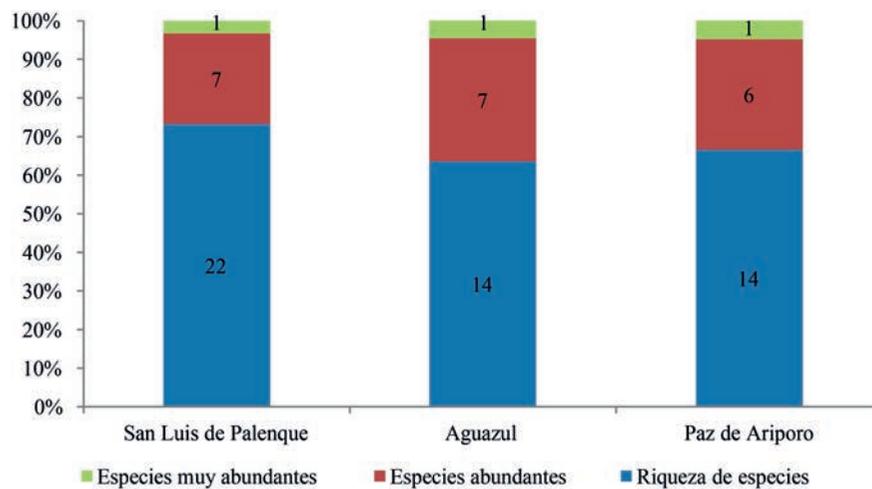


Figura 5. Serie de Hill obtenida para cada una de las localidades visitadas (Aguazul, Paz de Ariporo y San Luis de Palenque)

**Registros de anfibios y reptiles de Casanare en colecciones biológicas**

En total se examinaron 1.012 ejemplares de anfibios y reptiles depositados en diferentes colecciones, de los cuales 38 especies correspondieron a anfibios y 44, a reptiles (Anexos 1 y 2). Estos datos, más los obtenidos en la salida de campo, arrojaron un total de 46 especies de anfibios y 58 especies de reptiles. Además, se espera corroborar la presencia de seis especies más de reptiles (*Chelonoidis carbonaria*, *Chelus fimbriatus*, *Crocodylus intermedius*, *Mabuya altamazonica*, *Paleosuchus trigonatus* y *Siphlophis compressus*), ya que muchos de los registros no estaban disponibles para su revisión durante las consultas realizadas en las colecciones. Sin embargo, se cuenta con los registros fotográficos y la constancia de depósito por parte de los investigadores en las correspondientes colecciones biológicas.

**Diversidad de anfibios y reptiles de Casanare**

Entre las 46 especies de anfibios, las familias con mayor representatividad de especies fueron Hylidae, con 20 especies, y Leptodactylidae, con 13. De la familia Bufonidae

se encontraron cuatro especies, mientras que de las familias Aromobatidae, Centrolenidae y Strabomantidae se se encontraron dos especies. De las familias restantes (Caeciliidae, Microhylidae y Ranidae), se encontró una especie de cada una (Figura 6). Hasta el momento no se tienen registros de especies del orden Caudata (salamandras) en el departamento.

En cuanto a los reptiles, el número total de especies en el departamento de Casanare corresponde a 65 especies, de las cuales, 39 son serpientes y, de estas, 27 pertenecen a la familia Colubridae, cuatro a Boidae, tres a Elapidae, dos a Viperidae, dos a Leptotyphlopidae y una a familia Anomalepididae. Se encontraron cuatro especies de lagartijas de la familia Teiidae, mientras que de las familias Alligatoridae, Amphisbaenidae, Gekkonidae y Dactyloidea se encontraron tres especies de cada una. Se encontraron dos especies en cada una de las familias Sphaerodactylidae y Gymnophthalmidae y de las familias restantes (Chelidae, Iguanidae, Polychrotidae, Scincidae y Testudinidae) se encontró una especie de cada una (Figura 7). Además, se obtuvieron tres nuevos registros de serpientes (*Dipsas pavonia*, *Micrurus filifomis*, *Thamnodynastes*

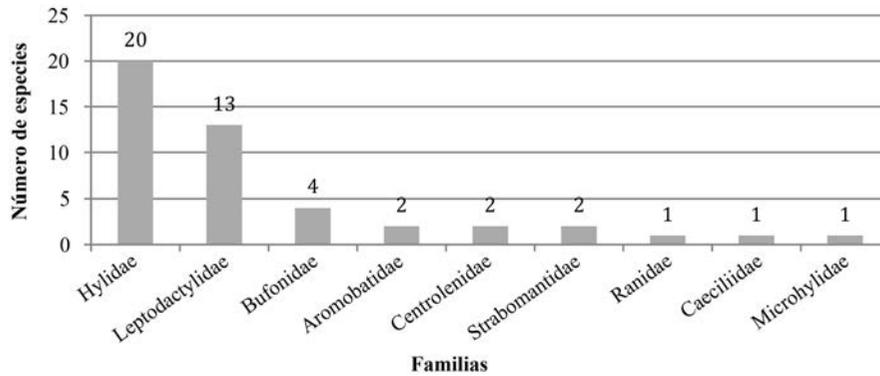


Figura 6. Número total de especies de anfibios por familia registradas para el departamento de Casanare, Colombia

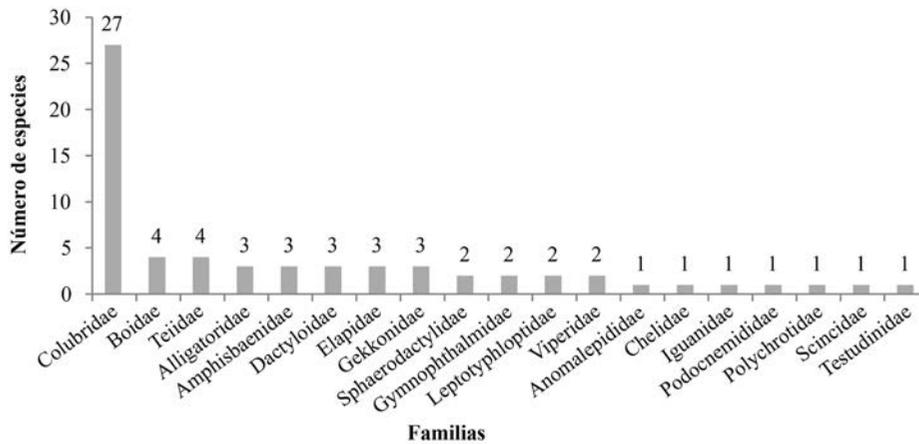


Figura 7. Número total de especies de reptiles por familia registradas para el departamento de Casanare

*dixonii*), un nuevo registro de salamanquejas (*Hemidactylus palaichthus*) y posiblemente dos nuevas especies en el departamento: una serpiente del género *Drymarchon* y una anfibena del género *Amphisbaena*.

**Representatividad de los registros de la herpeto fauna de Casanare por municipio**

El departamento de Casanare tiene 19 municipios, en tres de los cuales no hay ningún registro de anfibios o de reptiles (Sácama, Támara y Recetor). En los municipios de Chámeza, Maní y Monterrey no se tienen registros de anfibios, mientras que en Hato Corozal, Pore, Sabanalarga y Villanueva no se tienen registros de reptiles. Los municipios con mejor representatividad son Aguazul, San Luis de Palenque, Trinidad y Paz de Ariporo (Figura 8).

**Distribución geográfica de las especies de anfibios en Casanare**

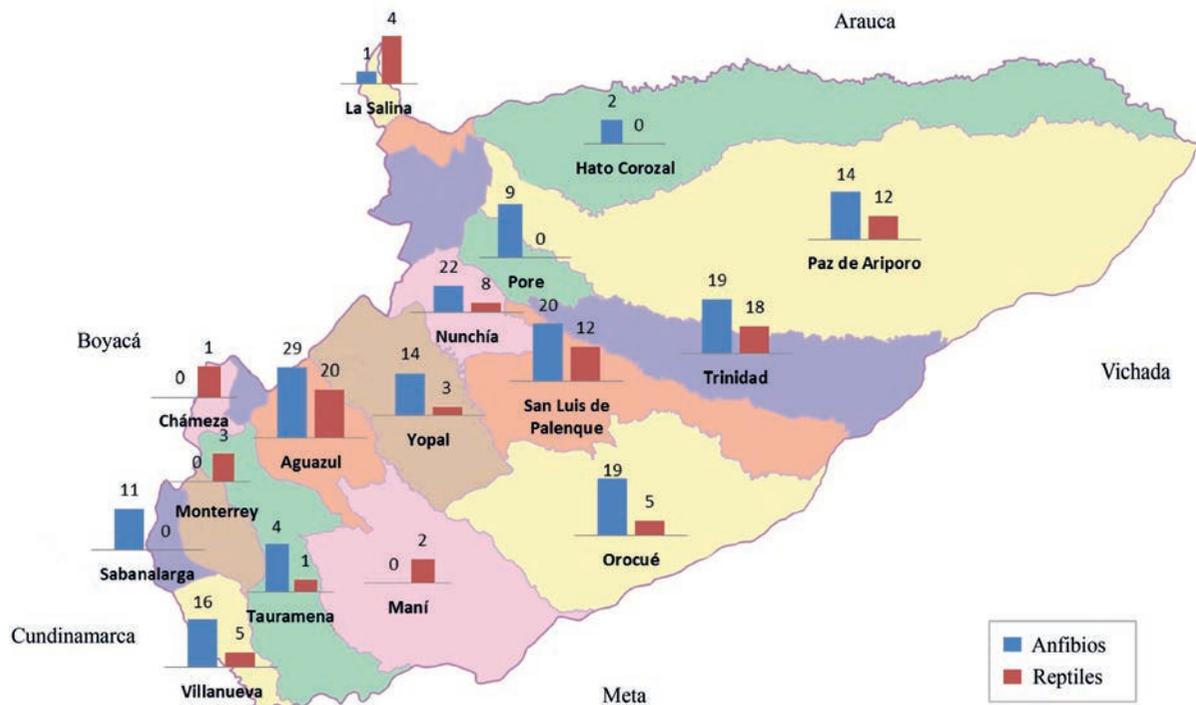
De las especies de anfibios registradas para el departamento de Casanare, solo 32 tienen poblaciones cisandinas. Estas especies se pueden agrupar en tres grupos (Anexo 1): el primero (A), compuesto por 17 especies comunes en piedemonte; el segundo (B), compuesto por once especies comunes en áreas abiertas como los llanos en temporada seca, de lluvias o en ambas, y el tercero (C), compuesto por cuatro especies que habitan comúnmente en los bosques de galería de los Llanos Orientales.

**Discusión**

**Diversidad de anfibios y reptiles de Casanare**

Con los resultados obtenidos durante la salida de campo en los municipios de Aguazul, Paz de Ariporo y San Luis de Palenque, se lograron seis nuevos registros de anfibios (*Hyalinobatrachium munozorum*, *Leptodactylus* sp., *Leptodactylus* sp.1, *Osteocephalus carri*, *Rulyrana flavopunctata* y *Scinax* sp.). Los registros de *Hypsiboas geographicus* y *Osteocephalus carri* son los reportados más al norte de Colombia, pues **Cochran & Goin (1970)** reportaron la primera de estas especies en la localidad de Guaicaramo al sur de Casanare, en límites con el departamento de Meta, y **Lynch (2006)** reportó la segunda especie en el municipio de Restrepo, Meta. Es igualmente importante resaltar el registro de *Hypsiboas geographicus*, pues esta especie es común en los bosques de la Amazonía. En el caso de los reptiles, se encontraron nuevos registros de seis especies en el departamento (*Ameiva preasignis*, *Amphisbaena fuliginosa*, *Amphisbaena* sp., *Drymarchon* sp., *Hemidactylus palaichthus* y *Lepidoblepharis* sp.).

Los bajos porcentajes de representatividad obtenidos en los muestreos hechos en las localidades del piedemonte, comparados con los de las localidades de los llanos, eran de esperarse debido al corto tiempo disponible para los muestreos en esas localidades, lo cual ocasionó que muchos hábitats y



**Figura 8.** Mapa del departamento de Casanare en donde se muestra el número de especies de anfibios y reptiles registradas por cada municipio (adaptado de Sistema de Información Geográfica Agustín Codazzi, 2012)

microhábitats quedaran excluidos de las búsquedas o fueran muestreados parcialmente. Los hallazgos de especies no registradas antes en Casanare (*R. flavopunctata* y *O. carri*), en una zona tan estudiada como lo es el piedemonte, hace suponer que se subestimó el número de especies de anfibios esperado (20 a 19) según el cálculo con los estimadores seleccionados.

El hecho de que ninguna de las especies de anfibios registrada como abundante en la localidad de Aguazul haya sido encontrada en las otras dos localidades no constituye una sorpresa, ya que las condiciones ecológicas de esta localidad son bastante diferentes a las de las otras dos. Aguazul está compuesta por bosques, lo que brinda condiciones de humedad y temperatura distintas a las de las otras dos localidades. Por otra parte, la coincidencia de especies en las localidades de Paz de Ariporo y San Luis de Palenque era de esperarse. En estas dos localidades la cobertura natural predominante es la de sabana, preferida especialmente por *P. llanera* y *L. fuscus*, cuyo modo reproductivo está adaptado a ambientes adversos para los anfibios (Heyer, 1969), como los que ofrece la sabana natural.

#### **Representatividad de la herpetofauna de Casanare a nivel nacional y local**

Los resultados obtenidos en el trabajo de campo son complementarios de los registros obtenidos en las colecciones científicas visitadas. Al comparar el grado de representatividad de las especies encontradas en el departamento de Casanare respecto a lo registrado en toda la cuenca del Orinoco por Acosta-Galvis, *et al.*, (2010), se encontró que Casanare alberga aproximadamente el 18% de todas las especies de anfibios registradas hasta el momento, y 22 % de los reptiles.

Los resultados aquí obtenidos concuerdan en un 75,5 % con la riqueza de anfibios reportada por Acosta-Galvis y Alfaro-Bejarano (2011) y en un 63,1 % con la riqueza de reptiles reportada por Alfaro, *et al.*, (2011) para el departamento. En estos trabajos hay algunos registros dudosos como el de *Hypsiboaspugnax* (Acosta-Galvis y Alfaro-Bejarano, 2011) y las serpientes *Thamnodynastes pallidus* y *Bothrops asper* (Alfaro, *et al.*, 2011). Estos registros no pudieron revisarse debido a que en los estudios citados no se reportaron las colecciones en las cuales residen los ejemplares para así comprobar su identidad taxonómica. Por este mismo motivo, el 24,5 % de los anfibios reportados por Acosta-Galvis y Alfaro-Bejarano (2011) y el 36,9 % de los reptiles reportados por Alfaro, *et al.*, (2011) no se incluyeron en este estudio.

A diferencia de lo que ha ocurrido en el piedemonte, en donde se han centrado los estudios herpetológicos en Casanare y en toda la cuenca del Orinoco, como lo han señalado Acosta-Galvis, *et al.*, (2010), el desconocimiento generalizado de las

llanuras de la Orinoquía y, específicamente de zonas como el sur de los municipios de Yopal y Tauramena, el occidente de los municipios de Orocué y San Luis de Palenque (mejor conocido en su parte oriental), el norte del municipio de La Salina y prácticamente toda la extensión del municipio de Paz de Ariporo, dificulta la caracterización de la fauna anfibia y de reptiles de las sabanas naturales de Casanare.

La falta de estudios en estas áreas se deben, fundamentalmente, al desarrollo económico, a intereses taxonómicos y biológicos particulares de grupos de trabajo y a la accesibilidad a las diferentes subregiones de la cuenca del Orinoco (Acosta-Galvis, *et al.*, 2010). En el caso de Casanare, esto se debe, principalmente, a la dificultad del acceso a las áreas no exploradas del oriente de los municipios de Hato Corozal y Paz de Ariporo.

#### **Análisis de la distribución de los anfibios de Casanare**

El único patrón de distribución detectado corresponde a aquellos anfibios restringidos en los bosques de piedemonte (grupo A) y esto es porque las especies de este grupo se caracterizan por habitar bosques de dosel cerrado, donde la temperatura es estable y la humedad es alta, lo cual permite la subsistencia de ciertas especies que necesitan este tipo de hábitat. Por este motivo es posible identificar especies características del flanco oriental de la Cordillera Oriental, tales como *Allobates cepedai*, *Allobates* sp., *Hyalinobatrachium munozorum*, *Hyloscirtus bogotensis*, *Rulyrana flavopunctata*, *Rhaebo glaberrimus*, *Pristimantis carrangerorum*, *P. medemi* y *O. carri*, y especies cuya distribución incluye los bosques húmedos de la selva amazónica como lo son *Dendropsophus minutus*, *Hypsiboas geographicus*, *H. lanciformis*, *Hypsiboas punctatus*, *Leptodactylus hylaedactylus*, *Leptodactylus mystaceus*, *Lithobates palmipes* y *Rhinella acuminata*. La composición taxonómica del piedemonte es, como la definen Lynch, *et al.*, (1997) un ecotono entre los llanos del Orinoco y las selvas de la Amazonía.

Aunque no hay una clara delimitación geográfica de la fauna anfibia llanera, esta se puede definir con base en las especies comunes de áreas abiertas (grupo B) como son *Dendropsophus mathiassoni*, *Elachistocleis ovalis*, *Phyllaxemus fischeri*, *Pseudopaludicola boliviana*, *P. llanera*, *Scinax blairi*, *Scinax kennedyi*, *S. wandae*, *Leptodactylus* sp. y *L. macrosternum*), que se caracterizan por habitar las sabanas naturales donde la temperatura es variable y la humedad es baja.

El último grupo (C) está compuesto por especies que habitan bosques de galería (*Siphonops annulatus*, *Osteocephalus taurinus* y *Leptodactylus lineatus*) y por esto su distribución se extiende más allá de los bosques del piedemonte y los bosques húmedos de la selva amazónica, hasta los bosques de galería en las sabanas naturales.

El conocimiento limitado de la composición y distribución de la herpeto fauna de los municipios que se encuentran en las llanuras constituye un obstáculo para definir la zona de los Llanos Orientales a partir de la composición de las especies de anfibios y reptiles que en ella habitan. Esta dificultad posiblemente se deba a los cambios que han tenido los paisajes naturales de Casanare, que han transformando los bosques nativos del piedemonte en áreas abiertas parecidas a las sabanas, creando, así, las condiciones propicias para el avance de especies “llaneras” hasta el piedemonte. A estos efectos antropogénicos se suma la falta de estudios de herpetofauna en el área de los llanos, cuya situación contrasta con la del piedemonte. Si existe un patrón de distribución de anfibios definido para los llanos, probablemente sea necesario aumentar la escala de los estudios, involucrando el resto de los departamentos que hacen parte de la región de los Llanos Orientales.

Sería de esperar que dada la intensa actividad de explotación de hidrocarburos, sobre todo al sur del departamento (**Agencia Nacional de Hidrocarburos**, 2013), el desconocimiento sobre estos temas en esta parte del país fuera menor, aunque no son estudios lo que hace falta, sino la divulgación del conocimiento y de los inventarios ya levantados en estas regiones del país.

Como se demostró anteriormente, queda mucho trabajo por hacer para acrecentar el conocimiento de la diversidad real de la herpetofauna de Casanare y aun mucho más para lograr un mejor conocimiento de la distribución de los anfibios. En el caso de los reptiles, el panorama de los estudios sobre su distribución es incluso más oscuro, ya que dicha distribución está muy lejos de conocerse.

## Conclusiones

Debido al relieve de Casanare, con el terreno montañoso de los Andes al occidente y las llanuras al oriente, que constituyen dos unidades eco-geográficas diferentes, la fauna de anfibios y reptiles del departamento es bastante representativa. Por ello, considerando las amplias zonas desconocidas que se identificaron en este estudio, y la predicción obtenida mediante los estimadores de diversidad, se espera que el número de especies en ambos grupos aumente, así como el de los estudios que permitan una mejor aproximación al conocimiento de la diversidad real de Casanare.

Igualmente, se concluyó que la definición de una herpetofauna típicamente llanera es aún difícil de determinar, pues esta generalización debe realizarse a partir de datos que confirmen la existencia de una fauna exclusiva de los Llanos Orientales, lo cual, de momento, no es posible.

A pesar de que el esfuerzo desplegado por el equipo de este estudio se concentró en la zona de los llanos con la intención de lograr una mejor comprensión de su fauna de anfibios y

reptiles, quedó claro que debido a su gran extensión y a otras dificultades implícitas en la investigación, es necesario un mayor esfuerzo de muestreo, particularmente para el grupo de los reptiles.

Por último, es necesario llevar a cabo más investigaciones a todo nivel para realimentar los resultados aquí obtenidos, ya que el presente trabajo seguramente está incompleto dada la diversidad esperada para el área de estudio. Sin embargo, este es un punto de partida para generar mayor conocimiento en torno al tema, en beneficio tanto del ecosistema como de los asentamientos humanos presentes en el área de estudio.

## Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia, sede Orinoquía, al comité evaluador y organizador de la convocatoria de investigación 2012-II para financiar pasantías y trabajos de grado en pregrado o posgrado en temáticas relacionadas con la Orinoquía, y a la fundación Yoluka por la financiación parcial del proyecto. A los curadores y encargados de las colecciones biológicas de anfibios y reptiles de Colombia, en especial a Andrew Crawford, Museo de Historia Natural, Universidad de los Andes; a Claudia Múnera Roldán, Instituto Alexander von Humboldt; a John D. Lynch y Martha Calderón, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia; a José Espitia Barrera, Museo La Salle, Universidad de La Salle y a Julio Mario Hoyos, Museo de Historia Natural, Pontificia Universidad Javeriana, por permitirnos el acceso a los especímenes, y a M. Harvey y R. Caicedo-Portilla por su apoyo en la identificación de especies en grupos de gran complejidad taxonómica. De igual forma, agradecemos muy afectuosamente a los llaneros de los municipios de Aguazul, Paz de Ariporo, Trinidad y San Luis de Palenque, en especial a Ramón Gómez, Juan Carlos Gómez (Chigüi), Esperanza Parales, Abel Antonio Reyes, Andrea, Ana y Cesar Mora, Nilson Gualdrón, Renzo Amaya, Manuel y Marixa Barragán, Esaú Gualdrón, Polo Sandoval, Marina Cruz y Jhon Fredy Fuentes, quienes apoyaron nuestro trabajo en campo. Por último, deseamos agradecer a Pablo Andrés Peña Manrique, Felipe Andrés Aponte y Alejandro Montes por brindarnos su apoyo en la logística durante las salidas de campo.

## Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

## Bibliografía

- Acosta-Galvis, A. R.** 2000. Ranas, Salamandras y Caecilias (Tetrapoda: Amphibia) de Colombia. *Biota Colombiana*. **1** (3):289-319.
- Acosta-Galvis, A. R., Señaris J. C., Rojas-Runjaic F., Riaño-Pinzón D. R.** 2010. Anfibios y reptiles, pp. 258-289. En Lasso, C. A., J. S. Usma, F. Trujillo, Rial A. Biodiversidad de la cuenca del Orinoco: bases científicas para la

identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, WWF Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Salle e Instituto de Estudios de la Orinoquia (Universidad Nacional de Colombia), Bogotá D. C., Colombia.

- Acosta-Galvis, A. R., Alfaro-Bejarano J. P.** 2011. Anfibios del Casanare, pp. 139-151. En Usma, J. S., F. Trujillo, Biodiversidad del Casanare: ecosistemas estratégicos del departamento, Gobernación de Casanare-WWF Colombia, Bogotá D.C.
- Alfaro, J. P., Acosta-Galvis A. R., Vejarano M.** 2011. Reptiles del Casanare, pp. 152-167. En Usma, J. S., Trujillo F. Biodiversidad del Casanare: ecosistemas estratégicos del departamento, Gobernación de Casanare-WWF Colombia, Bogotá D.C.
- Amaral, A. D.** 1931. Studies of neotropical ophidia XXIII. Additional notes on Colombian snakes XXVI. Ophidia of Colombia. Bulletin of the Antivenin Institute of America. 4 (4):85-94.
- Ayala, S. C.** 1986. Saurios de Colombia: lista actualizada y distribución de ejemplares colombianos en los museos. Caldasia. 15: 71-75.
- Caicedo-Portilla, R., Dulcey-Cala C. J.** 2011. Distribución del gecko introducido *Hemidactylus frenatus* (Dumeril y Bribon 1836) (Squamata: Gekkonidae) en Colombia. Biota Colombiana. 12 (2 - Especial Simposio Especies Invasoras):45-65.
- Campbell, J. A., Lamar W. W.** 2004. The venomous reptiles of the western hemisphere. Comstock Publishing Associates. New York.
- Cochran, D. M., Goin C. J.** 1970. Frogs of Colombia. Smithsonian institution Press. Washington.
- Cortés, J., Sánchez P.** 2011. Mamíferos, reptiles y ecosistemas del bloque Cubiro (Casanare): educación ambiental para la conservación. Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia. Alange Energy Corp. Bogotá.
- Faivovich, J., Haddad C. F. B., García P. C. A., Frost D. R., Campbell J. A., Wheeler W. C.** 2005. Systematic review of the frog family Hylidae, with special reference to Hylinae : Phylogenetic analysis and taxonomic revision. Bulletin of the American Museum of Natural History. 294 1-240.
- Frost, D. R., Grant T., Faivovich J., Bain R. H., Haas A., Haddad C. F. B., De Sa R. O., Channing A., Wilkinson M., Donnellan S. C., Raxworthy C. J., Campbell J. A., Blotto B. L., Moler P., Drewes R. C., Nussbaum R. A., Lynch J. D., Green D. M. & Wheeler W. C.** 2006. The amphibian tree of life. Bulletin of the American Museum of Natural History. 297 1-370.
- Grant, T., Frost D. R., Caldwell J. P., Gagliardo R., Haddad C. F. B., Kok P. J. R., Means D. B., Noonan B. P., Schargel W. E., Wheeler W. C.** 2006. Phylogenetic systematics of dart-poison frogs and their relatives (Amphibia, Athesphatanura, Dendrobatidae). Bulletin of the American Museum of Natural History. 299 1-262.
- Harvey, M. B., Ugueto G. N., Gutberlet J.** 2012. Review of teiid morphology with a revised taxonomy and phylogeny of the Teiidae (Lepidosauria: Squamata). Zootaxa. 3459 1-156.
- Hedges, S. B., Duellman W. E., Heinicke M. P.** 2008. New World direct-developing frogs (Anura: Terrarana): Molecular phylogeny, classification, biogeography, and conservation. Zootaxa. 1737 1-182.
- Heyer, W. R.** 1969. The adaptive ecology of the species groups of the genus *Leptodactylus* (Amphibia, Leptodactylidae). Evolution. 23 (3):421-428.
- Lehr, E.** 2002. Amphibien und Reptilien in Peru: die Herpetofauna entlang des 10. Breitengrades von Peru: Arterfassung, Taxonomie, ökologische Bemerkungen und biogeographische Beziehungen. Natur und Tierverlag. Münster, Germany.
- Ludwing, J. A., Reynolds J. F.** 1988. Statistical Ecology (A Primer on Methods and Computing). Wiley Interscience Publication. USA.
- Lynch, J. D., Ruiz-Carranza P. M., Ardila-Robayo M. C.** 1997. Biogeographic patterns of Colombian frogs and toads. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 21 (80):237-248.
- Lynch, J. D.** 2006. The amphibian fauna in the Villavicencio region of eastern Colombia. Caldasia. 28(1):135-155.
- Medem, F.** 1965. Bibliografía comentada de reptiles de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 12(47):299-346.
- Medem, F.** 1981. Los Cocrodylia de Suramérica. Los Cocrodylia de Colombia. Fondo colombiano de investigaciones científicas y proyectos especiales "Francisco José de Caldas" COLCIENCIAS. Bogotá, Colombia.
- Peñuela Recio, L., Castro Lima F., Ocampo-Peñuela N.** 2011. Las reservas naturales del nodo Orinoquia en su rol de conservación de la biodiversidad. Fundación Horizonte Verde y Resnatur. Colombia.
- Poe, S.** 2013. 1986 Redux: New genera of anoles (Squamata: Dactyloidae) are unwarranted. Zootaxa. 3626(2):295-299.
- Pyron, R. A., Burbrink F. T., Colli G. R., de Oca A. N. M., Vitt L. J., Kuczynski C. A., Wiens J. J.** 2011. The phylogeny of advanced snakes (Colubroidea), with discovery of a new subfamily and comparison of support methods for likelihood trees. Molecular Phylogenetics and Evolution. 58(2):329-342.
- Rueda-Almonacid, J. V., Carr L. L., Mittermeier R. A., Rodríguez-Mahecha J. V., Mast R. B., Vogt R. C., Rhodin A. G. J., Ossa-Velásquez J., Rueda J. N., Mittermeier G.** 2007. Las tortugas y los cocodrilianos de los países andinos del trópico. Serie de guías tropicales de campo N° 6. Conservación Internacional, Editorial Panamericana, Formas e Impresos. Bogotá, Colombia.

**Rueda, J. V., Castro F., Cortéz C.** 2006. Técnicas para el inventario y muestreo de anfibios: una Compilación. 135-172, En **Angulo, A., J. V. Rueda-Almonacid, J. V. Rodríguez-Maecha, E. La Marca.** Técnicas de inventario y monitoreo para los anfibios de la región tropical andina, Conservación Internacional. Serie Manuales de Campo N° 2, Panamericana Formas e Impresos S.A., Bogotá, Colombia.

**Ruiz-Carranza, P. M., Ardila-Robayo M. C., Lynch J. D.** 1996. Lista actualizada de la fauna Amphibia de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. **20(77):**365-415.

**Sánchez-C, Castaño-Mora O. V., Cárdenas, A. G.** 1987. Diversidad de los reptiles en Colombia. 277-325, En **Rangel-Ch, J. O.** Colombia Diversidad Biótica I, Instituto de Ciencias Naturales. Editorial Guadalupe, Bogotá, Colombia.

**Wüster, W., Yrausquin J. L., Mijares-Urrutia.** 2001. A new species of indigo snake from North-Western Venezuela (Serpentes: *Colubridae: Drymarchon*). Herpetological Journal. **11** 157-165.

## Anexos

**Anexo 1.** Lista de especies de anfibios con registro para el departamento de Casanare, Colombia. Las especies en negrita fueron identificadas como cisandinas.

\* Grupo A, †Grupo B, \*Grupo C

MLS: Museo de La Salle; MUJ: Museo de Historia Natural de la Pontificia Universidad Javeriana; ANDES: Museo de Historia Natural ANDES; IAvH: Instituto Alexander von Humboldt; ICN: Instituto de Ciencias Naturales

### AROMOBATIDAE

*Allobates cepedai*\* NUNCHÍA, vereda Vega del Tacare, finca La Esperanza, vega del río Tocaria 5°35'8,90" N, 72°12'29,20" O (IAvH 6371); AGUAZUL, Inspección de policía de Unete, quebrada Cachiza, finca Buenos Aires 5°11'59,90" N, 72°34'59,95" O (MLS 1659-64, 1867-8, 1870); YOPAL, quebrada el infierno (MLS 1063). *Allobates* sp.\*AGUAZUL, finca Guarataro (ICN-RPB 233, 236).

### BUFONIDAE

*Rhaebo glaberrimus*\* AGUAZUL, vereda Cupiagua, quebrada Aguaimara sobre la carretera de Aguazul vía Pajarito 5°10,082' N, 72°38,190' O (ICN-TAS 826, 834-37, 849, 859-60); NUNCHÍA, vereda Vega del Tacare, finca La Esperanza, vega del río Tocaria 5°35'8,90" N, 72°12'29,20" O (IAvH 6710). *Rhinella cf. acuminata*\* AGUAZUL, vereda El Triunfo (MLS 1820-25, 1834-43, 1871), vereda Cunama, finca La Alborada 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1891), vereda Cupiagua, quebrada Aguaimara (ICN-TAS 861-62), vereda Manoguia, finca Veracruz 5°10,082' N, 72°38,190' O (ICN-TAS 814, 863, 874-76); NUNCHÍA (IAvH 7754). *Rhinella humboldti* AGUAZUL, vereda El Salitre, finca Brisas del Llano 5°9,37' N, 72°34,5' O (MUJ 4515-19, 4689-92), finca Guarataro (ICN-RP 235); Morichal (IAvH 7740-41); NUNCHÍA, vereda Piedecuesta, finca Las Canarias (IAvH 6711), (IAvH 7742-46); OROCUÉ, finca La Argentina, bosque de galería del brazo del caño San Miguel (ICN 44607-10), vereda Macucua, hatu El Yopal, Casa del Río Meta 4°57' N, 71°03' O (MUJ

5004-16), casco urbano 4°57' N, 71°03' O (MUJ 8815), vereda La Esmeralda, finca agroturística Guarataro (MUJ 8886); PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, finca El Porvenir, 6°2'36,5" N, 71°5'34,2" O (ICN-TAS 754, 758-61); PORE, vereda Matalarga (ICN-RPB 198); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, Colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 459, 527), vereda Guaracura, finca Altamira 5°11'9,77" N, 70°58'53,9" O (ICN-TAS 532), vereda Guaracura (ICN-TAS 554, 556); TRINIDAD, vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" N (ICN-TAS 253-55, 306), vereda La Cañada, finca La Palmita 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 324-27), 5°26'9,1" N, 71°35'46,8" O (ICN-TAS 368-70), 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 621), 5°26'9,1" N, 71°35'46,8" O (ICN-TAS 640); VILLANUEVA, vereda Lecheniel, hacienda Palmas del Casanare 4°57' N, 73°94' O (MUJ 8241-43, 8649-53), Palmera del Oriente (ICN-JDL 30137). *Rhinella marina* AGUAZUL, vereda El Salitre, finca Brisas del Llano 5°9,37' N, 72°34,5' O (MUJ 4683, 4684-85, 6205); NUNCHÍA, vereda Piedecuesta, finca Las Canarias (IAvH 6712); OROCUÉ, vereda Macucua, hatu El Yopal, Casa del Río Meta 4°57' N, 71°03' O (MUJ 5400-03), (MUJ 8843-49), casco urbano (MUJ 8850-56, 8931), vereda La Esmeralda, finca agroturística Guarataro (MUJ 8857-58); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, Colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 457), vereda Guaracura (ICN-TAS 469), Morichal (IAvH 6658).

### CAECILIIDAE

*Siphonops annulatus*\* VILLANUEVA, vereda El Encanto, finca Río Grande (ICN-JDL 30179-83)

### CENTROLENIDAE

*Rulyrana flavopunctata*\* AGUAZUL, vereda Cupiagua, quebrada Hoyo Caliente 5°14,026' N, 72°40,298' O (ICN-TAS 878-880).

### HYLIDAE

*Dendropsophus mathiassoni*† AGUAZUL (IAvH 7637-38),

finca Grismania (ICN-RPB 221-24), vereda Cupiagua, finca de Antonio Munévar (MLS 1786-91), vereda El Salitre, finca Brisas del Llano 5°9,37' N, 72°34,5' O (MUJ 3787-88, 3790-91, 4561, 4564-65, 4723-32, 6206-07, 6210-24); Morichal (IAvH 7634-36), NUNCHÍA, vereda Vega del Tacare, finca La Esperanza, vega del río Tocaria 5°35'8,90" N, 72°12'29,20" O (IAvH 6717-21); OROCUÉ (MUJ 8946-49), desviación a los módulos desde la carretera (ICN 44621-25), pozo Tambaqui 1, 17,5 Km en línea recta desde OROCUÉ (ICN 44616-20), reserva Wisirare, municipio Orucué (ANDES-A 1144); PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, entre finca El Porvenir y El Baile (ICN-TAS 791-93); PORE, vereda Matalarga 05° 27' 34" N, 071° 41' 46" O (ICN-RPB 191-93); SAN LUIS DE PALENQUE (ICN 2639-43), vereda Guaracura 5°11'9,77" N, 70°58'53,9" O (ICN-TAS 467, 470-76, 553), vereda Guaracura, Colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 204), vereda Guaracura, finca Altamira 5°11'9,77" N, 70°58'53,9" O (ICN-TAS 536); Trinidad, vereda La Cañada, finca La Palmita 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 606, 625-28, 652), vereda San Vicente, Caño Osorio 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (ICN-TAS 257), vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (TAS 598-99); VILLANUEVA, vereda Lecheniel, hacienda Palmas del Casanare 4°57' N, 73°94' O (MUJ 8659-62), Palmeras de Oriente (ICN-JDL 30127, 30169, 30170); YOPAL, vereda El Milagro, entre Morichal y Tilodirán, finca de Julio Salcedo 5° 11' 34" N, 72° 18' 43" O (ICN-JDL 22867). *Dendropsophus minutus*\* AGUAZUL, Cupiagua 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1899-04), vereda Cupiagua, finca de Antonio Munévar (MLS 1798, 1808), vereda Cunama, finca La Alborada 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1878-81), vereda El Salitre, finca Brisas del Llano 5°9,37' N, 72°34,5' O (MUJ 4548-51, 4572, 4733-37), vereda El Triunfo 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1809-13, 1848-52, 1915-22); NUNCHÍA (IAvH 7768), vereda Piedecuesta, finca Las Canarias (IAvH 6724-28), vereda Vega del Tacare, finca La Esperanza, vega del río Tocaria 5°35'8,90" N, 72°12'29,20" O (IAvH 6722-23). *Hypsiboas boans* AGUAZUL, vereda Unete, quebrada La Vegana (ICN 36384), vereda Cunama, finca La Alborada 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1888), vereda Cupiagua, quebrada Aguaimara sobre la carretera de Aguazul vía Pajarito (ICN-TAS 829), vereda Manoguía, finca Veracruz (ICN-TAS 867, 869, 870-72); 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 763). *Hypsiboas crepitans* AGUAZUL, finca Grismania (ICN-RPB 218), finca Guarataro, (ICN-RPB 228), vereda El Salitre, finca Brisas del Llano 5°9,37' N, 72°34,5' O (MUJ 3783-86, 4539-40, 4566, 4700-05, 5122-26, 5159, 6194-01); vereda El Triunfo 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1814-19, 1844-47, 1912-14); NUNCHÍA, Hato Venecia (IAvH 4917), vereda Vega del Tacare, finca La Esperanza, vega del río Tocaria 5°35'8,90" N, 72°12'29,20" O (IAvH 6714); OROCUÉ (MUJ 8944), casco

urbano, centro turístico vacacional Daingo (ICN 44611-15), Reserva Wisirare, municipio de Orucué (ANDES-A-AJC 2321), vereda El Triunfo 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1321-23), vereda Macucuana, hatu El Yopal, Casa del Río Meta (MUJ 5056-58), PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, finca El Porvenir 6°2'36,5" N, 71°5'34,2" O (ICN-TAS 756, 766-70), vereda La Colombina, entre finca El Porvenir y El Baile (ICN-TAS 787-90); PORE, vereda Matalarga (ICN-RPB 183-194); SABANALARGA (ANDES-A 1063); SAN LUIS DE PALENQUE (ICN 2638); vereda Guaracura (ICN-TAS 465-66, 477); vereda Guaracura, Colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 169, 205, 439, 443, 444-47, 551), vereda La Lucha 5°23'15,0" N, 71°37'16,9" O (ICN-TAS 421-22); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca El Mirador 5°26'9,1" N, 71°35'46,8" O (ICN-TAS 371, 642), vereda La Cañada, finca La Palmita 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 613, 622, 653), vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (ICN-TAS 258, 282, 313, 564, 580); VILLANUEVA 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1456), Palmera del Oriente (ICN-JDL 30125, 30128-30, 30138, 30155-56, 30174), vereda Lecheniel, hacienda Palmas del Casanare 4°57' N, 73°94' O (MUJ 8238-40); YOPAL, vereda El Milagro, entre Morichal y Tilodirán, finca de Julio Salcedo 5° 11' 34" N, 72°18'43" O (ICN-JDL 22866); Morichal (IAvH 6659-61). *Hypsiboas geographicus*\* AGUAZUL, vereda Manoguía, finca Veracruz 5°10,082' N, 72°38,190' O (ICN-TAS 821, 865). *Hypsiboas lanciformis*\* AGUAZUL, vereda Cupiagua, La Palmicha 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1658, 1905), vereda Cupiagua, quebrada Aguaimara (ICN-TAS 848, 851-52), vereda El Salitre, finca Brisas del Llano 5°9,37' N, 72°34,5' O (4536-38); NUNCHÍA, vereda Vega del Tacare, finca La Esperanza, vega del río Tocaria 5°35'8,90" N, 72°12'29,20" O (IAvH 6715-16); SABANALARGA (ANDES-A-AJC 3971, 3975). *Hypsiboas punctatus*\* (ICN-TAS 892); AGUAZUL, Cupiagua 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1896-98), finca Grismania (ICN-RPB 214, 216-20), quebrada Costa Grande a 100 m del retén (ICN 9548-51), vereda Cupiagua, finca de de Antonio Munévar 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1797), vereda Cunama, finca La Alborada 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1873-76), vereda Cupiagua, quebrada Aguaimara (ICN-TAS 850, 853-854), vereda Cupiagua, quebrada Aguaimara sobre la carretera de AGUAZUL vía Pajarito 5°10,082' N, 72°38,190' O (ICN-TAS 823), vereda El Salitre, finca Brisas del Llano 5°9,37' N, 72°34,5' O (MUJ 3792-93, 4456-57, 4706-12, 4752, 5145, 48, 6225-29), vereda El Triunfo 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1853-54, 1911), vereda Manoguía, finca Veracruz 5°10,082' N, 72°38,190' O (ICN-TAS 877); SABANALARGA (ANDES-A 1042-44, 1049, ANDES-A-AJC 4100); VILLANUEVA, vereda Lecheniel, hacienda Palmas del Casanare 4°57' N, 73°94' O (MUJ 8246) Palmas de Oriente (ICN-JDL 30173). *Hyloscirtus bogotensis*\* LA SALINA, El Arenal, quebrada ca.

Km 108 Socha, La Punta (ICN 5811, 5853). *Osteocephalus carri*\* AGUAZUL, vereda Cupiagua, quebrada Hoyo Caliente 5°14,026' N, 72°40,298' O (ICN-TAS 881-82, 890). *Osteocephalus taurinus*\* OROCUÉ, vereda La Esmeralda, finca agroturística Guarataro (MUJ 8814). *Phyllomedusa hypochondrialis*† AGUAZUL, vereda El Salitre, finca Brisas del Llano 5°9,37' N, 72°34,5' O (MUJ 4520-33, 4693-77, 6203-04), vereda El Triunfo (MLS 1805); Morichal (IAvH 7735-38); NUNCHÍA (IAvH 7732-34), vereda Vega del Tacare, finca La Esperanza, vega del río Tocaria (IAVH 7017); OROCUÉ, casco urbano, centro turístico vacacional Daingo (ICN 44647-48); PORE, vereda Matalarga (ICN-RPB 202-10); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, Colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 430-31, 559-62); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca La Palmita 5°19'11,4" N, 71°20'51" N (ICN-TAS 612, 619); VILLANUEVA, Palmera Santana (ICN-JDL 30115-16), Palmera del Oriente (ICN-JDL 30331); YOPAL, vereda El Milagro, entre Morichal y Tilodirán, finca de Julio Salcedo 5° 11' 34" N, 72°18'43" O (ICN-JDL 22668-69). *Pseudisparadoxa* AGUAZUL, finca Grismania (ICN-RPB 227), Morichal (IAvH 7767, 7774-78); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura (ICN-TAS 478), vereda Guaracura, finca Altamira 5°11'9,77" N, 70°58'53,9" O (ICN-TAS 513, 516-23); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca La Palmita 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 611, 617, 629, 641); YOPAL, vereda El Milagro, entre Morichal y Tilodirán, finca de Julio Salcedo (ICN-JDL 22870-71). *Scinax blairi*† OROCUÉ, Reserva Wisirare (ANDES-A-AJC 2312); SABANALARGA (ANDES-A 1067, 1071-72, ANDES-A-AJC 4120), en charco artificial, SABANALARGA (AJC 1068). TRINIDAD, vereda La Cañada, finca La Palmita 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 162, 616). *Scinax kennedyi*† (ANDES-A 1060), OROCUÉ, pozo Tambaquí y morichal aledaño (ICN 44626-35); SABANALARGA (ANDES-A 1051, 1058, 1061-62, 1066, 1084, ANDES-A-AJC 4058). *Scinax rostratus* AGUAZUL, vereda Cupiagua, finca de Antonio Munévar (MLS 1792-96), vereda El Salitre, finca Brisas del Llano 5°9,37' N, 72°34,5' O (MUJ 4541, 4751); Morichal (IAvH 7726-27); NUNCHÍA (IAvH 7725), vereda Piedecuesta, finca Las Canarias (IAvH 7009-11); OROCUÉ (MLS 1322), vereda Macucua, hatto El Yopal, Casa del Río Meta 4°57' N, 71°03' O (MUJ 5052-55, 5061), casco urbano (MUJ 8817); PORE, vereda Matalarga (ICN-RPB 184-90); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Bocas del Ulere, finca Altamira 5°11'9,77" N, 70°58'53,9" O (ICN-TAS 237, 240), vereda Guaracura, Colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 224), SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, finca Altamira 5°11'9,77" N, 70°58'53,9" O (ICN-TAS 511-12, 534-35); TRINIDAD, vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (ICN-TAS 341), vereda La Cañada, finca El Mirador 5°26'9,1" N, 71°35'46,8" O (ICN-TAS 427), vereda La Cañada, finca La Palmita 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 625);

VILLANUEVA, casco urbano (ICN-JDL 30132). *Scinaxruber* AGUAZUL, vereda Cunama (MLS 1882), vereda El Salitre, finca Brisas del Llano 5°9,37' N, 72°34,5' O (MUJ 4544-45), finca Grismania (ICN-RPB 213, 215), Morichal (IAvH 7728-30); NUNCHÍA (IAvH 7731), hatto Venecia (IAvH 4898-10); OROCUÉ, casco urbano (MUJ 8884), vereda Macucua, hatto El Yopal, Casa del Río Meta (MUJ 5051), Reserva Wisirare, Municipio de Orocué (ANDES-A-AJC 2314-15, 2317, 2324-25); SABANALARGA (ANDES-A 1040, 1046, 1064-65); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, colegio EMAUS 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 165, 557-58), vereda La Riverita, finca La Bretaña 5°8'41,2" N, 70°57'27,9" O (ICN-TAS 231), vereda Bocas del Ulere, finca Altamira 5°11'9,77" N, 70°58'53,9" O (ICN-TAS 236, 238-39), vereda La Lucha 5°23'15,0" N, 71°37'16,9" O (ICN-TAS 423); TRINIDAD, vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (ICN-TAS 312), vereda La Cañada, finca San Miguel 5°24'49,8" N, 71°36'38,4" O (ICN-TAS 394-95); VILLANUEVA, vereda Lecheniel, hacienda Palmas del Casanare 4°57' N, 73°94' O (MUJ 8237, 8654-58); YOPAL, vereda El Milagro, entre Morichal y Tilodirán, finca de Julio Salcedo 5°11'34" N, 72°18'43" O (ICN-JDL 22863). *Scinax sp.*† SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, finca Altamira 5°11'9,77" N, 70°58'53,9" O (ICN-TAS 514). *Scinax wandae*† AGUAZUL, vereda El Triunfo (MLS 1923), vereda El Salitre, finca Brisas del Llano 5°9,37' N, 72°34,5' O (MUJ 3794, 4552, 6202); NUNCHÍA (IAvH 7762-66), vereda Vega del Tacare, finca La Esperanza, vega del río Tocaria 5°35'8,90" N, 72°12'29,20" O (IAvH 7018); OROCUÉ (MLS 775, MUJ 8945), borde de la carretera Orocué-Yopal, aproximadamente 8 km desde Orocué (ICN 44636-42), casco urbano de Orocué 4°57' N, 71°03' O (MUJ 8885), desviación a los módulos desde la carretera Orocué-Yopal (ICN 44643-46), vereda Macucua, hatto El Yopal, Casa del Río Meta 4°57' N, 71°03' O (MUJ 5062-80); PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, finca El Porvenir 6°2'36,5" N, 71°5'34,2" O (ICN-TAS 743-47), vereda La Colombina, entre finca El Porvenir y El Baile (ICN-TAS 794-95); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Bocas del Ulere, finca Altamira 5°11'9,77" N, 70°58'53,9" O (ICN-TAS 241), vereda Guaracura, Colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 461); TAURAMENA (MLS 767); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca La Palmita 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 654-55); VILLANUEVA, casco urbano (ICN-JDL 30133, 30134, 30158), Palmas del Oriente (ICN-TAS 30172), vereda El Encanto, finca Río Grande (ICN-JDL 30164), vereda Lecheniel, hacienda Plantas del Casanare 4°57' N, 73°94' o (MUJ 8247); YOPAL, vereda El Milagro, entre Morichal y Tilodirán, finca de Julio Salcedo 5°11'34" N; 72°18'43" O (ICN-JDL 22864-65). *Scinax x-signata*† NUNCHÍA, vereda El Milagro, entre Morichal y Tilodirán, finca de Julio Salcedo 5°11'34" N, 72°18'43" O (IAvH 7019); SAN LUIS DE PALENQUE (ICN 2644-59). *Trachycephalus*

*typhonius* (IAvH 6657), Morichal (IAvH 6657); OROCUÉ, vereda Macucuana, hato El Yopal, Casa del Río Meta 4°57' N, 71°03' O (MUJ 5043-50); PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, finca El Porvenir 6°2'36,5" N, 71°5'34,2" O (ICN-TAS 752-53, 771-81), vereda La Colombina, entre finca El Porvenir y El Baile (ICN-TAS 809); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, finca Altamira 5°11'9,77" N, 70°58'53,9" O (ICN-TAS 515, 540, 543, 547); TAURAMENA (MLS 766).

#### LEPTODACTYLIDAE

*Engystomops pustulosus* (ICN-TAS 883); PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, finca El Porvenir 6°2'36,5" N, 71°5'34,2" O (ICN-TAS 736-41, 762-65). *Leptodactylus colombiensis* (ICN-TAS 884); AGUAZUL, Cupiagua 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1906), hacienda La Esperanza (ICN 9561-63), vereda Cunama, finca La Alborada 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1890), vereda Cupiagua, vereda Aguaimara sobre la carretera de Aguazul vía Pajarito 5°10,082' N, 72°38,190' O (ICN-TAS 824-25, 830-33), vereda El Triunfo 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1668-70, 1803-04, 1807, 1826, 1927-28, 1930), vereda Manoguia, finca Veracruz 5°10,082' N, 72°38,190' O (ICN-TAS 873); NUNCHÍA, vereda Piedecuesta, finca Las Canarias (IAvH 7012); OROCUÉ (MUJ 8941), finca La Argentina, bosque de galería del brazo del caño San Miguel (ICN 44655-60), vereda La Esmeralda, finca agroturística Guarataro (MUJ 8860-83); PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, finca El Porvenir 6°2'36,5" N, 71°5'34,2" O (ICN-TAS 725), vereda La Colombina, entre finca El Porvenir y El Baile (ICN-TAS 810-12), SABANALARGA (ANDES-A 1083); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, colegio EMAUS 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 207), vereda Guaracura, finca Altamira 5°11'9,77" N, 70°58'53,9" O (ICN-TAS 529-30, 538, 541-42, 545), vereda La Lucha 5°23'15,0" N, 71°37'16,9" O (ICN-TAS 419); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca El Mirador 5°26'9,1" N, 71°35'46,8" O (ICN-TAS 367), vereda La Cañada, finca San Miguel (ICN-TAS 409), vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (ICN-TAS 267); VILLANUEVA, vereda Lecheniel, hacienda Palmas del Casanare. N 4°57', O 73°94' (MUJ 8248-49). *Leptodactylus fragilis* (ICN-TAS 883); OROCUÉ, (MUJ 8937-38), casco urbano, centro turístico vacacional Daingo (ICN 44649); PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, finca El Porvenir N 6°2'36,5", O 71°5'34,2" (ICN-TAS 735); PORE, vereda Matalarga (ICN-RPB 197, 199); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura (ICN-TAS 468, 487-91), vereda Guaracura, Colegio EMAUS 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 438, 440-42, 458, 460, 462-63, 497-09), vereda Guaracura, finca Altamira 5°11'9,77" N, 70°58'53,9" O (ICN-TAS 510, 522, 544), vereda La Lucha 5°23'15,0" N, 71°37'16,9" O

(ICN-TAS 417-18); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca El Mirador 5°26'9,1" N, 71°35'46,8" O (ICN-TAS 356-62, 366, 384, 634, 637); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca La Palmita 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 603, 644), vereda La Cañada, finca San Miguel 5°24'49,8" N, 71°36'38,4" O (ICN-TAS 398-00, 402-07), vereda San Vicente, caño Osorio 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (ICN-TAS 328-330), vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (ICN-TAS 259-64), 279-80, 307-09, 318-21, 323, 567, 681, 586-97), VILLANUEVA, Palmera Santana (ICN-JDL 30117), vereda El Encanto, finca Río Grande (ICN-JDL 30185-87). *Leptodactylus fuscus* AGUAZUL, finca Grismania (ICN-RPB 225), vereda Cunama, finca La Alborada 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1883), vereda Manoguia, finca Veracruz 5°10,082' N, 72°38,190' O (ICN-TAS 815-16), vereda Salitre, finca Brisas del Llano 5°09,37' N, 72°34,58 O (MUJ 4542-43, 4713-20); Morichal (IAvH 7680); NUNCHÍA (IAvH 7681-84), vereda Vega del Tacare, finca La Esperanza, vega del río Tocaria 5°35'8,90" N, 72°12'29,20" O (IAvH 7020, 7681-84); OROCUÉ (ICN 44650-54), casco urbano de Orocué 4°57' N, 71°03' O (MUJ 8801-03), vereda La Esmeralda, finca agroturística Guarataro (MUJ 8804-13), OROCUÉ, vereda Macucuana, hato El Yopal, Casa del Río Meta 4°57' N, 71°03' O (MUJ 5060); PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, entre finca El Porvenir y El Baile (ICN-TAS 799-08), vereda La Colombina, finca El Porvenir 6°2'36,5" N, 71°5'34,2" O (ICN-TAS 726-33); PORE, vereda Matalarga (ICN-RPB 195-96); SABANALARGA (ANDES-A 1052, 1057, 1059, ANDES-A-AJC 4088); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura (ICN-TAS 464, 479-83), vereda Guaracura, Colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 208-09, 227, 496), vereda Guaracura, finca Altamira 5°11'9,77" N, 70°58'53,9" O (ICN-TAS 531); TRINIDAD, N vereda La Cañada, finca El Mirador 5°26'9,1" N, 71°35'46,8" O (ICN-TAS 349, 363, 385, 635), vereda La Cañada, finca La Palmita 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 607, 624), vereda La Cañada, finca San Miguel 5°24'49,8" N, 71°36'38,4" O (ICN-TAS 396-97, 408), vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (ICN-TAS 246-47, 265-66, 277-78, 304-05, 310, 570, 676-78, 601); VILLANUEVA, Palmas de Oriente (ICN-JDL 30143), vereda El Encanto, finca Río Grande (ICN-JDL 30184), vereda Lecheniel, hacienda Plantas del Casanare 4°57' N, 73°94' O (MUJ 8235-36, 8666); YOPAL, vereda El Milagro, entre Morichal y Tilodirán, finca de Julio Salcedo 5°11'34" N, 72°18'43" O (ICN-JDL 22874-75). *Leptodactylus hylaedactylus*\* SABANALARGA (ANDES-A 1111); VILLANUEVA, Palmas de Oriente (ICN-JDL 30139-41, 30157), Palmera Santana (ICN-JDL 30112-30118-22), vereda Lecheniel, hacienda Palmas del Casanare 4°57' N, 73°94' O (MUJ 8253-56). *Leptodactylus insularum* Morichal (IAvH 8840, 8842, 8844-45); NUNCHÍA (IAvH

8848); OROCUÉ (MUJ 8939-40), casco urbano de Orocué (MUJ 8798-00), puente sobre el río San Miguel (ICN-34683); SABANALARGA (ANDES-A 1109); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura (ICN-TAS 555), vereda Guaracura, caño Osorio 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 223), vereda Guaracura, finca Altamira 5°11'9,77" N, 70°58'53,9" O (ICN-TAS 537, 539, 546); TRINIDAD, vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (ICN-TAS 268-69); *Leptodactylus lineatus* Morichal (IAVH 6655-56); AGUAZUL, finca Grismania (ICN-RPB 226), vereda La playa, finca de Antonio Munévar (MLS 1672-73), vereda Manoguía, finca Veracruz 5°10,082' N, 72°38,190' O (ICN-TAS 864); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca La Palmita 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 656), vereda La Cañada, finca San Miguel 5°24'49,8" N, 71°36'38,4" O (ICN-TAS 393), vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (ICN-TAS 661); VILLANUEVA, Palmera Santana (ICN-JDL 30113-14), Palmera de Oriente (ICN-JDL 30126), vereda Lecheniel, hacienda Palmas del Casanare 4°57' N, 73°94' O (MUJ 8244-45). *Leptodactylus macrosternum*<sup>†</sup> HATO COROZAL (MLS 102); Morichal (IAVH 8841, 8843, 8846-47); PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, finca El Porvenir 6°2'36,5" N, 71°5'34,2" O (ICN-TAS 766); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura (ICN-TAS 484-86), vereda Guaracura, Colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 206, 225-26, 228), vereda La Lucha 5°23'15,0" N, 71°37'16,9" O (ICN-TAS 420), vereda La Riverita, finca La Bretaña 5°8'41,2 N, 70°57'27,9" O (ICN-TAS 221); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca El Mirador 5°26'9,1" N, 71°35'46,8" O (ICN-TAS 350-55, 364-65, 383, 386-89), vereda La Cañada, finca La Palmita 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 608-10, 614, 618, 620), vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (ICN-TAS 248-49, 270-76, 281, 311, 563, 568-69, 572-74, 579, 582-85); YOPAL, vereda El Milagro, entre Morichal y Tilodirán, finca de Julio Salcedo 5°11'34" N, 72°18'43" O (ICN-JDL 22872-73). *Leptodactylus mystaceus*\* NUNCHÍA, vereda Vega del Tacare, finca La Esperanza, vega del río Tocaria 5°35'8,90" N, 72°12'29,20" O (IAVH 7021, 7023). *Leptodactylus sp.*<sup>†</sup> TRINIDAD, vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (ICN-TAS 575). *Leptodactylus sp.1*<sup>†</sup> PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, finca El Porvenir 6°2'36,5" N, 71°5'34,2" O (ICN-TAS 734); *Physalaemus fischeri*<sup>†</sup> AGUAZUL vereda El Salitre (MUJ 4738-40); HATO COROZAL, "La Prevención" (IAVH 1330-3) NUNCHÍA (IAVH 7811-12), vereda Piedecuesta, finca Las Canarias (IAVH 7013). OROCUÉ, (MUJ 8942-3); Reserva Wisirare, municipio de Orocué (ANDES-A-AJC 2309,16); PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, entre finca El Porvenir y El Baile (TAS 796-8); vereda La Colombina, finca El Porvenir, 6°2'36,5" N, 71°5'34,2" O (TAS 742); PORE, vereda Matalarga; SAN LUIS

DE PALENQUE, vereda Guaracura, Colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 448); vereda La Lucha 5°23'15,0" N, 71°37'16,9" O (ICN-TAS 416); TAURAMENA (MLS 740) TRINIDAD, vereda La Cañada, finca El Mirador 5°26'9,1" N, 71°35'46,8" O (ICN-TAS 372-4; TAS 426, 28-29, 636) *Pseudopaludicola boliviana*<sup>†</sup> SABANALARGA (ANDES-A 1114-15, 1117, ANDES-A-4115); YOPAL, vereda El Milagro, entre Morichal y Tilodirán, finca de Julio Salcedo 5°11'34" N, 72°18'43" O (ICN-JDL 22876). *Pseudopaludicola llanera*<sup>†</sup> NUNCHÍA, vereda Piedecuesta, finca Las Canarias (IAVH 7014-15); OROCUÉ (MUJ 8950-51); PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, finca El Porvenir 6°2'36,5" N, 71°5'34,2" O (ICN-TAS 701-24); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 208-09, 211-20, 222, 229, 232-33); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca El Mirador 5°26'9,1" N, 71°35'46,8" O (ICN-TAS 375-82, 632, 639), vereda San Vicente, caño Osorio 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (ICN-TAS 287-03), vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (ICN-TAS 250-52, 342-44, 565-66); VILLANUEVA, vereda Lecheniel, hacienda Palmas del Casanare 4°57' N, 73°94' O (MUJ 8258).

#### MICROHYLIDAE

*Elachistocleis ovalis*<sup>†</sup> AGUAZUL, vereda El Salitre, finca Brisas del Llano 5°9,37' N, 72°34,5' O (MUJ 4721-22), Morichal (IAVH 7810); NUNCHÍA (IAVH 7811-12), vereda Piedecuesta, finca Las Canarias (IAVH 7016), vereda Sirivania (ICN-JDL 30203); OROCUÉ, casco urbano, centro turístico vacacional Daingo (ICN 44663); PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, entre finca El Porvenir y El Baile (ICN-TAS 786); SAN LUIS DE PALENQUE (IAVH 7813); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca El Mirador 5°26'9,1" N, 71°35'46,8" O (ICN-TAS 412), vereda La Cañada, finca La Palmita 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 623, 658-60), vereda San Vicente, caño Osorio 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (ICN-TAS 331), vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,20" N, 71°22'5,40" O (ICN-TAS 256); VILLANUEVA, Palmeras de Oriente (ICN-JDL 31023-24, 30142), vereda El Encanto, finca Río Grande (ICN-JDL 30188-89); YOPAL, vereda El Milagro, entre Morichal y Tilodirán, finca de Julio Salcedo 5°11'34" N, 72°18'43" O (ICN-JDL 22877).

#### RANIDAE

*Lithobates palmipes*\* (ICN-TAS 893); AGUAZUL, 1 Km río Cusiana, carretera Pajarito-Agua Azul (ICN 9573-74), Cupiagua (MLS 1907-10), finca Guarataro (ICN-RPB 229-32), quebrada Costa Grande a 100 m del retén (ICN 9575-76), vereda El Salitre, finca Brisas del Llano 5°9,37' N, 72°34,5' O (MUJ 4534-35, 4686-88, 5138-41, 5158, 7236), vereda La Playa, finca de Antonio Munévar (MLS 1799-02), vereda Manoguía, finca Veracruz 5°10,082' N, 72°38,190' O

(ICN-TAS 817-18); NUNCHÍA (IAvH 7761); PORE (ICN-RPB 201); YOPAL, Aguazul, caño Palestina (MLS 1062).

#### STRABOMANTIDAE

***Pristimantis medemi***\* AGUAZUL, vereda Cunama, finca la Alborada 5°19'0,12" N, 72°34'59,95" O (MLS 1872, 1889), vereda Cupiagua, quebrada Aguaimara (ICN-TAS 855-58), vereda Cupiagua, quebrada Aguaimara sobre la

carretera de 1 vía Pajarito 5°10,082' N, 72°38,190' O (ICN-TAS 838-45), vereda Cupiagua, quebrada Hoyo Caliente 5°14,026' N, 72°40,298' O (ICN-TAS 883-89), vereda El Salitre, finca Brisas del Llano 5°9,37' N, 72°34,5' O (MUJ 5127-31, 5133-37, 5161), vereda El Triunfo (MLS 1924-26); YOPAL, quebrada Aguazul (MLS 1061). ***Pristimantis carranguerorum***\* AGUAZUL, vereda Cupiagua, quebrada Hoyo Caliente 5°14,026' N, 72°40,298' O (ICN-TAS 894).

**Anexo 2.** Lista de especies de reptiles con registros para el departamento de Casanare, Colombia

#### ALLIGATORIDAE

*Caiman crocodilus* SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, Colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6 O (ICN-TAS 230).

#### AMPHISBAENIDAE

*Amphisbaenaalba* NUNCHÍA, 380 m. (IAvH 5173); *Amphisbaena fuliginosa*: PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, entre finca El Porvenir y El Baile (ICN-TAS 813); *Amphisbaena sp.* PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, finca El Porvenir 6°2'36,5" N, 71°5'34,2" O (ICN-TAS 700).

#### ANOMALEPIDIDAE

*Liotyphlops albirostris* AGUAZUL, vereda Salitre, finca Brisas del Llano, 5° 10'29" N, 72°33'10" O (MUJ 814).

#### BOIDAE

*Boa constrictor* NUNCHÍA, ca. 6 km SE del casco urbano (ICN-JDL 30192); *Corallus hortulanus* AGUAZUL, vereda Manoguía, finca Veracruz, 5°10,082' N, 72°38,190' O, 549 m. (ICN-TAS 822); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, Colegio Emaús, 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O; TRINIDAD, vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,2" N, 71°22'5,4" O (ICN-TAS 283, ICN-TAS 600); *Epicrates cenchria* OROCUÉ, vereda Macucucana, hato El Yopal, Casa del Río (MUJ 823); VILLANUEVA, Palmeras del Oriente (ICN-JDL 30177); *Eunectes murinus* VILLANUEVA, Palmeras del Oriente (ICN-JDL 30176).

#### COLUBRIDAE

*Atractus univittatus* LA SALINA (MLS 290, 2706-7); VILLANUEVA, vereda El Encanto, finca Río Grande (ICN-JDL 30165-6, 30206); *Chironius carinatus* AGUAZUL, vereda Salitre, finca Brisas del Llano, 5°10'29", 72°33'10" O (MUJ 753); NUNCHÍA, pozo Llanura I, Ecopetrol (IAvH 3973); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, colegio Emaús, 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 210); vereda Ulere, finca Altamira 5°11'13,7" N, 70°58'44,2" O (ICN-TAS 524, 548); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca El Mirador 5°26'18,9" N, 71°36'49" O (ICN-TAS 630-2); finca La Palmita, 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 645, 657, 663); vereda La Esperanza, finca La Palmita 5°24'15,2" N, 71°37'3,8" O (ICN-TAS 646); VILLANUEVA, Palmeras del Oriente (ICN-JDL 30175); *Dipsas pavonia* AGUAZUL, vereda Cupiagua, 650 m. (MLS 359); *Dipsas sp.* LA SALINA (MLS 359); *Drymarchon sp.* TRINIDAD, vereda La Cañada, finca La Palmita, 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 643); vereda San Vicente, finca Candalayes, 5°18'47,2" N, 71°22'5,4" O (ICN-TAS 332); *Drymoluber rhombifer* AGUAZUL, vereda Cunamá, 750 m. (MLS 2981); *Erythrolamprus aesculapii* Orocué, sobre río Meta (ICN 7057); *Helicops angulatus* PAZ

DE ARIPORO, finca Jorgín, (ICN 11529); *Helicops pastazae* YOPAL, El Morro, quebrada La Vegana (ICN 10744); *Hydrops triangularis* SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Ulere, finca Altamira, 5°11'13,7" N, 70°58'44,2" O (ICN-TAS 235); *Imantodes cenchoa* AGUAZUL, vereda Cunamá, 750 m. (MLS 2984); *Leptodeira annulata* AGUAZUL, vereda Salitre, finca Brisas del Llano, 5°10'29" 72°33'10" O (MUJ 677, 772-4); PAZ DE ARIPORO, finca Jorgín, (ICN 11520-1); TRINIDAD, vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,2" N, 71°22'5,4" O (ICN-TAS 245, 284); *Leptophis ahaetulla* Morichal, 350 m. (IAvH 5183), TRINIDAD, vereda La Cañada, finca La Palmita, 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 602); *Ligophis lineatus*: Mochuelo (ICN 11200); MANÍ, (ICN 2835); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca El Mirador, 5°26'18,9" N, 71°36'49" O (ICN-TAS 348); *Liophis epinephelus* LA SALINA, vereda El Arenal (ICN 2854); *Liophis melanotus* TRINIDAD, vereda La Cañada, finca San Miguel (ICN-TAS 392); vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,2" N, 71°22'5,4" O (ICN-TAS 338-9); *Liophis reginae* LA SALINA (MLS 432); *Mastigodryas puchriceps* NUNCHÍA, vereda Piedecuesta, finca Las Canarias, 450 m. (IAvH 4767); *Mastigodryas sp.* MANÍ, hato La Floresta, Cusiana (ICN 2087); *Ninia atrata* AGUAZUL, vereda Salitre, finca Brisas del Llano (MUJ 813) *Oxybelis aeneus* TRINIDAD, vereda La Cañada, finca La Palmita, 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 647-9); *Oxyrhopus petolarius* AGUAZUL, vereda Manoguía, finca Veracruz, 5°10,082' N, 72°38,190' O, 549 m. (ICN-TAS 819); PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, entre finca El Porvenir y El Baile (ICN-TAS 782); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca La Palmita, 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 662); *Pseudoboa newiedii* Morichal, 350 m. (IAvH 5182); PAZ DE ARIPORO, finca Jorgín, 5°49'18,8" N, 71°51,26" O (ICN 11527); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca La Palmita, 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN TAS 605); *Sibon nebulatus* AGUAZUL, vereda Manoguía, finca Veracruz, 549 m. (ICN-TAS 891); *Tantilla melanocephala* YOPAL, 350 m. (IAvH 5177); *Thamnodynastes dixonii* (ICN 213); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca La Palmita, 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 390, 650-1).

#### DACTYLOIDAE

*Anolis auratus* AGUAZUL, vereda Cupiagua, quebrada Aguaimara (ICN-TAS 846); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, Colegio Emaús, 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 525); *Anolis sp.1* MONTERREY, caño Lanura (ICN 3988); *Anolis sp.2* VILLANUEVA, casco urbano (ICN-JDL 30135; 30159).

#### ELAPIDAE

*Micrurus filiformis* AGUAZUL, finca Patio (ICN 11380); *Micrurus lemniscatus* PAZ DE ARIPORO, finca Jorgín, 5°49'18,8" N, 71°51'26" N, 71°51'26" O (ICN 11526); *Micrurus mipartitus* pozo Floreña (IAvH 5178)

## GEKKONIDAE

***Hemidactylus angulatus*** AGUAZUL, vereda Manoguía, finca Veracruz, 549 m. (ICN-TAS 820); NUNCHÍA, vereda Sirivania (ICN-JDL 30200-2); ***Hemidactylus frenatus*** PAZ DE ARIPORO, vereda El Totumo, caserío El Totumo (MUJ 1316); SAN LUIS DE PALENQUE, casco urbano (ICN-JDL 30193-8); TRINIDAD, Hotel El Porvenir, casco urbano (MUJ 1322-6); VILLANUEVA, casco urbano (ICN-JDL 30109-1, 30154, 30163, 30204-5); Palmeras del Oriente, (ICN-JDL 30190); ***Hemidactylus palaichtus*** SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, Colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 163, 168, 432, 435-6, 449-55, 492-4).

## GYMNOPHTHALMIDAE

***Gymnophthalmus speciosus*** AGUAZUL, vereda Salitre, finca Brisas del Llano, 5°10'29", 72°33'10" O (MUJ 777-9); PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, entre finca El Porvenir y El Baile (ICN-TAS 184); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, Colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 230); ***Ptychoglossus brevifrontalis*** AGUAZUL, vereda Salitre, finca Brisas del Llano, 5°10'29" N, 72°33'10" O (MUJ 775-6).

## IGUANIDAE

***Iguana iguana*** Morichal, 350 m. (IAvH 5180-1); AGUAZUL, vereda Salitre, finca Brisas del Llano, 5°10'29" N, 72°33'10" O (MUJ 759-60); OROCUÉ, vereda Macucucana, hato El Yopal, Casa del Río (MUJ 833); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca El Mirador 5°26'18,9" N, 71°36'49" O (ICN-TAS 633).

## LEPTOTYPHLOPIDAE

***Leptotyphlops jhosuai*** TAURAMENA (MLS 2482); ***Leptotyphlops macrolepis*** AGUAZUL, vereda Salitre, finca Brisas del Llano, 5°10'29" N, 72°33'10" O (MUJ 815).

## PODOCNEMIDIDAE

***Podocnemis vogli*** TRINIDAD, vereda La Cañada, finca La Palmita, 5°19'11,4" N, 71°20'51" O (ICN-TAS 604).

## POLYCHROTIDAE

***Polychrus marmoratus*** OROCUÉ, vereda Macucucana, hato El Yopal, Casa del Río (MUJ 832).

## Sphaerodactylidae

***Gonatodes concinnatus*** AGUAZUL, vereda Cupiagua, quebrada Aguaimara (ICN-TAS ICN-TAS 847); vereda Salitre, finca Brisas del Llano, 5°10'29" N, 72°33'10" O (MUJ 756-58, 765-68, 812); NUNCHÍA, vereda Piedecuesta, finca Las Canarias, 450 m. (IAvH 4759-60, 4764-6); PAZ DE ARIPORO, vereda La Colombina, entre finca El Porvenir y El Baile (ICN-TAS 785); vereda La Colombina, finca El Porvenir 6°2'36,5" N, 71°5'34,2" O (ICN-TAS 747-51), SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, Colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 164, 166-67, 234, 434, 526, 528), SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Palestina, finca La Lucha 5°23'15,0" N, 71°37'16,9" O (ICN-TAS 413-5, 424-5); TRINIDAD, vereda La Cañada, finca El Mirador 5°26'18,9" N, 71°36'49" O (ICN-TAS 347); finca San Miguel (ICN-TAS 410-1); vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,2" N, 71°22'5,4" O (ICN-TAS 243, 316-7, 333-7,340, 346); VILLANUEVA, casco urbano (ICN-JDL 30144-49, 30191); Palmeras de Oriente (30167-8); ***Lepidoblepharis*** sp. AGUAZUL, vereda Manoguía, finca Veracruz 549 m. (ICN-TAS 866).

## TEIIDAE

***Ameiva ameiva*** MONTERREY, 24 km al suroeste de Monterey (ICN 4738); NUNCHÍA, vereda Sirivania (ICN-JDL 30199); SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, Colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 433, 495), ***Cnemidophorus gramivagus*** MONTERREY, 7 km al noroeste de Monterey (ICN 5231); 8 km al noroeste de Monterey (ICN 5232); 9 km al noroeste de Monterey (ICN 5233); 10 km al noroeste de Monterey (ICN 5234); 11 km al noroeste de Monterey (ICN 5235); 12 km al noroeste de Monterey (ICN 5236); 13 km al noroeste de Monterey (ICN 5237); caño Lanuya (ICN 5248-53); SAN LUIS DE PALENQUE, 24 km al suroeste de Monterey (ICN 5225-6); TRINIDAD, vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,2" N, 71°22'5,4" O (ICN-TAS 244); ***Tupinambis teguixin*** SAN LUIS DE PALENQUE, vereda Guaracura, Colegio Emaús 5°8'40,4" N, 70°58'22,6" O (ICN-TAS 522); Matamoriche 5°9'7,6" N, 70°58'5,4" O.

## VIPERIDAE

***Bothrops atrox*** TRINIDAD, vereda San Vicente, finca Candalayes 5°18'47,2" N, 71°22'5,4" O (ICN-TAS 285-6).

# Obtención de escopolamina en biorreactor a partir de cultivos de raíces de *Brugmansia candida*

Ángela María Otálvaro-Álvarez<sup>1,\*</sup>, Mario Enrique Velásquez-Lozano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

## Resumen

Teniendo en cuenta la importancia farmacológica de los alcaloides del tropano y la posibilidad de producirlos a partir de cultivos de tejidos de vegetales de especies como la *Brugmansia candida*, en este trabajo se evaluó la producción de uno de estos alcaloides a partir del cultivo de raíces adventicias en biorreactor. Para ello se desarrolló un sistema de reacción compuesto por dos unidades, una de crecimiento y otra de acondicionamiento del medio, y se evaluó la producción de biomasa y de este alcaloide luego de 21 días de cultivo, obteniendo como resultado 9,5 mg de escopolamina/g de raíces secas, resultado mayor al obtenido anteriormente en cultivos de raíces de este tipo en matraces de Erlenmeyer (6 mg/g de raíces secas), e incluso superior a lo reportado para cultivos de raíces transformadas de *B. candida* mediante biorreactor. Respecto a la biomasa, se obtuvo un índice de crecimiento de 1,58, similar al de 1,4 obtenido en matraces de Erlenmeyer, lo que sugiere que el cambio de escala no afectó de manera negativa la producción de biomasa.

**Palabras clave:** biorreactor, cultivos de raíces, alcaloides del tropano, escopolamina, *Brugmansia candida*.

## Scopolamine production from *Brugmansia candida* roots culture using a bioreactor

### Abstract

Given the pharmacological importance of tropane alkaloids and the possibility of producing them from plant tissue cultures of plant species such as *Brugmansia candida*, the main goal of the present paper was to evaluate the alkaloid production of root cultures developed in a bioreactor. We set up a bioreaction system consisting of two units, one for biomass growth and the other one for liquid medium conditioning. After 21 days of culture, biomass and scopolamine production were evaluated, resulting in the extraction of 9.5 mg of scopolamine/g of dry roots. This value was higher than the one obtained in a previous culture in Erlenmeyer flasks (6mg/g of dry roots) and higher than the scopolamine extracted from hairy roots cultures using a bioreactor reported in other studies. Regarding biomass, the growth index (GI) was 1.58, similar to the GI obtained with cultures in Erlenmeyer flasks (GI 1.4), which suggests that scaling up the process did not affect biomass production negatively.

**Key words:** Bioreactor, roots culture, tropane alkaloids, scopolamine, *Brugmansia candida*.

## Introducción

La *Brugmansia candida* es una especie conocida por su capacidad para producir un grupo de alcaloides entre los que se incluyen la escopolamina, la anisodamina y la hiosciamina, compuestos con una amplia gama de aplicaciones en medicina como agentes anticolinérgicos, antiespasmódicos, midriáticos y sedantes (Cardillo, A., Otálvaro, A., Busto, V., Talou, J., Velásquez, M., Giulietti, A., 2010).

En estudios anteriores se estableció que estos alcaloides se sintetizaban en las raíces de la planta y que luego viajaban a través de su xilema hasta las hojas (Wink, 1987). Esta es la razón por la cual, en la actualidad, la producción masiva de estos alcaloides se hace a través de la extracción de

toneladas de hojas de cultivos de plantas que ya han alcanzado la madurez. En Australia, por ejemplo, se cultivan híbridos de *B. candida* para producir hojas jóvenes cuyo contenido de escopolamina es equivalente al 0,34 % de su masa, y la producción promedio en un cultivo no fertilizado es de 4.360 kg de hojas secas por hectárea y por año, lo que se traduce en una producción de 14,8 kg de escopolamina por hectárea cultivada y por año (Griffin & Lin, 2000). Sin embargo, debido a las características desfavorables de los cultivos

### \*Correspondencia:

Ángela María Otálvaro-Álvarez, amotalvaro@unisalle.edu.co

Recibido: 23 de julio de 2013

Aceptado: 27 de abril de 2014

agronómicos, continuamente se buscan alternativas para su producción que resulten más ventajosas. Entre ellas, el cultivo *in vitro* de raíces se presenta como una buena opción (García, L. A., Perea, M., Reguero, M. T., 1993; Pitta-Álvarez, S. I., 1998; Niño, J., Gallego, C. M., Correa, Y. M., Mosquera, O. M., 2003; Mahagamasekera, M. G. P., Doran, P. M., 1998; Gontier, E., Clément, A., Tran, T. L. M., Gravot, A., Lièvre, K., Guckert, A., Bourgaud, F., 2002). Hasta ahora, estos cultivos se han desarrollado en bancos, y la producción de los compuestos por esta vía es todavía muy limitada. Piñeros, 2005, realizó estudios sobre la producción *in vitro* de escopolamina en cultivos de raíces de *B. candida* en matraces de Erlenmeyer (250 ml), y logró producir un máximo de escopolamina de 6 mg/g de raíces secas.

En trabajos anteriores de cultivo de raíces de *B. candida*, se ha observado que en matraces de Erlenmeyer la producción de biomasa se incrementa cuando existe agitación, sin embargo, este mismo factor afecta negativamente la producción de alcaloides. Los valores reportados de la producción de escopolamina a los 20 días de cultivo son de 0,4 y 0,780 mg/g de raíz húmeda en cultivos con agitación y sin esta, respectivamente (Pitta-Álvarez, S., 1998; Pitta-Álvarez, S., Giulietti, A.M., 2001).

Puesto que usado para este fin el cultivo *in vitro* de raíces convencional presenta algunas desventajas como la velocidad lenta de producción de biomasa, la necesidad de auxinas para promover el crecimiento de las raíces (que en algunos casos provoca la disminución en el contenido de alcaloides), y la dificultad para mantener la estabilidad del cultivo y de la producción de metabolitos secundarios, se ha reconocido el potencial que representa el cultivo de raíces transformadas como herramienta para la obtención de productos vegetales sintetizados en la raíz (Flores, H. E., Filner, P. 1985; Hamill, J. D., Parr, A. J., Robins, R. J., Rhodes, M. J. C., 1986; Kamada, H., Okamura, N., Satake, M., Harada, H., Shimomura, K., 1986).

Sin embargo, en un estudio anterior llevado a cabo con raíces transformadas para la obtención de alcaloides del tropano en biorreactor, la producción de escopolamina fue menor a la obtenida en matraces de Erlenmeyer con raíces no transformadas que ya se mencionó (0,05 mg/g de raíces secas) (Cardillo, A., Otálvaro, A., Busto, V., Talou, J., Velásquez, M., Giulietti, A., 2010). Esto sugiere que, entre otros factores, el proceso de transformación puede afectar negativamente la producción de escopolamina en este caso particular.

Asimismo, trabajos como el de Carrizo, C., Pitta-Álvarez S., Kogan, M., Giulietti, A., Tomaro, M., (2001) han reportado que, además de los alcaloides esperados (escopolamina, hiosciamina y anisodamina), en estos cultivos de raíces transformadas de *B. candida* se detecta la presencia de otras sustancias como la cadaverina. Esta sustancia, que no se

hace presente en la totalidad de los tejidos de la planta y se obtiene únicamente en respuesta a un factor de estrés, es una poliamina que también ha sido detectada en el género *Datura*.

De otro lado, cuando se busca llevar los procesos que han sido viables en matraces de Erlenmeyer a una escala de producción mayor pasando al biorreactor, es necesario considerar que se presentan ciertas limitaciones, principalmente asociadas a problemas de transferencia de masa (oxígeno, nutrientes, etc.), y a la homogeneidad de las células del cultivo. Estos inconvenientes pueden conducir a la generación de estrés y, en algunos casos, a la lisis celular, ocasionando la pérdida del cultivo (Wyslouzil, B. E., Whipple, M., Chatterjee, C., Walcerz, D. B., Weathers, P. J., Hart, D. P., 1997. Kino-Oka, M., Hitaka, Y., Taya, M., Tone, S., 1999). Además, la producción de metabolitos en biorreactor está sujeta a ciertos factores, entre los que se encuentran la adición de reguladores del crecimiento, especialmente auxinas y citocianinas, que inducen la indiferenciación celular y promueven la proliferación *in vitro*; las variaciones en la concentración de nutrientes del medio, que dependen de los objetivos del cultivo; la adición de 'elicitores'; el estrés físico o químico que puede inducir la liberación de metabolitos; los factores físicos que incluyen la luz, la temperatura, el pH del medio, la aireación, la densidad celular y factores biológicos tales como las mutaciones y demás alteraciones genéticas inducidas que pueden modificar el cultivo y sus productos derivados. También se debe considerar la configuración del biorreactor, de modo que ésta sea la más adecuada para la producción del metabolito deseado, para lo cual se deben analizar los modelos reportados (de tipo *airlift*, de columna simple, de columna de burbujeo, de niebla, de tanque agitado, etc.), y las características del crecimiento del cultivo de acuerdo a sus necesidades particulares (Green & Thomas, 1996; Chatterjee, et al., 1997; Jung, et al., 1998; Mahagamasekera & Doran, 1998; Kino-Oka, et al., 1999; Hitaka, et al., 2000; Doran, 1997; Takahashi, et al., 2001; Weathers & Kim, 2001; Zobayed & Saxena, 2003; Huang, et al., 2004; Suresh, et al., 2004; Zobayed, et al., 2004; Suresh, et al., 2005; Luczkiewicz & Kokotkiewicz, 2005, Martin & Vermette, 2005, Savitha, et al., 2005, Guillon, et al., 2006).

Por esta razón, en este estudio se pretendió hacer un acercamiento al incremento de la producción de alcaloides del tropano, específicamente de escopolamina, en un biorreactor a partir de cultivos de raíces no transformadas de *B. candida*, con el objeto de establecer su potencial para crecer y producir el metabolito en tales condiciones.

## Materiales y métodos

### Material vegetal

Se emplearon semillas de *B. candida* recolectadas en el campus de la Universidad Nacional de Colombia. El árbol del que provenía el material está inventariado en

el Herbario Nacional del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia bajo el código 223783.

#### ***Obtención de raíces estériles normales de B. candida***

Esta etapa involucró varios procesos: la desinfección de los frutos y de los embriones de *B. candida* siguiendo el procedimiento descrito por Piñeros, 2005, y la siembra de los embriones en 15 ml de medio B5 (Gamborg, et al., 1969) con suplemento de 20 g/l de sacarosa, sin hormonas vegetales y con agar en una proporción de 10 g/l. Este procedimiento se llevó a cabo en frascos de 50 ml con cubiertas de papel de aluminio. En cada frasco se plantaron entre dos y tres embriones. La incubación se hizo a temperatura ambiente y en condiciones de oscuridad.

A continuación se describe la operación del sistema de biorreacción en el cual se desarrolló el cultivo de las raíces por duplicado.

#### ***Preparación de los inóculos de raíces normales de B. candida usados en el sistema de biorreacción***

Los inóculos usados en el sistema de biorreacción correspondían a las raíces estériles (de 1,5 a 2 cm) obtenidas en los frascos con medio sólido en donde se cultivaron los embriones durante 30 días. Para preparar el inóculo, se hizo el corte de las raíces desde los embriones y la separación de los segmentos de tallo en la cámara de flujo laminar. El material se reunió en un recipiente estéril y se registró el peso fresco total que representaba la masa de inóculo.

#### ***Adaptación del sistema de biorreacción para el cultivo de raíces normales de B. candida***

Se utilizó un sistema de dos unidades (reservorio y unidad de crecimiento) adaptado para el cultivo de las raíces normales de *B. candida*. En el reservorio se mantenía el medio de cultivo y se realizaba el registro de las condiciones de pH, de temperatura y el oxígeno disuelto proveniente del medio. En un futuro, el uso de esta unidad permitirá implementar sistemas con reemplazo de medio para facilitar la extracción del producto o para controlar accidentes debidos a la contaminación. Se contó con un reactor Applikon® Z61101C006 de 3,2 l de capacidad (H/D=1,9) para el reservorio, el cual se acondicionó instalando en su interior un sistema de control de temperatura por medio de un intercambiador de calor, así como sensores de temperatura y de pH, una sonda para la toma de muestras, un sistema de agitación (turbina Rushton) y una sonda para la salida constante de medio hacia la unidad de crecimiento. Cada cinco días se verificaba el contenido de azúcares, nitrógeno y alcaloides en el medio de cultivo y se retiraban 20 ml de este. Para todos los ensayos, la unidad se cargó inicialmente con 2 ml de medio de cultivo previamente esterilizados.

El sistema de biorreacción completo contaba, además, con una unidad de crecimiento compuesta por un recipiente de vidrio de doble fondo que permitía la circulación de agua para mantener constante la temperatura en su interior y una malla de acero inoxidable que actuaba como soporte de las raíces. Esta malla tenía una amplitud de poro de 1 mm y se ubicó a 5 cm de la tapa y a 18 cm del fondo de la unidad de crecimiento, con el fin de dar espacio al desarrollo completo de las raíces, las cuales alcanzan una elongación máxima de 20 cm durante el periodo de cultivo según lo reportado por Piñeros, 2005.

En la unidad de crecimiento se colocó una boquilla para el suministro del medio. La distancia entre la malla y la tapa, así como el diseño de la boquilla, garantizaron que la aspersión fuera homogénea sobre toda el área de la malla y cubriera completamente la masa de raíces. Además de la boquilla para la entrada del medio, la tapa de esta unidad tenía dos puertos, uno donde se instaló una sonda para la salida del medio desde la unidad de crecimiento hacia el reservorio, y otro acondicionado con un filtro de 0,22 µm para la salida del aire que ingresaba a la unidad.

El aire empleado para el crecimiento provenía de un aireador y era conducido a través de mangueras de silicona a una unidad de humidificación antes de su ingreso al proceso; el flujo de aire empleado fue de 0,47 l/min (correspondientes a 0,24 vvm). La unidad de crecimiento se cubrió para oscurecer su interior, ya que cuando los cultivos se desarrollaban en presencia de la luz, el crecimiento de las raíces se daba de forma paralela al desarrollo de segmentos de tallo.

#### ***Operación del sistema de biorreacción para el crecimiento de raíces no transformadas de B. candida***

Después de inocular la unidad de crecimiento colocando las raíces (3,0 g de raíces frescas/l) sobre la malla de acero inoxidable, se añadieron 0,5 g/l de ampicilina y 0,5 ml/l de nistatina (100.000 UI/ml) al medio de cultivo que se encontraba en el reservorio para controlar posibles contaminaciones. En cuanto a las condiciones del ensayo, luego de añadir el antibiótico y el antimicótico, el pH del medio de cultivo fue de 7,0. Para evitar la deshidratación y la pérdida de viabilidad de las raíces, el flujo de aire y de medio debía iniciarse rápidamente. El flujo de medio que entraba a la unidad de crecimiento se mantuvo en 0,30 ml/s, mientras que el flujo de medio que salía de la unidad se estabilizó en 0,39 ml/s; estos flujos se ajustaron para evitar que el medio se acumulara en la unidad de crecimiento y así garantizar su continuo movimiento entre las dos unidades. Además, la operación en el sistema de biorreacción se desarrolló de modo que el aire se mezclara con el medio de cultivo en la boquilla de ingreso a la unidad de crecimiento, generando burbujas muy finas de medio que facilitaban su aspersión uniforme sobre las raíces.

### ***Seguimiento del cultivo de las raíces no transformadas de *B. candida* en el reactor***

Las condiciones en la unidad de reservorio, es decir el pH y la temperatura del medio, se registraban a diario. Cada cinco días se tomaba una muestra del medio de cultivo para determinar la concentración de alcaloides y azúcares.

### ***Procedimiento de 'elicitación' de las raíces no transformadas de *B. candida* en el sistema de biorreacción***

De acuerdo con los desarrollos obtenidos por Piñeros, 2005, quien estableció las ventajas del uso de sulfato de cobre como elicitador, se aplicó esta sustancia al medio de cultivo en la dosis indicada (0,2 mM) en el día 21 del cultivo, manteniendo las mismas condiciones del periodo de crecimiento. El elicitador se dejó actuar durante 24 horas, al cabo de las cuales se daba por terminado el ensayo. En este momento se detenían las bombas y el suministro de aire y se procedía a abrir ambas unidades, se recogía una última muestra del medio líquido y se recolectaban las raíces.

### ***Determinaciones analíticas***

*Determinación de peso fresco.* El peso fresco de las raíces (PF) se determinó luego de filtrar el medio de cultivo, lavar las raíces con abundante agua y secarlas de forma rápida con papel absorbente.

*Determinación del peso seco.* El peso seco de las raíces (PS) se determinó luego de secarlas en una estufa a 80 °C hasta obtener un peso constante (Perry, 1981).

*Determinación de la humedad.* La humedad se determinó usando la información del peso fresco (PF) y el peso seco (PS).

### ***Extracción del alcaloide***

Para cuantificar la escopolamina presente tanto en las raíces como en el medio de cultivo, se hizo necesaria su extracción aplicando los protocolos empleados por Piñeros, 2005. Para las raíces, el proceso consistió en la extracción sólido-líquido de 0,5 g de raíces con 40 ml de una solución compuesta por cloroformo, metanol y amoníaco (15:5:1) a temperatura ambiente en un agitador orbital a 100 r.p.m durante 72 horas. A continuación se mezclaba la solución resultante con 50 ml de agua y 25 ml de cloroformo en un embudo de decantación del que se recuperaba la fase orgánica, la cual se sometía a evaporación con aire y resuspensión en la fase móvil para la cuantificación del alcaloide. Dicha cuantificación se realizó por cromatografía líquida de alta eficacia (CLAE) con el método descrito por Piñeros, 2005. La escopolamina se identificó tomando como base el tiempo de retención del estándar (-) escopolamina HBr trihidratada (Sigma Aldrich) y se cuantificó por medio de una curva de calibración. Para este ensayo se contó con un equipo Waters® (Milford, MA, Estados Unidos) que contaba con un detector de absorbancia UV 486 programado a 210 nm. El *software* para el análisis

de los datos usado fue el Millenium 2000 de Waters (Milford, MA, Estados Unidos). Para el análisis del alcaloide se usó como fase móvil una mezcla que contenía 10% en volumen de acetonitrilo, 89% de una solución de 50 mM de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  y 1% de trietanolamina, y se trabajó con cromatografía isocrática. El pH de la fase móvil se ajustó en 3,5 empleando ácido fosfórico y flujo de 1 ml/minuto. La columna empleada para la separación fue una C18 en fase reversa (Chromolith performance RP-18e de 100 mm de longitud y 4,6 mm de diámetro interno, Merck KGA 64271, Darmstadt, Alemania). Todas las pruebas se desarrollaron a temperatura ambiente y se estableció un tiempo de análisis de 15 minutos para cada una; la inyección en el equipo fue manual y su volumen fue de 20 ml. Las muestras inyectadas correspondieron a los extractos obtenidos disueltos de nuevo en la fase móvil. El tiempo de retención para la escopolamina se determinó en  $4,8 \pm 0,5$  minutos.

### ***Determinación de azúcares por cromatografía líquida de alta eficacia***

La determinación se hizo cuantificando la cantidad de sacarosa, de glucosa y de fructosa presente en el medio de cultivo durante el tiempo de cultivo. Los azúcares se identificaron con base en los tiempos de retención de los estándares de sacarosa, glucosa y fructosa (Sigma Aldrich) y la cuantificación se llevó a cabo por medio de una curva de calibración. Para la realización de este ensayo se contó con un equipo Waters® (Milford, MA, Estados Unidos) equipado con un detector de índice de refracción IR 410. Los datos se analizaron con el *software* Millenium 2000 de Waters® (Milford, MA, Estados Unidos). Para este análisis se usó como fase móvil agua desionizada a un flujo volumétrico de 0,5 ml/min. La columna empleada para la separación fue una Sugar-Pak™ de 300 mm de longitud y 6,5 mm de diámetro. Todos los análisis se desarrollaron a una temperatura de 84°C. El tiempo de cada análisis se estableció en 15 minutos. Los tiempos aproximados de retención para los tres azúcares evaluados fueron los siguientes: sacarosa,  $7,49 \pm 0,2$  minutos, glucosa,  $9,46 \pm 0,09$  minutos y fructosa,  $11,8 \pm 0,04$  minutos.

### ***Determinación por espectrofotometría del nitrógeno presente en el medio de cultivo***

Esta determinación se realizó solamente en uno de los ensayos y buscaba caracterizar el consumo de nutrientes, específicamente de las fuentes de nitrógeno, a lo largo del tiempo de crecimiento de las raíces. Se usó un espectrofotómetro NANOCOLOR® 500 D (Macherey Nagel) a 365 nm después de que las muestras se pusieran en contacto con 2,6-dimetil fenol mezclado con ácido sulfúrico/ácido fosfórico, según lo descrito para la determinación de nitratos en el Test 1- 65 del catálogo del equipo empleado.

## Resultados y discusión

### Operación del biorreactor

En cuanto a la configuración de las dos unidades empleadas para el cultivo, se presentaron inconvenientes a la hora de evacuar el aire suministrado en la unidad de crecimiento, ya que esta contaba únicamente con una salida, la cual se vio afectada por la caída de la presión a través de un filtro de 0,20  $\mu\text{m}$ , lo que ocasionó problemas por el incremento de la presión en el sistema. Para superar estos inconvenientes fue necesario cambiar el filtro por lo menos una vez durante el cultivo para evitar que se taponara, e instalar otras salidas en el biorreactor para facilitar la evacuación del aire de exceso. En el laboratorio se usaron mangueras de silicona para el transporte del medio entre las dos unidades. La fragilidad de dichas mangueras, y el continuo desgaste al que se ven sometidas por la acción de las bombas peristálticas, hace pensar que se deben considerar otro tipo de ductos para el transporte del medio entre las unidades si se quiere llegar a una escala superior de producción.

Es importante destacar que cuando se añadió el sulfato de cobre durante el último día del ensayo, el pH disminuyó de manera considerable.

En cuanto a los resultados relativos al cambio en la concentración de azúcares en el medio a lo largo del cultivo, se evidenció que el mayor consumo de azúcares se presentó durante los 12 primeros días, al cabo de los cuales esta variable tendió a estabilizarse, pasando de los 20 g/l iniciales a una concentración de azúcares aproximada de 12 g/l; durante este tiempo se observó un consumo aproximado del 40%, lo que coincide con los consumos presentados por **Piñeros, 2005**, para cultivos de raíces no transformadas de *B. candida* en matraces de Erlenmeyer y con los resultados de **Cardillo, A., Otálvaro, A., Busto, V., Talou, J., Velásquez, M., Giulietti, A., 2010** para cultivos de raíces transformadas de esta misma especie en biorreactor.

Respecto al crecimiento de las raíces, se contó con un inóculo de  $5,95 \pm 0,07$  g y a los 21 días de cultivo se llegó a una masa final de  $15,36 \pm 1,33$  g (Figura 1). Estos pesos corresponden a raíces frescas. La humedad de las raíces fue de  $92,5 \pm 0,7$  %. Con esta información se determinó el índice de crecimiento de las raíces de acuerdo con la ecuación.

$$IC = \frac{(15,36 - 5,95)}{5,95}$$

$$IC = 1,58$$

En este caso, el índice de crecimiento fue de 1,58, que es un valor mayor al obtenido en las raíces evaluadas en la curva de crecimiento cuando el cultivo se hizo en matraces de Erlenmeyer de 125 ml, en las cuales se alcanzó un índice de crecimiento de 1,4 (**Otálvaro, 2009**).



**Figura 1.** Raíces adventicias cultivadas en el biorreactor luego de 21 días de crecimiento

**Carrillo, et al., 2010**, encontraron que en un cultivo de raíces transformadas de *B. candida* desarrollado en un sistema de biorreactor por inmersión con mallas de soporte, el índice de crecimiento fue de 3,93, valor muy superior al reportado en este trabajo, lo que ratifica que la transformación de las raíces fomenta su crecimiento (**Veena & Taylor, 2007**).

### Análisis cuantitativo de escopolamina por cromatografía líquida de alta eficacia

Se analizaron las muestras del medio de cultivo tomadas en los días 4, 8, 12, 16, 20 y 21 para determinar el contenido de escopolamina. En ninguna de las muestras se observó la presencia del metabolito en cantidades detectables (nivel de detección mínimo: 0,01 mg de escopolamina/ml). Estos resultados indican que no hubo liberación del alcaloide al medio de cultivo o que, si la hubo, se encontraba por debajo de los límites de detección del método empleado. Con estos resultados se confirmó el hecho presentado por otros investigadores en el sentido de que la presencia del metabolito en el medio se evidencia en cultivos que no han sido expuestos a un agente elicitor (**Piñeros, 2005; Liu, et al., 2003**).

La aplicación de 0,2 mm de sulfato de cobre con el propósito inicial de favorecer la liberación del metabolito al medio bajo las condiciones experimentales probadas, no arrojó un resultado positivo. Esta situación pudo deberse a que el contacto entre el elicitor y la masa de raíces generado por la aspersión no fue suficiente, como sí lo fue para las unidades experimentales de menor volumen y cultivos sumergidos, donde la probabilidad de interacción entre la biomasa y el compuesto elicitor es mucho mayor y donde el estrés mecánico también actúa como precursor de la liberación del metabolito al medio de cultivo (**Dörnenburg, H., Knorr, D., 1995**).

En cuanto a la escopolamina extraída de las raíces, se determinó un valor de  $9,5 \pm 3,04$  mg/g de raíces secas, equivalente a  $0,73 \pm 0,23$  mg/g de raíces húmedas; dicho resultado es mayor que el valor promedio encontrado por **Piñeros, 2005**, de 6 mg/g de raíces secas reportado para cultivos en matraces de Erlenmeyer. Sin embargo, el valor fue menor al máximo reportado por **Grajales, 2008**, al evaluar tres tratamientos en los cuales se aplicaba L-arginina en concentraciones de 10, 100 y 1.000 mg/l como precursora de la escopolamina en el medio de cultivo de Schenk y Hilderandt, obteniéndose un rendimiento de 10,134 mg/g con el tratamiento 3 (1.000 mg/L de L-arginina) en el día 15 del cultivo.

De otro lado, en el trabajo de **Cardillo, et al., 2010**, sobre el cultivo de raíces transformadas en biorreactor, los autores reportan una producción del metabolito de  $0,05 \pm 0,01$  mg/g de raíces secas. Como se observa, este valor es inferior al obtenido en este trabajo empleando raíces no transformadas, lo que permite evidenciar que la producción del metabolito de interés en biorreactor puede haberse visto afectada, entre otros factores, por el proceso de transformación de las raíces (**Bonhomme, et al., 2000; Bulgakov, V. P., et al., 2002; Bulgakov, V. P., et al., 2004; Bulgakov, V. P., 2008**).

Por otra parte, en el trabajo desarrollado por **Otálvaro, 2009**, con raíces transformadas de *B. candida* clon Arg3 (descrito en **Cardillo, et al., 2010**) y en el mismo sistema de biorreacción de dos unidades empleado en este trabajo, se encontró un índice de crecimiento de 1 y una producción de escopolamina de 0,07 mg/g de raíces frescas. Se observa de nuevo aquí una baja producción del alcaloide utilizando el clon transformado (**Ramírez & Suárez, 1993; Cardillo, et al., 2010**).

## Conclusiones

Es posible producir escopolamina en biorreactor a partir de cultivos de raíces no transformadas de *B. candida* con rendimientos en cuanto a índice de crecimiento y concentración de alcaloide similares a los obtenidos en cultivos desarrollados en matraces de Erlenmeyer, lo que evidencia la capacidad de escalar la producción.

Además, al comparar los resultados obtenidos con otros reportados para cultivos de raíces transformadas de la misma especie, se observó que, aunque el proceso de transformación de dichas raíces promueve la generación de biomasa, puede estar afectando de manera negativa la síntesis de escopolamina en las raíces.

Se evidenció, asimismo, que en biorreactor y bajo las condiciones evaluadas en este trabajo, la elicitación con sulfato de cobre no producía el efecto esperado en cuanto a la liberación de escopolamina al medio de cultivo. Para futuros estudios se recomienda probar otros elicitores, como

la L-arginina, que han demostrado tener un efecto positivo como precursores de la escopolamina en cultivos de raíces no transformadas.

## Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

## Bibliografía

- Bulgakov, V. P.** 2008. Functions of rol genes in plant secondary metabolism. *Biotechnology Advances* 26: 318-324.
- Bulgakov, V. P., Tchernoded, G. K., Mischenko, N. P., Khodakovskaya, M. V., Glazunov, V. P., Radchenko, S. V., Zvereva, E. V., Fedoreyev, S. A., Zhuravlev, Y. N.** 2002. Effect of salicylic acid, methyl jasmonate, ethephon and cantharidin on anthraquinone production by *Rubiocordifolia* callus cultures transformed with the rolB and rolC genes. *Journal of Biotechnology* 97: 213-221.
- Bulgakov, V. P., Tchernoded, G. K., Mischenko, N. P., Shkryl, Y. N., Fedoreyev, S. A., Zhuravlev, Y. N.** 2004. The rolB and rolC genes activate synthesis of anthraquinones in *Rubiocordifolia* cells by mechanism independent of octadecanoid signaling pathway. *Plant Science* 166: 1069-1075.
- Bonhomme, V., Laurain-Mattar, D., Lacoux, J., Fliniaux, M. A., Jacquín-Dubreuil, A.** 2000. Tropane alkaloid production by hairy roots of *Atropa belladonna* obtained after transformation with *Agrobacterium rhizogenes* 15834 and *Agrobacterium tumefaciens* containing rolA, B, C genes only. *Journal of Biotechnology* 81: 151-158.
- Cardillo, A.B.; Otálvaro, A.M.; Busto, V.D.; Talou, J.R.; Velásquez, L.M.E.; Giulietti, A.M.** 2010. *Brugmansia candida* hairy root cultures in bioreactors as an anisodamine production system. *Process Biochemistry* 45 (9): 1577-1581.
- Chatterjee, C., Correll, M. J., Weathers, P. J., Wyslouzil, B. E., Walcerz, D. B.** 1997. Simplified acoustic window mist bioreactor. *Biotechnology Techniques* 11: 155-158.
- Doran, P. M.** 1997. Hairy roots: Culture and applications, CRC Press. Amsterdam
- Dörnenburg, H., Knorr, D.** 1995. Strategies for the improvement of secondary metabolite production in plant cell cultures. *Enzyme and Microbiology Technology* 17(8):674-684.
- Flores, H. E., Filner, P.** 1985. Metabolic relationships of putrescine, GABA and alkaloids in cell and root cultures of Solanaceae. En: Newman, K. H., Barz, W., Reinhard, E. eds, Primary and secondary metabolism of plant cell cultures. Springer-Verlag, New York, p. 174-185.
- García, L. A., Perea, M., Reguero, M. T.** 1993. *Brugmansia*: una especie promisoriosa para la producción de alcaloides del tropano. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas* 21: 5.
- Gontier, E., Clément, A., Tran, T. L. M., Gravot, A., Lièvre, K., Guckert, A., Bourgaud, F.** 2002. Hydroponic combined

- with natural or forced root permeabilization: A promising technique for plant secondary metabolite production. *Plant Science (Limerick)*, 163: 723-732.
- Grajales, E.** 2008. Elicitación de raíces normales cultivadas *in vitro* de *Brugmansia Candida* (Solanaceae) con precursores de alcaloides del tropano. Tesis. Facultad de Tecnologías, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
- Green, K. D., Thomas, N. H.** 1996. An integrated "Root tube" bioreactor/separator for transformed root cultures. *Journal of Fermentation and Bioengineering* 81: 453-457.
- Griffin, W. J., Lin, G. D.** 2000. Chemotaxonomy and geographical distribution of tropane alkaloids. *Phytochemistry* 53: 623-637.
- Guillon, S., Trémouillaux-Guiller, J., Pati, P. K., Rideau, M., Gantet, P.** 2006. Hairy root research: Recent scenario and exciting prospects. *Current Opinion in Plant Biology* 9: 341-346.
- Hamill, J. D., Parr, A. J., Robins, R. J., Rhodes, M. J. C.** 1986. Secondary product formation by cultures of *Beta vulgaris* and *Nicotianarustica* transformed with *Agrobacterium rhizogenes*. *Plant Cell Reports* 5: 111-114.
- Hitaka, Y., Takahashi, Y., Kino-oka, M., Taya, M., Tone, S.** 2000. Culture of red beet hairy roots by considering variation in sensitivity of tip meristems to hydraulic stress. *Biochemical Engineering Journal* 6: 1-6.
- Huang, S. Y., Hung, C. H., Chou, S. N.** 2004. Innovative strategies for operation of mist trickling reactors for enhanced hairy root proliferation and secondary metabolite productivity. *Enzyme and Microbial Technology* 35: 22-32.
- Jung, K. H., Kwak, S. S., Liu, J. R.** 1998. Procedure for biomass estimation considering the change in biomass volume during high-density culture of hairy roots. *Journal of Fermentation and Bioengineering* 85: 454-457.
- Kamada, H., Okamura, N., Satake, M., Harada, H., Shimomura, K.** 1986. Alkaloid production by hairy root cultures in *Atropa belladonna*. *Plant Cell Reports* 5: 239-242.
- Kino-Oka, M., Hitaka, Y., Taya, M., Tone, S.** 1999. High-density culture of red beet hairy roots by considering medium flow condition in a bioreactor. *Chemical Engineering Science* 54, 3179-3186.
- Liu, C. Z., Guo, C., Wang, Y. C., Ouyang, F.** 2003. Comparison of various bioreactors on growth and artemisinin biosynthesis of *Artemisia annua* L. shoot cultures. *Process Biochemistry* 39: 45-49.
- Luczkiewicz, M., Kokotkiewicz, A.** 2005. Co-cultures of shoots and hairy roots of *Genstatinctoria* L. for synthesis and biotransformation of large amounts of phytoestrogens. *Plant Science* 169: 862-871.
- Mahagamasekera, M. G. P., Doran, P. M.** 1998. Intergeneric co-culture of genetically transformed organs for the production of scopolamine. *Phytochemistry* 47: 17-25.
- Martin, Y., Vermette, P.** 2005. Bioreactors for tissue mass culture: Design, characterization, and recent advances. *Biomaterials* 26: 7481-7503.
- Niño, J., Gallego, C. M., Correa, Y. M., Mósquera, O. M.** 2003. Production of scopolamine by normal root cultures of *Brugmansia candida*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 74: 289-291.
- Otálvaro A.** 2009. Evaluación de un sistema de biorreacción para la producción de escopolamina por cultivo de raíces de *Brugmansia candida*. Tesis de Doctorado. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Perry, D.A.** 1981. Handbook of vigour test methods. International Seed Testing Association. Zurich, Switzerland. p. 72
- Piñeros, Y.** 2005. Producción de escopolamina e hiosciamina mediante cultivo *in vitro* de raíces de *Brugmansia candida*. Tesis de Maestría. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Pitta-Álvarez, S.I.** 1998. Producción *in vitro* de alcaloides del tropano empleando raíces transformadas de *Brugmansia candida*. Tesis. Departamento de Microbiología, Inmunología y Biotecnología, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, p. 214.
- Pitta-Álvarez, S. I., Giulietti, A. M.** 2001. Hairy roots of *Brugmansia candida* that grow without agitation: Biotechnological implications, *Biotechnology progress* 17(4): 661-664.
- Ramírez, Y., Suárez, W.** 1993. Contribución al estudio del género *Brugmansia* mediante el cultivo de tejidos vegetales *in vitro* II. Tesis. Facultad de Ciencias, Departamento de Farmacia, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Savitha, B. C., Thimmaraju, R., Bhagyalakshmi, N., Ravishankar, G. A.** 2006. Different biotic and abiotic elicitors influence betalain production in hairy root cultures of *Beta vulgaris* in shake-flask and bioreactor. *Process Biochemistry* 41: 50-60.
- Suresh, B., Thimmaraju, R., Bhagyalakshmi, N., Ravishankar, G. A.** 2004. Polyamine and methyl jasmonate-influenced enhancement of betalain production in hairy root cultures of *Beta vulgaris* grown in a bubble column reactor and studies on efflux of pigments. *Process Biochemistry* 39: 2091-2096.
- Suresh, B., Bais, H. P., Raghavarao, K., Ravishankar, G. A., Ghildyal, N. P.** 2005. Comparative evaluation of bioreactor design using *Tagetespatula* L. hairy roots as a model system. *Process Biochemistry* 40: 1509-1515.
- Takahashi, Y., Hitaka, Y., Kino-oka, M., Taya, M., Tone, S.** 2001. Evaluation of growth property of red beet hairy roots depending on condition of inocula and its application to culture control with fuzzy logic theory. *Biochemical Engineering Journal* 8: 121-127.
- Veena, V., Taylor, C. G.** 2007. *Agrobacterium rhizogenes*: Recent developments and promising applications. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant* 43: 383-403.
- Weathers, P. J., Kim, Y. J.** 2001. Transformed roots of *Artemisia annua* exhibit an unusual pattern of border cell release. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant* 37: 440-445.

**Wink, M.** 1987. Physiology of the accumulation of secondary metabolites with special reference to alkaloids. En: Constabel, F., Vasil, I. eds. Cell culture and somatic cell genetics of plants. Vol 4: Cell culture in Phytochemistry, Academic press, p. 17-41.

**Wyslouzil, B. E., Whipple, M., Chatterjee, C., Walcerz, D. B., Weathers, P. J., Hart, D. P.** 1997. Mist deposition onto hairy root cultures: Aerosol modeling and experiments. Biotechnology Progress 13: 185-194.

**Zobayed, S. M. A., Saxena, P. K.** 2003. *In vitro*-grown roots: A superior explant for prolific shoot regeneration of St. John's wort (*Hypericum perforatum* L. cv 'New Stem') in a temporary immersion bioreactor, Plant Science 165: 463-470.

**Zobayed, S., Saxena, P. K.** 2004. Production of St. John's wort plants under controlled environment for maximizing biomass and secondary metabolites. In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant 40: 108-114.

# Notas sobre la vegetación desértica del Parque Eólico Jepírachi, Alta Guajira, Colombia

Gabriel Pinilla-Agudelo\*, Silvio Zuluaga-Ramírez

Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

## Resumen

A fin de describir la vegetación del Parque Eólico Jepírachi (municipio de Uribia, Alta Guajira), se realizó un muestreo entre el 24 de septiembre y el 1 de octubre de 2001. En el área domina una comunidad vegetal compuesta por las especies *Castela erecta*, *Prosopis juliflora* y *Opuntia caracasana*. En general, la estructura presenta coberturas bajas, abundancias moderadas y portes reducidos. La mayor parte del matorral se distribuye en las terrazas, superficies de denudación y dunas, muy expuestas a vientos fuertes, los cuales ocasionan una xeromorfia acentuada y procesos de 'anemomorfosis' en las plantas.

**Palabras clave:** desierto, xeromorfosis, viento, anemomorfosis, Jepírachi, Alta Guajira.

## Notes on desert vegetation of the Jepírachi Wind Farm in the Alta Guajira, Colombia

## Abstract

In order to describe the vegetation of the Jepírachi windfarm (Uribia, Alta Guajira), samples were taken from 24 September to 1 October 2001. The plant community in the area is mainly composed of *Castela erecta*, *Prosopis juliflora* and *Opuntia caracasana*. In general, the predominant structure is of sparse coverage, moderate abundance and reduced height. Most of the scrubs are distributed on the terraces, denudation surfaces and dunes, very exposed to strong winds. Winds induce xeromorphic characteristics in plants, also causing processes of anemomorphosis.

**Key words:** Desert, xerophytia, wind, anemomorphosis, Jepírachi, Alta Guajira.

## Introducción

El bioma desértico tropical de La Guajira se ha venido estudiando desde inicios de los años 40, con los aportes de **Dugand** (1941), que continuaron 20 años después en los estudios de **Hernández, et al.** (1963) y **Espinal & Montenegro** (1963) y, posteriormente, en los de **Rieger** (1976). Recientemente, **Rangel** (2012) recopiló los aspectos florísticos de la región Caribe, trabajo en el cual incluyó una descripción fitosociológica que amplía los resultados del estudio de **Rieger** (1976) en la península.

Uno de los factores que modelan las formaciones y el paisaje en la Alta Guajira son los vientos extremadamente fuertes. El primer efecto directo del viento es el arrastre de la humedad del aire, pero, además, el viento es muy efectivo en el transporte de arena de cierto tamaño, lo que ejerce una acción abrasiva sobre el paisaje (**Okín, et al.**, 2006). Igualmente, la formación de dunas y su movimiento se deben a dicho factor. A pesar de la importancia del viento en los desiertos, no se ha hecho suficiente énfasis en las respuestas de la vegetación a esta fuerza física y solo se ha documentado la forma en

que las especies leñosas se achaparran y la deformación de la arquitectura de las plantas en el sentido en que sopla el viento (efecto bandera) (**Hernández, et al.**, 1995a).

El objetivo del presente artículo es dar a conocer algunas características fisonómicas, florísticas y estructurales de la vegetación del Parque Eólico Jepírachi, ubicado en una de las zonas con mayor fuerza del viento en el país (**Pinilla, et al.**, 2009), el cual es muy importante por ser el primero de su clase en Colombia.

## Generalidades del área de estudio

El Parque Eólico Jepírachi está ubicado en la Alta Guajira, cerca de Puerto Bolívar, al oeste de Bahía Portete (Figura 1), en el municipio de Uribia, departamento de La Guajira. Las coordenadas del sitio de estudio son 72° este y 12° 15' norte (**Peláez, et al.**, 2004) y su extensión es de 3.000

## \*Correspondencia:

Gabriel Pinilla-Agudelo, gapinillaa@unal.edu.co

**Recibido:** 12 de agosto de 2013

**Aceptado:** 7 de marzo de 2014

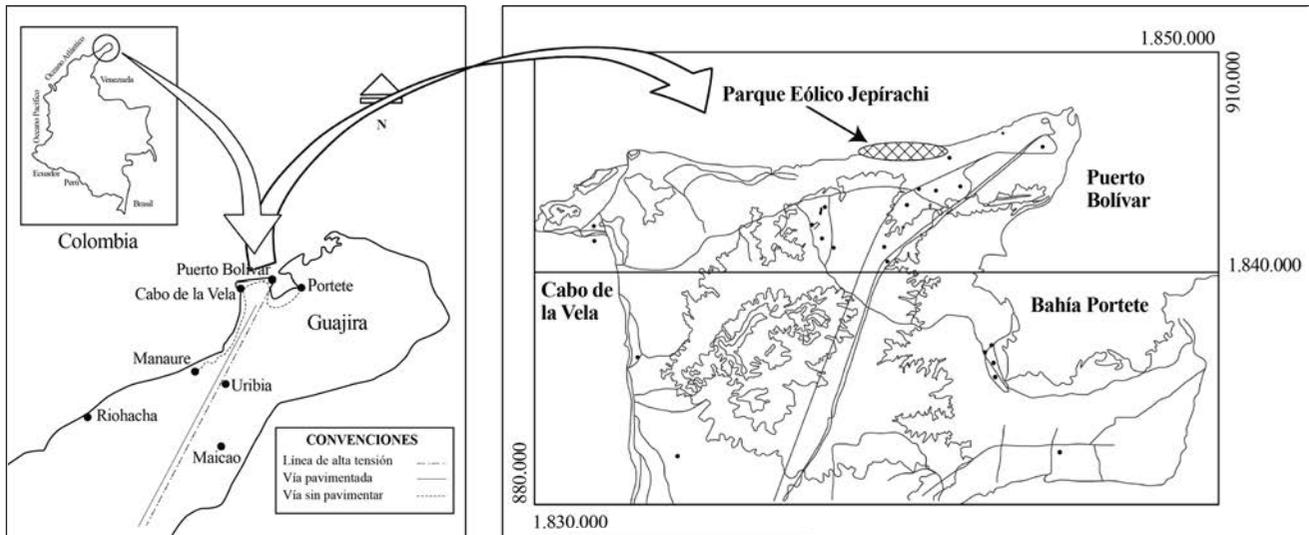


Figura 1. Ubicación del Parque Eólico Jepirachi en La Guajira, Colombia

hectáreas. Esta zona corresponde geológicamente a una mesa de areniscas calcáreas que se extiende desde el Cabo de la Vela hasta Puerto Estrella (IGAC, 1977). Localmente hay formaciones holocénicas de dunas de arena y depósitos aluviales a lo largo de los arroyos. También se dan, en sitios localizados, condiciones plano-depresionales con sedimentos altamente salinos. En el Cabo de la Vela y en Bahía Honda se reportan valores de 158 y 178 mm anuales de precipitación, respectivamente (IGAC, 1977); Rangel (2012) registra valores de 249,5 mm anuales para Puerto Bolívar y 221 para Puerto López, estaciones ubicadas en el municipio de Uribia. La temperatura media anual alcanza los 28 °C y la radiación solar es superior a 600 cal cm<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> (IDEAM, 1998). El clima es, por lo tanto, desértico tropical, y sus efectos se observan con vigor en la zona de estudio (bioclima tropical xérico, Rivas-Martínez, 2008). En la Alta Guajira el viento sopla en dirección este-oeste y este-nordeste con velocidades que fluctúan entre 3 y 18 m/s (Rodríguez, 2004). Entre marzo de 2004 y julio de 2005, Pinilla, et al. (2009) registraron en el parque Jepirachi un promedio de 9,2 m/s entre 10 y 20 m de altura; según estos autores, el promedio mensual esperado a 60 m de altura es de 12 m/s; los promedios mensuales más bajos ocurren en septiembre y octubre, con velocidades de 6 y 6,5 m/s, respectivamente. Para el resto de la península de La Guajira la velocidad de los vientos oscila entre 5 m/s y 11 m/s, y para Riohacha, el promedio anual es de 4 m/s (UPME & IDEAM, 2006). La fisiografía origina suelos de características típicas de aridisoles (Haplocambids, Haplocalcids y, en menor proporción, Haplosalids) y de entisoles desarrollados en los materiales arenosos de las dunas (Torripsamments) (EPM, 2002).

En lo relacionado con las condiciones socioeconómicas, la región se encuentra en el territorio del resguardo indígena de la comunidad Wayúu. Al parecer, la ocupación y el uso de esta región comenzaron hace 2.500 años (EPM, 2002).

#### Las formaciones vegetales del área

El área de estudio se encuentra dentro de la zona de vida del matorral desértico tropical, según la clasificación de Holdridge (1982), del *Arid temperate life zone* según Chapman (1917), y del bioclima tropical xérico, según Rivas-Martínez (2008). La formación dominante corresponde al matorral desértico (Hernández, et al., 1995b), que se divide, a su vez, en diferentes grupos de acuerdo a las características de las especies presentes en el lugar. En el área del parque eólico se encuentran el matorral desértico micrófilo con predominio del trupillo, *Prosopis juliflora* (Sw.) DC., el matorral desértico nanófilo, dominado por la matapuerca, *Castela erecta* Turp., el matorral desértico crasicale, caracterizado por cactáceas como el cardón, *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb. y la tuna, *Opuntia caracasana* Salm – Dyck, y el matorral desértico psammófilo, compuesto por plantas psamófitas y halófitas como la verdolaga de playa, *Sesuvium portulacastrum* (L.) L., y el platanito, *Batis marítima* L. Los dos primeros matorrales imperan en casi toda la zona del parque, pero el matorral nanófilo se intercala con los demás según las condiciones de exposición al viento y las características edáficas de cada sector (Hernández, et al., 1995b). El matorral psammófilo se presenta en algunas pequeñas áreas costeras, frente a la desembocadura de los arroyos, donde se forman dunas de condiciones húmedas. Hacia las terrazas se presentan dunas muy secas donde se encuentra *Sporobolus virginicus* (L.) Kunth y, ocasionalmente, *S. griseus*, *Jatropha gossypifolia*

L. y *Calotropis procera* (Aiton) Dryand., especies que ayudan a estabilizar y arraigar las dunas. Sobre *C. procera*, no obstante, hay que señalar que es una especie introducida que podría estar afectando el desarrollo de la sucesión natural de la zona. En los arroyos y en inmediaciones de los jagüeyes se presenta el matorral desértico micrófilo dominado por *P. juliflora*, pero con un mayor desarrollo de su altura y cobertura debido a las condiciones favorables de un mejor nivel freático y por estar al abrigo del viento en las áreas depresionales y en los jarillones.

El matorral desértico nanófilo es una formación extensa, rala y dispersa que cubre un paisaje amplio de condiciones fisiográficas y edáficas barridas por fuertes vientos, los cuales incrementan las características de sequedad y provocan una erosión eólica extrema sobre superficies planas elevadas y levemente basculadas hacia el mar, que corresponden a áreas de denudación y terrazas marinas (EPM, 2002). Se encuentran, también, llanuras costeras en el sector comprendido entre la ranchería Kasiwolín y el litoral, así como campos de dunas formados por acumulación de arena fina transportada por el viento, generalmente adyacentes a la franja costera.

## Materiales y métodos

### Muestreo de la vegetación

Se partió de una ‘fotointerpretación’ previa, en la cual se identificaron las unidades fisiográficas predominantes (superficies de denudación planas y disectadas, playas, dunas, terrazas, corredores aluviales) y en campo se ubicaron los sitios de muestreo. El muestreo se realizó entre el 24 de septiembre y el 1 de octubre de 2001. Se empleó el método del transecto en línea (Matteucci & Colma, 1982), consistente en el censo detallado de la vegetación a lo largo de líneas de

diferente longitud, la cual dependió de la extensión ocupada por la vegetación. De esta manera, en los matorrales de los planos de denudación el ancho fluctuó entre uno y cinco metros y el largo entre 40 y 120 m, mientras que en los matorrales de los arroyos estas dimensiones oscilaron entre 1,5 m de ancho y 30 y 100 m de largo. En cada transecto se registró el número de individuos de las especies presentes. Se hicieron observaciones generales en torno a la fisonomía y se midieron la cobertura y la altura de las plantas en las intersecciones sobre la línea en cada sector del parque. La identificación taxonómica se realizó en el Herbario Nacional Colombiano del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional (sede Bogotá). El material se encuentra hoy en el depósito de dicho herbario.

### Análisis

Para obtener las coberturas relativas de las especies, sus valores correspondientes en las intersecciones se tradujeron a porcentajes de acuerdo al área de cada transecto. Posteriormente, se hizo una segunda relativización teniendo en cuenta todos los transectos. El análisis de correspondencias linealizado (*detrended correspondance analysis*, DCA) se realizó con dichos valores de cobertura doblemente relativizada mediante el empleo del programa PC-ORD (McCune & Mefford, 1995).

## Resultados y discusión

### Fisonomía

La comunidad estudiada en el área es de porte reducido (Figura 2) debido a las condiciones desfavorables del suelo, la escasez de agua y los vientos fuertes (EPM, 2002). La fisonomía se ve influenciada notoriamente por



**Figura 2.** Comunidad de *Castela erecta* del parque eólico Jepírachi, en la cual se aprecia el “abanderamiento” de un ejemplar de *Prosopis juliflora*.

la exposición al viento, el cual ejerce una fuerte presión de adaptación por anemomorfosis (Váczy, 1980) y provoca en las plantas respuestas como el ‘abanderamiento’. El “efecto bandera”, estudiado desde hace tiempo en sitios como las islas Británicas (Oliver, 1960) y Hawai (Noguchi, 1979), constituye un alargamiento del follaje de la planta en el sentido en que predomina la dirección del viento y es mayor en aquellas áreas donde la fuerza y la velocidad del viento son elevadas, es decir, en los sitios más expuestos a la acción eólica. Este fenómeno es común en árboles y arbustos como *P. juliflora* (Figura 2) y *Parkinsonia praecox* (Ruiz & Pav.) Hawkins, pero se presenta incluso en plantas bajas como *C. erecta*. El efecto bandera es uno de los fenómenos que ocurren en todos los matorrales desérticos del área, en especial en sitios de alta exposición al viento, con velocidades promedio de 9,2 m/s (Pinilla, *et al.*, 2009).

La fuerza del viento ejerce otro efecto importante sobre la fisonomía, el cual se manifiesta regularmente en *O. caracasana*, cuyos cladodios, o segmentos del tallo articulados unos con otros, se disponen de tal manera que sus filos o cantos se sitúan en contra del viento, reduciendo así el área de contacto y evitando la posible caída de la planta cuando el viento es muy fuerte. Para este efecto se propone la denominación de “enfilamiento”, el cual se puede observar en la figura 3, en la cual se observa cómo las plantas de *O. caracasana* tienden a estar en un solo plano.



**Figura 3.** Efecto de “enfilamiento” en *Opuntia caracasana*. Nótese la ubicación de la mayoría de los cladodios de las tunas en un solo plano, en el cual los cantos se ubican contra el viento.

Las adaptaciones generales a las condiciones desérticas en estas zonas de alta exposición y velocidad del viento se ven incrementadas en las manifestaciones fisonómicas por la carencia de agua, y están presentes también en otro tipo de formaciones edáficas con acentuado déficit hídrico a través del xeromorfismo (Larcher, 1975). Algunas de tales estrategias ante la aridez son la succulencia, la microfilia y la pérdida temporal o estacional del follaje (Hernández, *et al.*, 1995a; Allaby, 2001). Existen otros tipos de adaptaciones morfológicas que no necesariamente responden a las condiciones usuales de aridez del área, entre las cuales se pueden mencionar las observadas en las plantas del Parque Eólico Jepírachi que mencionamos a continuación.

*Tortuosidad*: formación de intrincados y complejos laberintos de ramas y ramitas que se entrecruzan en todas las direcciones. Esta puede ser una respuesta a la defoliación periódica, pero también genera estructuras más resistentes a la fuerza del viento. Es muy común en *P. juliflora*, *C. erecta*, *Bursera* sp. Jacq. ex L. y *P. praecox*, especialmente en los matorrales de las terrazas y de los arroyos.

*‘Aparasolamiento’*: formación de una copa plana o “parasol”, a manera de pagoda, en la que el follaje se ubica en el plano superior y presenta menor resistencia al viento. Esta característica es propia de *P. juliflora*, la cual se encuentra en los matorrales de los jagüeyes y de los arroyos, donde hay cierta protección contra los efectos eólicos.

‘*Macollamiento*’: formación de estructuras semejantes a macollas, alargadas en la dirección del viento y de baja altura. En las raíces de estas estructuras se acumula arena, formando pequeños montículos que favorecen su consolidación, tal como ocurre en los matorrales de las dunas. Estas estructuras son frecuentes en *S.virginicus*.

‘*Achaparramiento*’: este fenómeno ocurre en la mayoría de las especies afectadas por el viento, aunque hay otros factores asociados como la sequía, las restricciones edáficas y nutricionales, la neblina y la escasa radiación solar (Lamberts, et al., 2008). Dicho enanismo en las plantas es más común en los matorrales desérticos de las superficies de denudación, de las terrazas, de las

dunas altas y de las playas. En *C. erecta* se presenta con mucha frecuencia, principalmente cuando se encuentra en condiciones de exposición al viento como los matorrales desérticos de superficies de denudación y de terrazas y dunas bajas.

*Crecimiento postrado*: las plantas se desarrollan y crecen a ras del suelo, de manera tal que parecen formar un tapete, con lo que reducen la resistencia a la acción del viento. Esta estrategia se observa en *J.gossypifolia*, *P. juliflora* y *C. erecta*, en especial cuando hacen parte de los matorrales desérticos de las superficies de denudación y de las dunas bajas. *S. portulacastrum*, del matorral de las dunas, también desarrolla esta estrategia.

**Tabla 1.** Composición de los diferentes transectos de vegetación en el área del Parque Eólico Jepírachi – Guajira. Los valores de las especies corresponden a la cobertura relativa y al número de individuos a la derecha. Las especies se ordenaron según la frecuencia absoluta. Colector-número GPCV: Gabriel Pinilla – Cabo de la Vela

No. del transecto	1	2	3	4	5	6	7	8
Localidad	Arroyo Apure 1	Arroyo Apure 2	Arroyo Taruásaru	Mushalerrain	Jagüey en Arütkejüi	Arütkejüi	Dunas altas en Arütkejüi	Dunas bajas en Arütkejüi
Longitud del transecto (m)	30	100	30	90	120	100	120	100
Área del transecto (m <sup>2</sup> )	45	1000	300	90	575	200	805	100
Unidad fisiográfica	Arroyo 1	Arroyo 2	Arroyo 3	Superficie disectada 1	Jagüey	Superficie plana 1	Dunas altas	Dunas bajas
<i>Castela erecta</i>	2,33 - 4		0,21 - 1	8,7 - 28	3,93 - 12	9,5 - 24	0,26 - 1	52,99 - 15
<i>Prosopis juliflora</i>	41,37 - 21	68,05 - 19	84,66 - 15	3,92 - 8	54,16 - 13	18,58 - 7	24,69 - 79	
<i>Opuntia caracasana</i>	12,17 - 16		0,62 - 13		0,02 - 5	0,018 - 4	0,006 - 1	
<i>Stenocereus griseus</i>				0,05 - 4		0,22 - 1		0,06 - 1
<i>Jatropha gossypifolia</i>	9,42 - 32					0,14 - 1		13,98 - 113
<i>Lycium tweedianum</i>	1,48 - 4		0,001 - 1	0,68 - 4			11,42 - 39	
<i>Melocatus</i> sp.				0,002 - 1				
<i>Parkinsonia praecox</i>						4,02 - 3		
<i>Pereskia guamacho</i>								
<i>Bursera</i> sp.			2,66 - 1					
<i>Cnidosculus urens</i>	1,37 - 4							
<i>Caesalpinia coriaria</i>				0,83 - 2				
<i>Sesuvium portulacastrum</i>							0,005 - 1	
<i>Haematoxylum brasiletto</i>				0,03 - 1				

No. del transecto	9	10	11	12	13			
Localidad	Torre EPM en Arütkañüi	Kasushi 1	Kasushi 2	Kasiwolin	Terrazas en Kasiwolin	No tot ind.	Frecuencia absoluta	Colector-número
Longitud del transecto (m)	60	40	80	60	120			
Área del transecto (m <sup>2</sup> )	120	80	160	120	360			
Unidad fisiográfica	Superficie plana 2	Superficie plana 3	Superficie plana 4	Superficie disectada 2	Terraza			
<i>Castela erecta</i>	15,71 - 17	3,34 - 6	1,95 - 7	7,54 - 18	12,5 - 48	181	12	GPCV13
<i>Prosopis juliflora</i>		23,13 - 14	6,36 - 5	7,26 - 4	0,77 - 2	187	11	GPCV8
<i>Opuntia caracasana</i>	0,33 - 18	5,1 - 57	0,3 - 18	2,29 - 19		151	9	GPCV2
<i>Stenocereus griseus</i>	0,18 - 11	0,21 - 8	0,3 - 2	0,05 - 3	0,001 - 2	32	8	GPCV7
<i>Jatropha gossypifolia</i>					0,008 - 1	147	4	GPCV5
<i>Lycium tweedianum</i>						48	4	GPCV1
<i>Melocactus</i> sp.	0,03 - 1	0,125 - 5			0,003 - 1	8	4	GPCV10
<i>Parkinsonia praecox</i>			2,5 - 2			5	2	GPCV14
<i>Pereskia guamacho</i>			1,25 - 1			2	2	GPCV4
<i>Bursera</i> sp.		3 - 1	5 - 1			2	2	GPCV9
<i>Cnidosculus urens</i>						4	1	GPCV3
<i>Caesalpinia coriaria</i>						2	1	GPCV12
<i>Sesuvium portulacastrum</i>						1	1	GPCV6
<i>Haematoxylum brasiletto</i>		3,34 - 6				1	1	GPCV11

### Composición florística

La vegetación del parque eólico corresponde a la amplia dominancia de la comunidad de *P. juliflora*, *C. erecta*, *O. caracasana* y *J. gossypifolia*, especies que ostentan el mayor número de individuos (Tabla 1). Entre las especies frecuentes se encuentran *S. griseus* y *Lycium tweedianum* Griseb., y especies poco frecuentes como *Melocactus curvispinus* Pfeiff. (en la región solo se encuentra esta especie del género *Melocactus* según el estudio de **Fernández & Xhonneux**, 2002), *P. praecox*, *Cnidosculus urens* (L.) Arthur, *Pereskia guamacho* F.A.C.Weber, *Caesalpinia coriaria* (Jacq.) Willd, *Bursera* sp., *S. portulacastrum* y *Haematoxylum brasiletto* H. Karst.

Es notoria la sociabilidad de algunas especies vegetales como *O. caracasana*, asociada a *P. juliflora* y a *C. erecta* en los matorrales de las superficies de denudación, al igual que

*L. tweedianum* a los arbustos de *P. juliflora* en los matorrales de las dunas altas. En los matorrales de las dunas bajas, *J. gossypifolia* se asocia a las macollas de *C. erecta*.

*C. erecta* es un arbusto espinoso de hojas caducas y nanófilas que junto con *P. juliflora* y *O. caracasana* conforma un matorral que corresponde a la clase *Opuntio caracasanae - Prosopietea juliflorae*, al orden *Parkinsonio praecocis - Casteletalia erectae* y a la alianza *Stenocereus grisei - Castelion erectae* (Rangel y Garay, en **Rangel**, 2012). Las asociaciones descritas por **Rangel** (2012) para esta alianza son *Caesalpinio mollis-Burseretum tomentosae*, *Subpilocereus repandi-Casteletum erectae* y *Melochio crenatae-Casteletum erectae*. Muy probablemente la comunidad del Parque Eólico Jepirachi corresponda a una nueva asociación de *Lycium* y *Castela* que deberá ser estudiada detalladamente en investigaciones posteriores. *L. tweedianum* representa

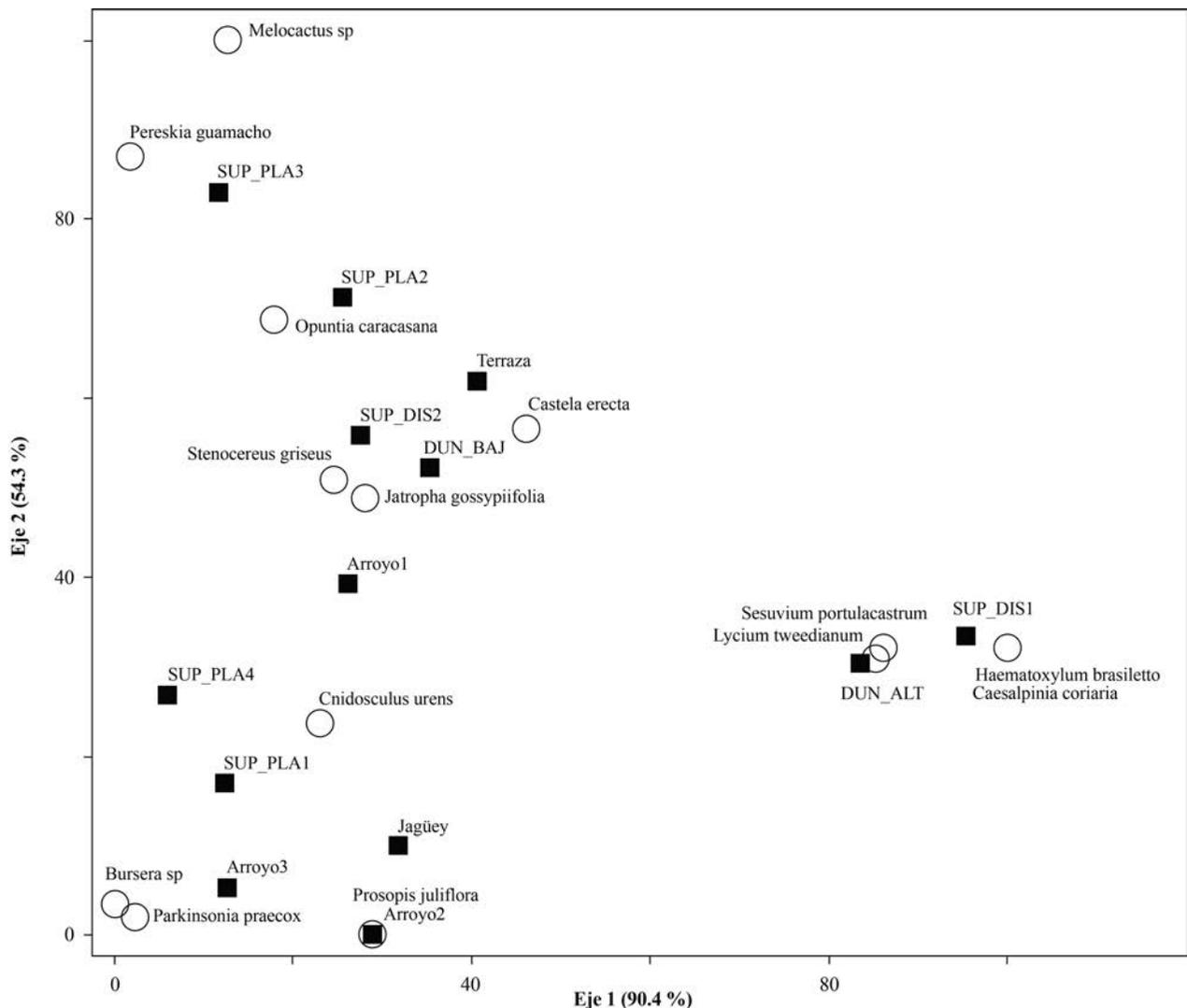
la especie característica exclusiva de esta comunidad (Tabla 1). Existe otra posibilidad para la denominación de esta comunidad, ya que *J. gossypifolia* no es una especie exclusiva de la asociación *Melochio crenatae-Casteletum erectae*, pues se presenta también en la comunidad del parque Jepírachi. De esta manera, la posible asociación de *Lycium* y *Castela* podría ser una variante de una asociación más amplia y extensa en la que *J. gossypifolia* podría ser un taxón exclusivo.

**Distribución y estructura**

La distribución de la vegetación del parque eólico obedece a dos aspectos fisiográficos de la región. En el primero, los sectores más húmedos se encuentran disectados por

pequeños valles que albergan arroyos y arroyuelos protegidos de la acción muy fuerte de los vientos. En el segundo, los sectores más altos están expuestos a la acción eólica en terrazas y superficies de denudación.

En la figura 4 se puede observar una distribución de las especies basada en la cobertura y la posición fisiográfica, desde las áreas más húmedas a las más secas y expuestas al viento. Así, la porción más inferior de la figura indica las posiciones más húmedas, como los arroyos y el jagüey, y las superficies planas, con influencia de aguas freáticas en Arütkejüi y Kasushi 2, donde *P. juliflora* exhibe su mayor cobertura. Otras especies que muestran una clara influencia freática en la superficie plana de Kasushi 2 son *Cnidosculus*



**Figura 4.** Ordenamiento DCA de la vegetación del Parque Eólico Jepírachi. Los círculos corresponden a las especies y los cuadrados a los sitios en las diferentes unidades fisiográficas. DUN\_ALT: dunas altas; DUN\_BAJ: dunas bajas; SUP-PLA1, 2, 3 y 4: superficies planas de denudación; SUP-DIS1 y 2: superficies disectadas.

*urens*, *P. praecox* y *Bursera* sp. En la porción superior de la figura se aprecian la terraza, las superficies planas de la torre en Arütkejüi y de Kasushi 1, la superficie disectada de Kasiwolin y de las dunas bajas, donde, probablemente, la influencia de las aguas freáticas ha desaparecido y representan las posiciones más expuestas a la acción eólica. Entre las especies con mayor cobertura en estas áreas de extrema aridez se encuentran *M. curvispinus*, *P. guamacho*, *O. caracasana*, *C. erecta*, *S. griseus* y *J. gossypifolia*. A la derecha de la figura se encuentran las dunas altas y la superficie disectada en Mushalerrain, donde las especies *S. portulacastrum*, *H. brasiletto*, *C. coriaria* y *L. tweedianum* representan los sitios más extremos donde se registran las menores coberturas.

En general, las especies *P. juliflora* y *C. erecta* se caracterizan por una cobertura dominante en el área del parque (Tabla 1). Dicha cobertura está afectada por el ramoneo del ganado ovino, caprino y caballar, que afecta ostensiblemente el desarrollo de la vegetación. Las especies mencionadas aportan, en su conjunto, el mayor número de individuos de la comunidad. Otras especies con alto número de individuos son *O. caracasana* y *J. gossypifolia*.

La altura o porte promedio de las plantas en cada uno de los transectos del parque Jepírachi se aprecia en la Tabla 2. Es muy reducida y oscila entre 0,34 m en las superficies

disectadas y 4,14 m en los arroyos. Los matorrales de los arroyos crecen un poco más y los árboles, protegidos del viento y con disponibilidad de agua freática, pueden superar los cuatro metros. Como puede verse en la Tabla 2, la altura varía de acuerdo a la posición fisiográfica del transecto; este es un factor importante a tener en cuenta en el impacto eólico sobre la vegetación, de tal forma que las superficies más expuestas, como dunas y terrazas, registran las alturas más reducidas. Por el contrario, las posiciones fisiográficas menos expuestas, como los arroyos y los jagüeyes, exhiben alturas ostensiblemente mayores. En las superficies de denudación planas de Kasushi, *S. griseus*, *O. caracasana* y *P. guamacho* alcanzan un porte ligeramente mayor. Es sorprendente que estas áreas, sujetas a una alta exposición al viento, presenten especies con alturas levemente mayores, en promedio, como *P. guamacho*, la cual alcanza más de 2 m de altura, probablemente porque con su sistema radical más desarrollado aprovecha mejor la disponibilidad de agua en el suelo, en comparación con las especies arbustivas.

### Consideraciones finales

La acentuación de los factores que determinan los fenómenos de xeromorfosis (**Font Quer**, 1988) en La Guajira se pone claramente de manifiesto en la fisonomía de la vegetación del Parque Eólico Jepírachi. Los efectos de la xeromorfosis se evidencian fundamentalmente en los rasgos morfológicos de las plantas sometidas al estrés hídrico predominante y constante a lo largo del año. Sumado a este, otros factores como la excesiva velocidad del viento, pueden causar fenómenos de anemomorfosis (**Váczy**, 1980), pues la abrasión física limita el desarrollo de las plantas y provoca su crecimiento achaparrado típico en toda la zona. La acción del viento no solo produce cambios en la forma y la fisonomía de la vegetación, sino que el transporte de arena y otras partículas finas erosionadas del suelo puede provocar necrosis y rupturas, así como sepultar los individuos vegetales. A largo plazo, la acción del viento puede llevar al marchitamiento de las plantas más expuestas y a la eliminación de las ramas que sobresalen del dosel.

En las regiones costeras, los vientos arrastran niebla marina rica en sales (**Larcher**, 1975), lo que incrementa el estrés hídrico al que están sometidas las plantas. Todos estos factores, sumados a los tensores edáficos, han llevado al establecimiento de una comunidad vegetal en el Parque Eólico Jepírachi que puede considerarse como extremófila. Por supuesto, no solo el viento es el causante de este tipo de anemomorfosis. Hay otros factores, tales como el estrés hídrico y la limitación de nutrientes, que contribuyen a generar estos cambios drásticos en las formas de la vegetación. No obstante, la acción del viento parece ser la explicación principal de las adaptaciones morfológicas de las plantas del Parque Eólico Jepírachi.

**Tabla 2.** Altura promedio de la vegetación de los distintos transectos realizados en el Parque Eólico Jepírachi, Alta Guajira

Transecto	Fisiografía	Altura promedio (m)
Arroyo Apure 1	Arroyo	0,79
Arroyo Apure 2	Arroyo	4,14
Arroyo Taruásaru	Arroyo	1,74
Mushalerrain	Superficie de denudación disectada	0,34
Jagüey en Arütkejüi	Jagüey	1,38
Arütkejüi	Superficie de denudación plana	0,62
Dunas altas en Arütkejüi	Dunas altas	0,90
Dunas bajas en Arütkejüi	Dunas bajas	0,35
Torre EPM en Arütkejüi	Superficie de denudación plana	0,39
Kasushi 1	Superficie de denudación plana	1,09
Kasushi 2	Superficie de denudación plana	1,48
Kasiwolin	Superficie de denudación disectada	0,64
Terrazas en Kasiwolin	Terrazas	0,38

Desde el punto de vista florístico, en el parque eólico predominan las especies propias de la clase *Opuntia caracasana* - *Prosopitea juliflorae* y de la alianza *Stenocereo grisei* - *Castelion erectae* descritas por Rangel (2012). Dadas las condiciones extremófilas descritas, sobresalen en el área especies de una sola comunidad, muy homogénea y siempre compuesta por taxones de la clase y la alianza mencionadas. Esta comunidad presenta una especie característica (*L. tweedianum*), la cual podría conferirle el estatus de asociación, por lo que se propone como una posible nueva asociación de *L. tweedianum* y *C. erecta*.

Las condiciones de disponibilidad de agua según la fisiografía de la zona determinan el porte de la vegetación y su cobertura. De esta manera, la vegetación de mayor porte y follaje más denso se confina a las áreas más protegidas o bajas de la fisiografía, y la de porte mínimo con una cobertura rala, a las áreas más expuestas y con poca disponibilidad de agua freática. Los portes y coberturas intermedios se hallan tanto en los sitios expuestos como en los protegidos, pero, de todas maneras, allí donde las plantas disponen de aguas freáticas.

### Agradecimientos

Este trabajo se realizó en el marco del contrato No. 030211727 firmado entre las Empresas Públicas de Medellín y FAL Ltda. Ingenieros. Se agradece a estas instituciones la financiación del estudio y su invaluable colaboración durante su desarrollo.

### Conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

### Bibliografía

- Allaby M. 2001. Deserts. Facts on File Inc., Nueva York.
- Chapman F. 1917. The distribution of bird life in Colombia: A contribution to a biological survey of South America. Bulletin of the American Museum of Natural History **36**: 1-729.
- Dugand G. 1941. Estudios geobotánicos colombianos: descripción de una sinecia típica en la subxerofitía del Litoral Caribe. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, **4**(14): 135-141.
- Empresas Públicas de Medellín (EPM). 2002. Parque eólico piloto Jepírachi. Estudio de impacto ambiental. Informe Final. 2 volúmenes. Empresas Públicas de Medellín, Medellín.
- Espinal L., Montenegro, E. 1963. Formaciones vegetales de Colombia: memoria explicativa sobre el mapa ecológico. Departamento Agrológico, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá.
- Fernández, J.L., Xhonneux, G. 2002. Novedades taxonómicas y sinopsis del género *Melocactus* Link. & Otto. (Cactaceae)

en Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, **26** (100): 353-365.

- Font Quer, P. 1988. Diccionario de Botánica. Editorial Labor, Barcelona.
- Hernández, J., Saravia, C., Jaramillo, R. 1963. Aspectos biogeográficos y biológicos. Parte II-B. En: Molano J. (ed). Conferencia Latinoamericana para el Estudio de las Zonas Áridas. Informe Nacional. Imprenta Nacional, Bogotá. pp. 49-63.
- Hernández, J. 1991. Ensayo preliminar sobre los biomas terrestres de Colombia. En: Sánchez H., J. Hernández, J.V. Rodríguez, Castaño, C. (eds.). Nuevos Parques Nacionales de Colombia. INDERENA, Bogotá. pp. 28-50.
- Hernández, J., Rueda, V., Sánchez, H. 1995a. El bioma del desierto y las zonas áridas. En: Hernández J., Samper, D. (eds.). Desiertos. Zonas Áridas y Semiáridas de Colombia. Banco de Occidente, Bogotá. pp. 23-110.
- Hernández, J., Rueda, V., Sánchez, H. 1995b. Zonas áridas y semiáridas de Colombia. En: Hernández J., Samper, D. (eds.). Desiertos. Zonas Áridas y Semiáridas de Colombia. Banco de Occidente, Bogotá. pp. 111-162.
- Holdridge, L. 1982. Ecología basada en zonas de vida. IICA, San José de Costa Rica.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 1998. El medio ambiente en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 1977. Zonas de Vida o Formaciones Vegetales de Colombia. Memoria explicativa sobre el Mapa Ecológico. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección Agrológica, Bogotá.
- Lambers, H., Chapin, F.S. (III), Pons, T.L. 2008. Plant physiological ecology. Springer, The Hague.
- Larcher, W. 1975. Physiological plant ecology. Springer-Verlag, New York.
- McCune, B., Mefford, M.J. 1995. PC-ORD. Multivariate analysis of ecological data. Version 2.0. MjM Software, Gleneden Beach.
- Matteucci, S., Colma, A. 1982. Metodologías para el estudio de la vegetación. Organización de Estados Americanos, Monografía No 22, Serie Biología, Washington.
- Noguchi, Y. 1979. Deformation of trees in Hawaii and its relation to wind. Journal of Ecology, **67**(2): 611-628.
- Okin G., Gillette, D., Herrick, J. 2006. Multi-scale controls on and consequences of aeolian processes in landscape change in arid and semi-arid environments. Journal of Arid Environments, **65**(2): 253-275.
- Oliver, J. 1960. Wind and vegetation in the Dale Peninsula. Field Studies Journal, **1**(2): 37-48.
- Peláez J., Peñaranda, M., Herrera, H., Sierra, L., Gil, L., Mesa, J., Rodríguez, L., Sandoval, A., Grecco, A., Aramburo, J., Zuluaga, J., Trujillo, R. 2004. Parque Eólico Jepírachi:

- planeamiento y construcción del proyecto. *Revista Empresas Públicas de Medellín*, **15**(1):101-166.
- Pinilla, A., Rodríguez, L., Trujillo, R.** 2009. Performance evaluation of Jepirachi Wind Park. *Renewable Energy*, **34**(1): 48–52.
- Rangel, J.O.** 2012. La vegetación de la región Caribe de Colombia: composición florística y aspectos de la estructura. En: Rangel J.O. (ed.). *Colombia Diversidad Biótica XII: la región Caribe de Colombia*. Instituto de Ciencias Naturales, Bogotá.
- Rieger, W.** 1976. Vegetations Kundliche untersuchungen auf Guajira-Halbinsel (Nordost-Kolumbien). *Gießener Geographische Schriften*, **40**: 1-142.
- Rivas-Martínez, S.** 2008. Clasificación bioclimática de la tierra. Centro de Investigaciones Fitosociológicas. [http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global\\_bioclimatics-2008\\_00.htm](http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global_bioclimatics-2008_00.htm); fecha de consulta: julio 30 de 2013.
- Rodríguez, L.F.** 2004. Energía eólica: tecnología, situación actual y perspectiva. *Revista Empresas Públicas de Medellín*, **15**(1):27-46.
- Váczy, C.** 1980. *Lexicon Botanicum Polyglottum*. Editura Științifică și Enciclopedică, București.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).** 2006. Atlas de viento y energía eólica de Colombia. Imprenta Nacional, Bogotá.

# Diagnóstico del estado de conservación del ensamble de anfibios y reptiles presentes en los ecosistemas de sabanas inundables de la cuenca del río Pauto, Casanare, Colombia

Teddy Angarita-Sierra<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Yoluka ONG, Fundación de Investigación en Biodiversidad y Conservación

<sup>2</sup>Grupo de investigación en Biogeografía Histórica y Cladística Profunda, Laboratorio de Anfibios, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia

## Resumen

El propósito de este estudio fue hacer la primera aproximación al conocimiento del ensamble de anfibios y reptiles presente en las sabanas inundables de río Pauto y evaluar los efectos de las transformaciones causadas en él por la introducción de cultivos de arroz y pastos exóticos. Para ello se valoró la riqueza de las especies, así como su abundancia, composición y preferencia de hábitat. Se encontró que la dinámica ecológica de los anfibios y reptiles presentes en las sabanas inundables de río Pauto está determinada por tres factores: (1) la estacionalidad, (2) el pulso de inundación y (3) las coberturas vegetales y su transformación. Así mismo, se concluyó que para la herpetofauna de las sabanas inundables, las coberturas más importantes son los bosques de galería, las vegas y las matas de monte. Finalmente, se evidenció que la actividad humana más nociva y la que más tensión ejerce en los ecosistemas de las sabanas inundables del río Pauto es la de los cultivos transitorios como el arroz.

**Palabras clave:** pulso de inundación, estacionalidad, dinámica ecológica, transformación de coberturas naturales.

## Diagnosis of the conservation state of the amphibian and reptile ensembles from flooded savannas in the river Pauto basin, Casanare, Colombia

## Abstract

The main goal of this study was to provide a first approach to the knowledge of the amphibian and reptile ensembles in the flooded savannas of the Pauto River, and to assess the effect derived from the introduction of rice and pasture crops. To do so we first evaluated the richness, abundance, composition and habitat preferences of the species found in the ensemble. We established three factors that determine the ecological dynamics of the ensemble: (1) seasonality, (2) flood pulse and (3) transformations of natural coverts to crops. We concluded that the forest, especially the riparian forest, is the most important natural covert for amphibian and reptile ensembles during the annual climate cycle. Finally, the most harmful and stressful human activity for the flooded savannas of the Pauto River is the practice of transitional crops such as rice.

**Key words:** Flood pulse, seasonality, ecology dynamics, transformations of the natural coverts.

## Introducción

El modelo de desarrollo económico y sociocultural actual de Colombia se basa en la transformación de los ecosistemas naturales para el uso de sus recursos dentro de cadenas productivas. Esto ha generado grandes impactos ambientales que modifican las dinámicas de los ecosistemas, poniendo en riesgo la sostenibilidad de los bienes y servicios ambientales que estos proveen a la sociedad. Así mismo, dichos impactos se han producido sobre ecosistemas escasamente conocidos, lo que hace incalculable la pérdida, deterioro o destrucción derivada de las actividades de este modelo de desarrollo (Mora-Fernández & Peñuela-Recio, 2013).

Sin embargo, en el país aún existen ecosistemas como los bosques húmedos del Chocó biogeográfico y la Amazonia, los manglares de las costas Caribe y Pacífica, y las sabanas de los llanos orientales, entre otros, que, a pesar de su acelerada transformación en los últimos 30 años, conservan una extensión e integridad considerables (Rangel-Ch, 1997, 2004, 2012; Cortés & Rangel-Ch, 2011; Palacios, *et al.*, 2012). Las sabanas inundables del río Pauto en el

### \*Correspondencia:

Teddy Angarita-Sierra, teddy.angarita@yoluka.org.co; tgangaritas@unal.edu.co

Recibido: 3 de septiembre de 2013

Aceptado: 7 de mayo de 2014

departamento del Casanare hacen parte de los ecosistemas que han logrado mantener las condiciones espaciales y ecológicas que permiten evaluar sus atributos, dinámicas y función, así como los bienes y servicios ambientales que proveen a la sociedad y sostienen su naturaleza ecológica (Mora-Fernández & Peñuela-Recio, 2013).

La naturaleza estacional de las sabanas inundables les impone limitaciones para el establecimiento de ensamblajes de anfibios y reptiles, lo que presiona la selección de aquellos organismos lo suficientemente tolerantes a las exigencias climáticas y con una plasticidad adaptativa amplia para afrontar cambios en el paisaje durante los periodos de sequía y lluvias (Wells, 2007). En su evolución, las sabanas han adquirido regímenes hidrológicos (diciembre-marzo: época de sequía; abril-noviembre: época húmeda) que orientan y controlan la renovación de los hábitats, la variabilidad estacional de la producción primaria, el ciclo de nutrientes, el éxito reproductivo y el reclutamiento de la fauna y la flora, así como el mantenimiento de la variabilidad espacio-temporal de los cuerpos de agua que hacen parte de este ecosistema (Montoya, *et al.*, 2011).

En la última década el gobierno nacional, así como empresas privadas, organizaciones no gubernamentales, universidades y centros de investigación, han vuelto su atención hacia los diferentes ecosistemas de Casanare motivados por el acelerado crecimiento económico de la región y las radicales transformaciones de los paisajes naturales de las llanuras. Esto ha generado un creciente número de investigaciones con aportes y avances significativos en el conocimiento de los anfibios y reptiles del departamento.

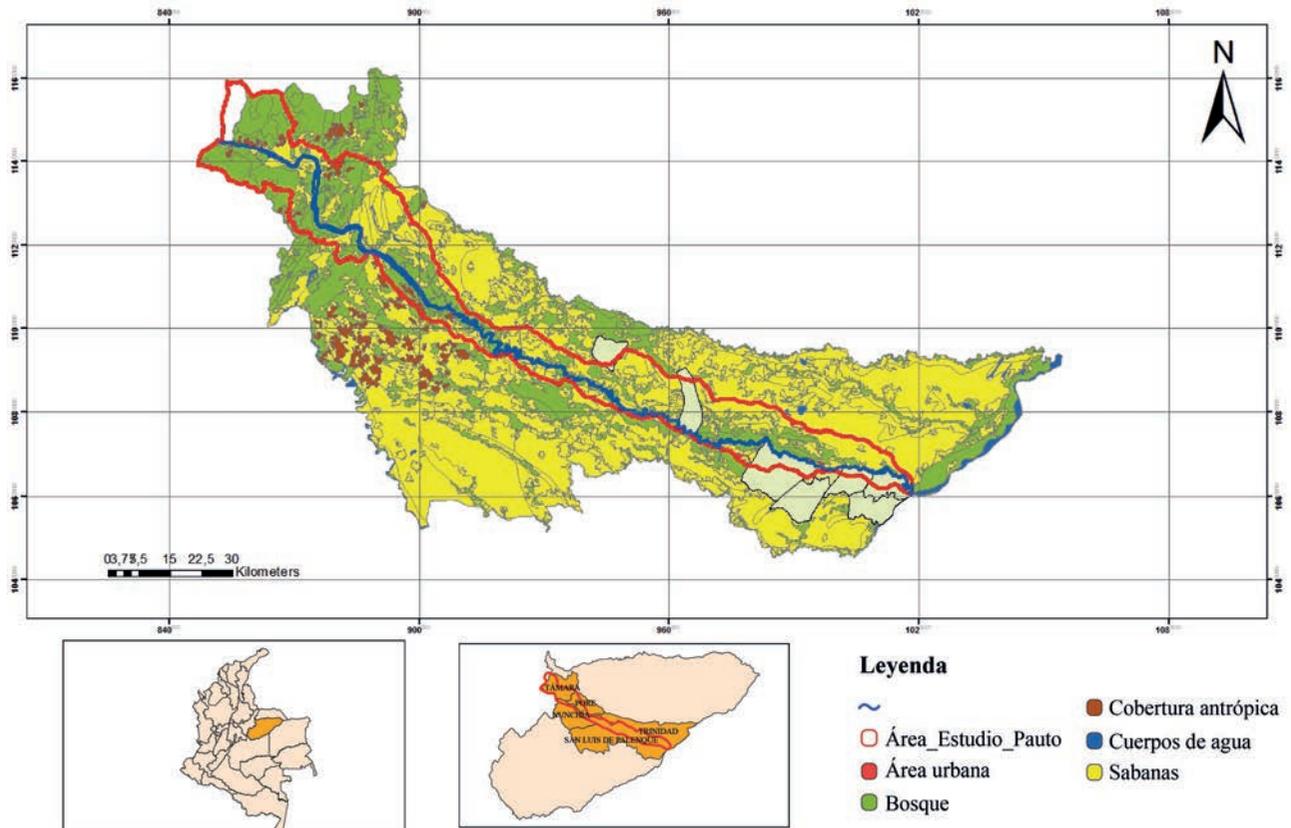
Los registros existentes se remiten únicamente a las regiones aledañas al piedemonte llanero y a las inmediaciones de las riberas del río Orinoco, dejando de lado los 16.000.000 de hectáreas de paisaje de sabanas, bosques de galería y matas de monte, equivalentes al 90 % de los ecosistemas presentes (Angarita-Sierra, *et al.*, 2013). Actualmente, la información sobre la herpetofauna del Casanare se encuentra consignada en un informe técnico sobre el complejo de humedales asociados a los ríos Caranal, Lipa y Cinaruco en el departamento de Arauca (Caro, *et al.*, 2006), en los reportes de reptiles hallados en los municipios de Trinidad y San Luis de Palenque (Cortes & Sánchez-Palomino, 2010), en la actualización realizada por Acosta-Galvis y Alfaro-Bejarano, 2011, sobre el estado de conocimiento de los anfibios y reptiles del Casanare en los últimos cinco años, y en los listados de la fauna y la flora de las reservas de la sociedad civil del nodo Orinoquia (Peñuela, *et al.*, 2011). Recientemente, Angarita-Sierra, *et al.*, 2013, y Mora-Fernández, *et al.*, 2013, redujeron los vacíos de información sobre la herpetofauna del departamento del Casanare, logrando avanzar en el conocimiento de los anfibios y reptiles

presentes en 16 de los 19 municipios del departamento. No obstante, los autores de estos estudios reconocen que aún deben desplegarse mayores esfuerzos en la investigación de su distribución, ecología y estado de conservación, así como de los efectos sobre los ensamblajes de anfibios y reptiles producidos por el cambio en el uso del suelo y la pérdida de coberturas naturales.

Tomando en cuenta lo anotado, este estudio realizó la diagnosis del estado de conservación del ensamblaje de anfibios y reptiles presentes en los ecosistemas de sabanas inundables asociados a la cuenca media y baja del río Pauto con los siguientes objetivos principales: (1) proporcionar una primera aproximación al conocimiento de este ensamblaje de anfibios y reptiles, evaluando su riqueza, composición y preferencia de hábitat, y (2) evaluar los efectos producidos en las comunidades de anuros por la transformación de los ecosistemas naturales debida a la introducción de cultivos de arroz y pastos exóticos.

### Materiales y métodos

Se realizaron dos salidas de campo durante el 2012, la primera en la época de sequía, del 3 al 20 de marzo, y la segunda en la época húmeda, del 5 al 22 de julio, invirtiendo entre 12 y 15 días efectivos de muestreo en cada época. El esfuerzo de muestreo fue de 8 horas/hombre/día, contando con dos a tres personas en el equipo de trabajo en campo. Se establecieron tres campamentos a lo largo de la cuenca del río Pauto: la estación 1, en predios del Colegio Emaús, 5° 8' 40,4" N, 70° 58' 22,6" O, y en las fincas Altamira, 5° 11' 9,77" N, 70° 58' 53,9" O; La Bretaña, 5° 8' 41,2" N, 70° 57' 27,9" O, y Matamoriche, 5° 9' 7,6" N, 70° 58' 5,4" O; la estación 2, en la finca Candalayes, 5° 18' 47,2" N, 71° 22' 5,4" O, y la estación 3: en las fincas La Palmita, 5° 19' 11,4" N, 71° 20' 51" O, El Mirador, 5° 26' 9,1" N, 71° 35' 46,8" O y San Miguel, 5° 24' 49,8" N, 71° 36' 38,4" O. En estas localidades se identificaron las siguientes unidades paisajísticas y sus transformaciones: sabanas (sabanas de valles aluviales de desborde, sabanas inundables típicas, sabanas con influencia eólica), que exhiben marcadas diferencias entre los periodos de sequía y humedad, son hiperestacionales, con largos periodos de estrés hídrico en sus suelos y un régimen anual de lluvias unimodal (Sarmiento, 1984); bosques (bosques de galería, bosques de vega, matas de monte), que ocupan áreas transicionales semiterrestres influenciadas regularmente por aguas continentales que se extienden desde las márgenes de los cursos de agua hacia los límites de las comunidades terrestres alejadas de la influencia del agua; arrozceras (sabanas o bosques transformados en cultivos de arroz) de *Oryza sativa* establecidas sobre los bajos de la sabana, y potreros (sabanas o bosques transformadas en potreros de pastos de *Urochloa humidicola* y *Urochloa decumbens* sembrados sobre las banquetas de la sabana (Figura 1).



**Figura 1.** Zona de estudio: las áreas claras en el mapa representan las áreas muestreadas durante las dos épocas del año.

El levantamiento y caracterización del ensamble de anfibios y reptiles se llevó a cabo mediante tres técnicas: búsqueda libre sin restricciones, trampas de caída, nasas y búsqueda selectiva en hábitats y microhábitats (Angulo, *et al.*, 2006). El muestreo se llevó a cabo durante el día y la noche de forma sistemática, procurando abarcar la mayor cantidad de hábitats y microhábitats posibles en cada jornada. En el día se realizaba la búsqueda de larvas (renacuajos), lagartijas y serpientes diurnas, utilizando redes de arrastre de fondo (no se hizo captura manual o captura directa) para su posterior identificación en el laboratorio. En la noche se buscaban anfibios adultos y jóvenes y lagartijas y serpientes nocturnas recorriendo los mismos hábitats y microhábitats en los se realizaba la búsqueda diurna. La recolección se hizo de forma manual y los individuos encontrados se depositaron en bolsas de tela para su identificación preliminar en campo y posterior determinación definitiva en el laboratorio. Se registraban el hábitat y el microhábitat en los cuales se había recolectado cada individuo. El sistema de clasificación utilizado fue el establecido por Frost, *et al.*, 2006, Lynch, 2006<sup>a</sup>, y Lynch, 2011, para anuros, por Wüster, 2001, Lehr, 2002, Campbell & Lamar, 2004, para serpientes, por Harvey, *et al.*, 2012, Caicedo-Portilla & Dulcey-Cala, 2011, y Ayala, 1986 para lagartos y por Rueda-Almoacid, *et al.*, 2007, para

tortugas y cocodrilos. Todos los especímenes recolectados se depositaron en la colección biológica de anfibios y reptiles del Instituto de Ciencias Naturales (ICN) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá (Anexo 1).

#### *Análisis de datos*

La diagnosis del estado de conservación de la herpetofauna presente en los ecosistemas de sabanas inundables se realizó mediante la evaluación de la perturbación o degradación del hábitat de las comunidades de anfibios y reptiles presentes en cada unidad de paisaje con base en el estudio de la riqueza, la abundancia, la composición relativa, la presencia o ausencia de taxones, la preferencia de hábitat (entendido como el mayor porcentaje de presencias por cobertura), las especies sensibles o tolerantes y los endemismos. Se valoró igualmente la diversidad, la composición y los grados de amenaza según lo establecido por Pedroza-Banda & Angarita-Sierra, 2011, y Cáceres & Urbina, 2009. La diversidad total se estimó mediante dos estimadores de riqueza no paramétricos (Magurran, 1988, Colwell & Coddington, 1994) del tipo *jackknife* de primero y segundo orden utilizando el programa EstimateS (Colwell, 2006), debido a que suponen heterogeneidad en las muestras y son idóneos para estimar la riqueza de anuros y reptiles en el área

de estudio, la cual está compuesta por una gran diversidad de hábitats. Se analizó la diversidad alfa entre las dos épocas del año mediante el índice Shannon-Wiener (H'), que expresa la uniformidad de los valores de importancia de todas las especies de la muestra. La diversidad beta se estimó mediante la comparación gráfica directa de cada una de las coberturas vegetales usando el estimador de similitud Bray-Curtis y la aplicación PAST (Hammer, et al., 2004). Finalmente, para evaluar el uso y la preferencia de hábitat se utilizó la prueba no paramétrica de ji al cuadrado, comparando los valores esperados de cada una de las coberturas evaluadas, así como la preferencia entre las coberturas naturales y transformadas.

**Resultados**

**Diversidad taxonómica**

En el estudio se recolectaron 452 individuos y se obtuvo un total de 48 especies pertenecientes a 36 géneros, 16 familias y cuatro órdenes, de los cuales dos son nuevos registros para el departamento del Casanare, los reptiles *Hemidactylus palaichthus* y *Thamnodynastes dixonii*. Además, se detectaron

dos posibles nuevas especies para la ciencia, una rana del género *Scinax* y una serpiente del género *Drymarchon*. De todas las especies detectadas, el 46 % (23 especies) correspondió a anfibios pertenecientes a 11 géneros y cuatro familias, y el 54 % (25 especies) a reptiles pertenecientes a 24 géneros, 11 familias y tres órdenes. Los géneros más diversos entre los anfibios fueron *Leptodactylus*, con siete especies, *Scinax*, con cinco especies, y *Rhinella*, con dos especies; entre los reptiles el género más diversos fue el de las serpientes *Liophis*, con dos especies (Tabla 1).

**Diversidad total de anfibios**

Los estimadores empleados indicaron que para la época de sequía el número de especies esperadas de anfibios estaba en el rango de 18,81 a 19,8, por lo cual las especies observadas tuvieron un 85,1 % de representatividad según el estimador *jackknife* de primer orden y de 80,8 % según el estimador *jackknife* de segundo orden. En contraste, los estimadores indicaron que el muestreo realizado durante la época húmeda requería un mayor esfuerzo de muestreo o una búsqueda más prolongada para lograr una representatividad aceptable de

**Tabla 1.** Caracterización taxonómica de las especies de anfibios y reptiles encontrados en las sabanas inundables de la cuenca media y baja del río Pauto. El símbolo ✓ indica las especies encontradas para la época húmeda o de sequía.

ANFIBIOS						
Orden	Familia	Género	Especie	Temporada seca	Temporada húmeda	
Anura	Hylidae	Dendropsophus	<i>Dendropsophus mathiassoni</i>	✓	✓	
		Elachistocleis	<i>Elachistocleis ovalis</i>	✓	✓	
		Hypsiboas	<i>Hypsiboas crepitans</i>	✓	✓	
			<i>Hypsiboas lanciformis</i>		✓	
			<i>Hypsiboas pugnax</i>		✓	
		Phyllomedusa	<i>Phyllomedusa hipochondrialis</i>		✓	
		Pseudis	<i>Pseudis paradoxa</i>		✓	
		Scinax	<i>Scinax blairi</i>		✓	✓
			<i>Scinax rostratus</i>		✓	✓
			<i>Scinax ruber</i>		✓	✓
			<i>Scinax sp. nov</i>			✓
	<i>Scinax wandae</i>			✓	✓	
	<i>Scinax x-signatus</i>				✓	
	<i>Trachycephalus</i>		<i>Trachycephalus typhonius</i>			✓
	Leptodactylidae	Leptodactylus	<i>Leptodactylus colombiensis</i>		✓	✓
			<i>Leptodactylus fragilis</i>		✓	✓
			<i>Leptodactylus fuscus</i>		✓	✓
			<i>Leptodactylus insularum</i>		✓	✓
			<i>Leptodactylus linneatus</i>		✓	✓
			<i>Leptodactylus macrosternum</i>		✓	✓
			<i>Leptodactylus sp.</i>			✓
	Leuperidae	Phisalaemus	<i>Phisalaemus fisheri</i>		✓	✓
		Pseudopaludicola	<i>Pseudopaludicola llanera</i>		✓	✓
Bufonidae	Rhinella	<i>Rhinella humboldti</i>		✓	✓	
		<i>Rhinella marina</i>			✓	
Riqueza de especies de anfibios				16	25	

REPTILES							
Orden	Familia	Género	Especie	Temporada seca	Temporada húmeda		
SQUAMATA	Boidae	Enunectes	<i>Enunectes murinus</i>	✓			
		Corallus	<i>Corallus hortulamus</i>	✓	✓		
		Chironius	<i>Chironius carinatus</i>	✓		✓	
		Drymarchon	<i>Drymarchon sp. nov</i>	✓		✓	
		Hidrops	<i>Hidrops triangularis</i>	✓			
		Leptodeira	<i>Leptodeira annulata</i>	✓		✓	
		Leptophis	<i>Leptophis ahaetulla</i>			✓	
		Colubridae	Liophis	<i>Liophis lineatus</i>	✓		
				<i>Liophis melanotus</i>	✓		✓
	Oxibelis		<i>Oxibelis aneus</i>			✓	
	Oxirhophus		<i>Oxirhophus petola</i>			✓	
	Pseudoboa		<i>Pseudoboa newwedii</i>			✓	
		Thamnodynastes	<i>Thamnodynastes dixonii</i>	✓		✓	
	Viperidae	Bothrops	<i>Bothrops atrox</i>	✓		✓	
	Geckonidae	Gonatodes	<i>Gonatodes concinnatus</i>	✓		✓	
		Hemidactylus	<i>Hemidactylus palaichthus</i>	✓		✓	
	Ghymnophthalmi	Ghymnophthalmus	<i>Ghymnophthalmus speciosus</i>	✓		✓	
	Polychrotidae	Aneides	<i>Aneides auratus</i>	✓		✓	
		Ameiva	<i>Ameiva praesignis</i>	✓		✓	
	Teiidae	Cnemidophorus	<i>Cnemidophorus gramivagus</i>	✓		✓	
		Tupinambis	<i>Tupinambis teguixin</i>	✓		✓	
	Iguanidae	Iguana	<i>Iguana iguana</i>	✓		✓	
Crocodylia	Alligatoridae	Caiman	<i>Caiman crocodilus</i>	✓		✓	
TESTUDINES	Chelidae	Chelus	<i>Chelus fimbriatus</i>	✓			
	Podocnemididae	Podocnemis	<i>Podocnemis vogli</i>	✓		✓	
	Testudinidae	Chelonoidys	<i>Chelonoidys carbonara</i>	✓		✓	
Riqueza de especies de reptiles				22	22		
Riqueza total de anfibios y reptiles				38	47		

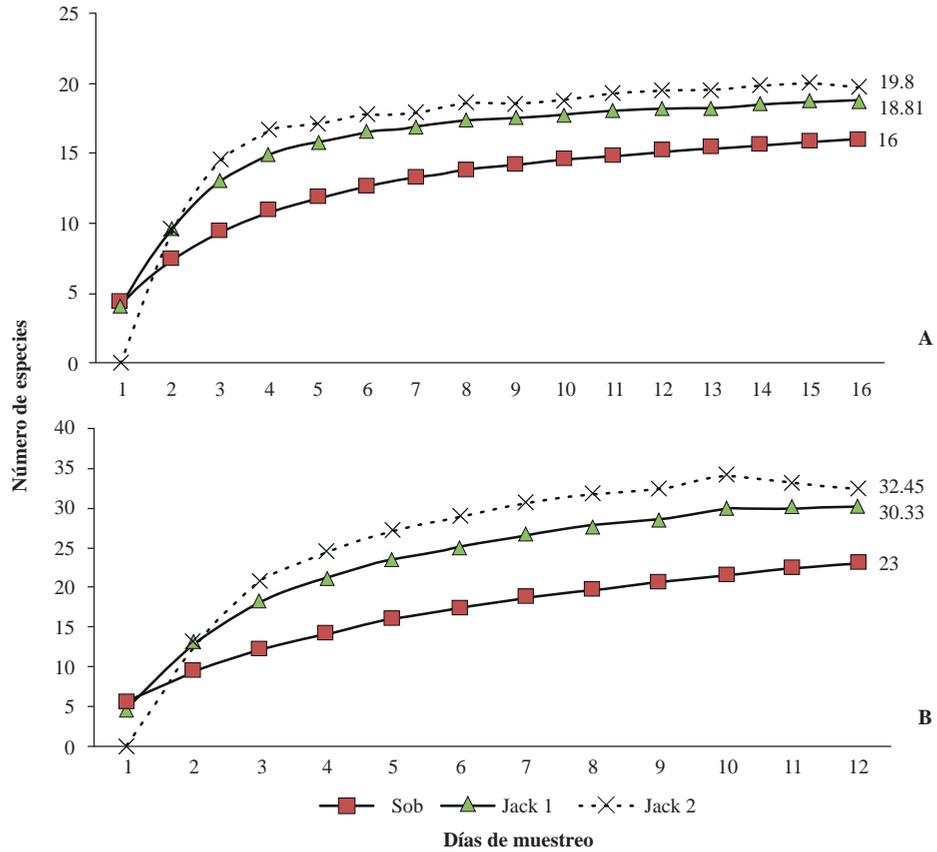
la comunidad de anfibios. Las especies esperadas de anfibios estaban en el rango de 30,33 a 32,45, y las especies observadas tuvieron un 75,8 % de representatividad según el estimador *jackknife* de primer orden y de 71,1 % según el estimador *jackknife* de segundo orden. A pesar de esto, el muestreo durante la época húmeda logró detectar cinco especies más que el muestreo durante la época de sequía (Figura 2).

Se obtuvieron doce lotes de renacuajos con más de 2.500 larvas en total. De las 22 especies de anuros detectadas en forma adulta, solo el 54,5 % de las especies (12 especies) quedó representado en los muestreos de renacuajos. Sin embargo, se detectaron tres especies de Hylidos no registradas (*Hypsiboas pugnax*, *Hypsiboas lanciformis* y *Scinax x-signatus*) en los muestreos de adultos (Tabla 2). Las larvas se encontraron en los siguientes microhábitats: charcos temporales, charcos permanentes, banqueta, bajos, esteros y pozos artificiales. Los charcos temporales mostraron ser los microhábitats preferidos por los anuros para el desarrollo de sus estadios larvarios ( $X^2_{0,95(5) \text{ renacuajos}}: 19,35$ ), seguidos por los bajos y por las banquetas (Tabla 3). Las especies dominantes

en el muestreo fueron *Hypsiboas crepitans* (21,4 %), seguida por *Pseudis paradoxa*, *Scinax x-signatus* (11,9 %), *Leptodactylus fragilis*, *Leptodactylus fuscus* y *Phyllomedusa hipochondrialis* (9,5 %), siendo *H. crepitans* la única especie presente en casi todos los microhábitats.

**Diversidad total de reptiles**

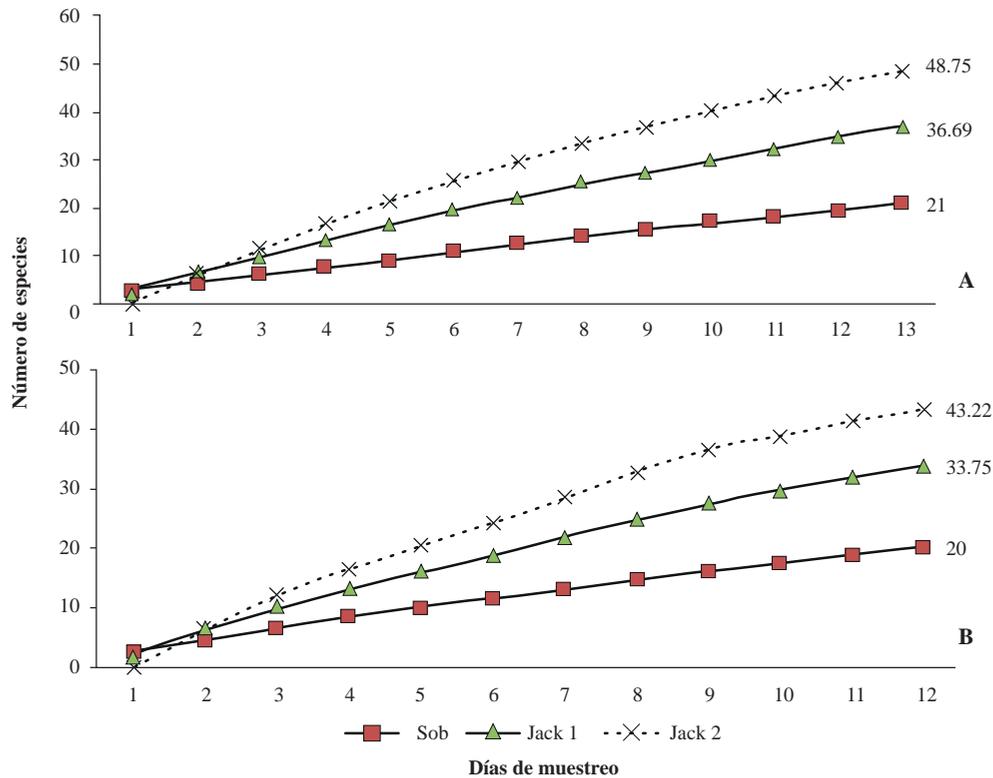
Las comunidades de escamados, tortugas y cocodrilos que se esperaba encontrar en la zona de estudio, tanto en la época seca como en la húmeda, tuvieron poca representación en el muestreo. Los estimadores indicaron que para la época húmeda, el número de especies esperadas de reptiles debían estar en el rango de 33,75 a 42,22, por lo cual las especies observadas tuvieron un 59,3 % de representatividad según el estimador *jackknife* de primer orden y de 46,31 % según el estimador *jackknife* de segundo orden. En la época de sequía la representatividad fue incluso más baja, ya que los estimadores mostraron que las especies esperadas debían estar en el rango de 36,69 a 48,75, equivalente a 57,2 % según el estimador *jackknife* de primer orden y a 43,1 % según el estimador *jackknife* de segundo orden (Figura 3).



**Figura 2.** Curva de acumulación de la especies de anfibios en (a) época de sequía y (b) época húmeda, registradas en las sabanas inundables de la cuenca media y baja del río Pauto

**Tabla 2.** Larvas de anfibios detectadas y los microhábitats asociados durante la época húmeda

Especies	Microhábitat					
	Charcos temporales	Charcos permanentes	Banqueta	Bajos	Esteros	Pozos artificiales
<i>Dendropsophus mathiassoni</i>	✓			✓	✓	
<i>Hypsiboas crepitans</i>	✓	✓	✓	✓		✓
<i>Hypsiboas lanciformis</i>	✓					
<i>Hypsiboas pugnax</i>	✓					
<i>Leptodactylus fragilis</i>	✓		✓	✓		
<i>Leptodactylus fuscus</i>	✓		✓	✓		
<i>Phyllomedusa hypochondrialis</i>			✓	✓		
<i>Pseudis paradoxa</i>	✓			✓	✓	✓
<i>Rhinella humboldti</i>	✓					✓
<i>Scinax rostratus</i>	✓			✓		
<i>Scinax ruber</i>	✓			✓		
<i>Scinax x-signatus</i>	✓			✓		
<i>Scinax wandae</i>	✓			✓		



**Figura 3.** Curva de acumulación de especies de reptiles en (A) época de sequía y (B) época húmeda, registradas en las sabanas inundables de la cuenca media y baja del río Pauto

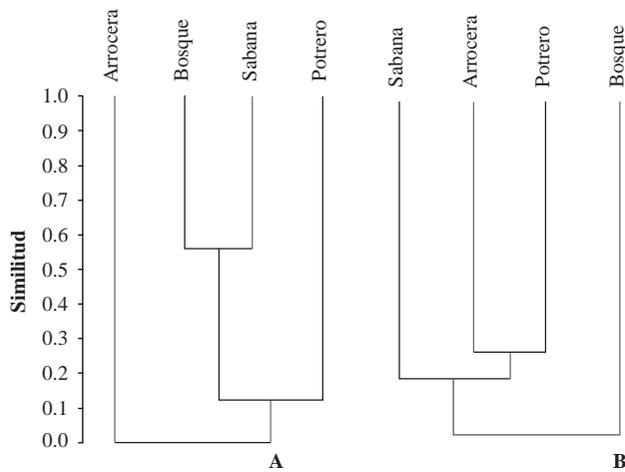
**Variación espacio-temporal del ensamble de anfibios y reptiles**

El efecto derivado de las épocas de lluvia y sequía ocasiona grandes cambios en la riqueza, la abundancia y la composición del ensamble de anfibios y reptiles de las sabanas inundables. Como era de esperarse, se observó un aumento significativo en la riqueza de anfibios entre la época húmeda ( $N_{seca}=16$ ;  $N_{húmeda}=25$ ), y un cambio en la composición del ensamble, pues se sumaron nueve especies no detectadas durante la sequía: *Hypsiboas lanciformis*, *Hypsiboas pugnax*, *Leptodactylus* sp., *Phyllomedusa hypochondrialis*, *Pseudis paradoxa*, *Scinax x-signatus*, *Scinax* sp., *Trachycephalus typhonius* y *Rhinella marina*. Por el contrario, la riqueza de reptiles permaneció constante en las dos épocas el años ( $N_{seca}$  y  $N_{húmeda}=22$ ), pero su composición cambió significativamente en los taxones de serpientes presentes en cada una de las épocas del año (Tabla 1).

En las cuatro coberturas vegetales evaluadas se encontró que durante la época de sequía la biomasa de anfibios y reptiles se concentró mayoritariamente en los bosques (64,4 %, 150 individuos), seguidos por las sabanas (32,6 %, 76 individuos) y los potreros (3 %, 7 individuos). En esta

época las arroceras se encuentran aradas, sin cobertura vegetal de ningún tipo, lo que significa que estas zonas no pueden proporcionar hábitats para los anfibios y reptiles de la región. En contraste, durante la época húmeda la biomasa del ensamble de anfibios y reptiles se distribuye más equitativamente ( $H'_{sequía}=0,7542$ ;  $H'_{húmeda}=1,253$ ) entre los cuatro tipos de cobertura evaluados. Sin embargo, se observó una clara dominancia de la capacidad de carga de las sabanas (48,6 %, 108 individuos) para sostener un mayor número de individuos en comparación con los bosques (20,3 %, 45 individuos), las arroceras (15,8 %, 35 individuos) y los potreros (15,3 %, 34 individuos).

El grado de semejanza en términos de la composición y abundancia de especies entre las cuatro coberturas evaluadas también mostró una gran variación espacio-temporal entre cada época del año y para cada una de las coberturas. Durante la época de sequía, las coberturas más similares fueron los bosques y sabanas, lo cual era de esperarse, ya que estas dos coberturas albergan el 96,8 % de la herpetofauna de las sabanas inundables en este periodo del año. En consecuencia, las coberturas más disímiles fueron los potreros y las arroceras, en las cuales no se encontró



**Figura 4.** Comparación gráfica de la similitud de Bray-Curtis entre coberturas vegetales para cada época del año. A) Época de sequía. B) Época húmeda

ningún individuo, o solo se detectaron individuos de especies tolerantes a condiciones extremas de desecación y baja humedad relativa (*D. mathiassoni*, *L. fuscus*, *S. rostratus*) (Figura 4A).

Durante la época húmeda las coberturas más similares fueron los potreros y las arrocera, y las más disímiles fueron las sabanas y los bosques. En esta época del año las sabanas albergaron el 48,6 % de la biomasa de anfibios y reptiles de las sabanas inundables con una representatividad del 86 % de la especies de anfibios y reptiles presentes en estos ecosistemas. Los bosques, a su vez, albergaron el 20,3 % de la biomasa del ensamble de anfibios y reptiles de estos ecosistemas con una representatividad del 77,3 % de las especies presentes. Esto lleva a que la complementariedad entre las coberturas sea alta, y, además, a que las sabanas y los bosques conformen unidades con ensambles faunísticos propios, con especies únicas y distribuciones de abundancias particulares de cada especie (Tabla 3).

**Tabla 3.** Abundancia relativa de anfibios durante las épocas seca y húmeda

Especie	Época seca en %				Época húmeda en %			
	Potrero	Bosque	Sabana	Arrocera	Potrero	Bosque	Sabana	Arrocera
<i>Dendropsophus mathiassoni</i>	0	2	0	0	3	6	14	7
<i>Elachistocleis ovalis</i>	0	2	0	0	3	6	1	0
<i>Hypsiboas crepitans</i>	0	5	3	0	12	3	12	0
<i>Leptodactylus colombiensis</i>	0	4	2	0	0	19	0	0
<i>Leptodactylus fragilis</i>	83	18	20	0	6	6	30	53
<i>Leptodactylus fuscus</i>	0	7	17	0	12	6	8	13
<i>Leptodactylus insularum</i>	0	1	3	0	0	13	0	0
<i>Leptodactylus linneatus</i>	0	1	0	0	0	6	0	0
<i>Leptodactylus macrosternum</i>	0	11	29	0	35	0	3	17
<i>Leptodactylus sp</i>	---	---	---	---	3	0	0	0
<i>Physalaemus fisheri</i>	0	3	5	0	0	3	0	3
<i>Phyllomedusa hypochondrialis</i>	---	---	---	---	6	6	4	0
<i>Pseudopaludicola llanera</i>	0	33	10	0	6	0	0	7
<i>Pseudis paradoxa</i>	---	---	---	---	6	3	12	0
<i>Rhinella marina</i>	---	---	---	---	0	0	2	0
<i>Rhinella humboldti</i>	0	6	7	0	9	0	4	0
<i>Scinax blairi</i>	0	0	2	0	0	3	0	0
<i>Scinax rostratus</i>	17	2	0	0	0	9	2	0
<i>Scinax ruber</i>	0	7	2	0	0	0	2	0
<i>Scinax wandae</i>	0	1	0	0	0	0	3	0
<i>Scinax sp</i>	---	---	---	---	0	0	1	0
<i>Trachycephalus typhonius</i>	---	---	---	---	0	9	1	0

**Uso del hábitat**

En cada época del año la presencia de los anfibios y reptiles en los microhábitats y el uso que de ellos hicieron fue distinto. Durante la época de sequía, el 68,7 % (11 taxones) de las especies de anfibios prefirió usar microhábitats dentro de los bosques, y unas pocas especies como *L. macrosternum*, *L. fuscus* y *S. blairi*, prefirieron usar los limitados recursos de las sabanas y potreros en esta época del año ( $X^2_{0,95 (3) \text{ época de sequía}}=22$ ). En contraste, durante la época húmeda la disponibilidad de recursos permitió que cada una de las especies ocupara múltiples hábitats y microhábitats, dándoles diferentes usos ( $X^2_{0,95 (3) \text{ época húmeda}}=4,26$ ) (Tabla 4). Esto se reflejó en que el 41 % (9 taxones) de las especies usara las coberturas naturales de bosques y sabanas, y un 50 % (11 taxones) lograra usar las coberturas transformadas de pastizales y arrozeras, que durante la época de sequía no estaban disponibles.

Los cambios de preferencia más notables durante las dos épocas del año los presentaron *P. llanera*, *R. humboldti*, *L. macrosternum* y *S. ruber*, ya que durante la época de sequía mostraron una alta preferencia por los bosques, mientras que en la época húmeda estuvieron totalmente ausentes en esta cobertura (Tabla 5). No se incluye a *S. blairi* en este resultado, ya que el reemplazo obtenido fue un artefacto debido al bajo número de individuos de esta especie recolectados. A pesar de la variación en las preferencias de coberturas durante las dos épocas del año, es evidente que el ensamble de anfibios prefirió mayoritariamente las coberturas naturales a las transformadas (preferencia de coberturas naturales Vs. coberturas transformadas:  $X^2_{0,95 (1) \text{ época de sequía}}=20,57$ ;  $X^2_{0,95 (1) \text{ época húmeda}}=13,13$ ).

Las ranas y sapos de las sabanas inundables mostraron una clara organización vertical y horizontal dentro de las coberturas naturales de estos ecosistemas. Esta disposición

**Tabla 4.** Preferencia de coberturas por especie durante las épocas seca y húmeda

Especie	Época seca en %				Época húmeda en %			
	Potrero	Bosque	Sabana	Arrocera	Potrero	Bosque	Sabana	Arrocera
<i>Dendropsophus mathiassoni</i>	0	100	0	0	6	11	72	11
<i>Elachistocleis ovalis</i>	0	100	0	0	25	50	25	0
<i>Hypsiboas crepitans</i>	0	75	25	0	25	6	69	0
<i>Leptodactylus colombiensis</i>	0	83	17	0	0	100	0	0
<i>Leptodactylus fragilis</i>	13	56	31	0	4	4	58	33
<i>Leptodactylus fuscus</i>	0	44	56	0	24	12	41	24
<i>Leptodactylus insularum</i>	0	67	33	0	0	100	0	0
<i>Leptodactylus linneatus</i>	0	100	0	0	0	100	0	0
<i>Leptodactylus macrosternum</i>	0	43	57	0	60	0	15	25
<i>Leptodactylus sp</i>	---	---	---	---	100	0	0	0
<i>Physalaemus fisheri</i>	0	57	43	0	0	50	0	50
<i>Phyllomedusa hypochondrialis</i>					25	25	50	0
<i>Pseudopaludicola llanera</i>	0	87	13	0	50	0	0	50
<i>Pseudis paradoxa</i>	---	---	---	---	14	7	79	0
<i>Rhinella marina</i>	---	---	---	---	0	0	100	0
<i>Rhinella humboldti</i>	0	64	36	0	43	0	57	0
<i>Scinax blairi</i>	0	0	100	0	0	100	0	0
<i>Scinax rostratus</i>	20	40	0	0	0	60	40	0
<i>Scinax ruber</i>	0	89	11	0	0	0	100	0
<i>Scinax wandae</i>	0	100	0	0	0	0	100	0
<i>Scinax sp</i>	---	---	---	---	0	0	100	0
<i>Trachycephalus typhonius</i>	---	---	---	---	0	75	25	0

**Tabla 5.** Uso del hábitat del ensamble de anfibios. Sitios de canto: cuerpo de agua permanente (CP); charcos temporales (CT); huecos en el barro (HB); ocultos en la vegetación (OV); pastizales (P); sobre la vegetación (SV); sobre el suelo (S); superficie de charcos (SCH); perchada en el dosel del bosque, perchada en ramas de arbustos o perchada en le sotobosque (DB); construcciones domésticas (DOM). Hábitat del renacuajo: cuerpo de agua permanente (CP); charcos temporales (CT); construcciones domésticas (DOM); bajos (BA); esteros (ES).

Familia	Especie	Sitio de canto	Hábitats domésticos	Hábitat del renacuajo	Preferencia de cobertura durante la sequía	Preferencia de cobertura durante las lluvias	Preferencia de Microhábitat durante la sequía	Preferencia de Microhábitat durante las lluvias
Hylidae	<i>Dendropsophus mathiassoni</i>	SV, P, CP, P	Presente	CT, BA, ES	Sabana	Sabana	Bajo la vegetación del estero	Sobre la vegetación del estero
	<i>Elachistocleis ovalis</i>	S			Bosque	Bosque	Entre la hojarasca	Entre la hojarasca
	<i>Hypsiboas crepitans</i>	SV, DB, CT, P, DOM	Presente	CT	Bosque	Sabana	Sotobosque	Sobre los arbustos o el suelo
	<i>Hypsiboas lanciformis</i>	SV, DB,		CT		Bosque		Sotobosque
	<i>Hypsiboas pugnax</i>	SV, DB, CT	Presente	CT		Sabana		Sobre los arbustos o el suelo
	<i>Osteocephalus taurinus</i>		Ausente		Bosque	Bosque		Sotobosque
	<i>Phyllomedusa hypochondrialis</i>	SV, DB, CP	Ausente	CT, BA		Sabana		Sobre los arbustos cerca de cuerpos de agua
	<i>Pseudis paradoxa</i>	OV, SCH, CT	Ausente	BA, CT		Sabana		Oculto entre la vegetación de los bajos y esteros
	<i>Scinax blairi</i>	SV, DB,	Ausente		Sabana	Bosque	Entre los herbazales	Sotobosque
	<i>Scinax rostratus</i>	SV, DOM	Presente	CT, BA	Bosque	Sabana	Sobre arbustos del borde del bosque, baños de las casas	Sobre los arbustos, herbazales o el suelo o baños de las casas
	<i>Scinax ruber</i>	SV, DOM	Presente	CT, BA	Bosque	Sabana	Sobre los herbazales, baños de las casas	Sobre los arbustos o el suelo o baños de las casas
	<i>Scinax sp</i>	SV	Ausente			Sabana		Sobre los herbazales
	<i>Scinax wandae</i>	OV, SV, DB	Ausente	CT, BA	Bosque	Sabana	Entre los troncos de los árboles	Sobre los herbazales
<i>Scinax x-signatus</i>	OV, SV,	Presente	CT, BA		Sabana		Sobre los herbazales, baños de las casas	
<i>Trachycephalus typhonius</i>	S, SV, DB, CT	Ausente			Bosque		Sotobosque y dosel de los bosques de galería	
Leptodactylidae	<i>Leptodactylus colombiensis</i>	S,CT	Ausente		Bosque	Bosque	Entre la biomasa muerta de la base de las palmas	Entre la biomasa muerta de la base de las palmas
	<i>Leptodactylus fragilis</i>	HB	Presente	CT	Bosque	Sabana	Entre la hojarasca del borde del bosque	Huecos entre el barro
	<i>Leptodactylus fuscus</i>	S	Presente	CT	Sabana	Sabana	Huecos del suelo	Sobre montículos en el suelo
	<i>Leptodactylus insularum</i>	S, CP	Ausente		Bosque	Bosque	Sobre los bordes de los caños	Sobre los bordes de los caños
	<i>Leptodactylus linneatus</i>	S	Ausente		Bosque	Bosque	Entre la hojarasca en la base de los árboles	Entre la hojarasca en la base de los árboles
	<i>Leptodactylus macrosternum</i>	HB	Ausente		Sabana	Sabana	Huecos del suelo	Sobre el suelo cerca de cuerpos de agua
	<i>Leptodactylus sp</i>	S	Ausente			Potrero		Sobre el suelo de los caminos
Lauperidae	<i>Physalaemus fisheri</i>	S	Ausente		Bosque	Bosque/arroceria	Huecos del suelo	Sobre el suelo entre los surcos de arado
	<i>Pseudopaludicola llanera</i>	S	Ausente		Bosque	Sabana/arroceria	Entre la hojarasca	Sobre el suelo entre los surcos de arado
Bufonidae	<i>Rhinella humboldti</i>	S, CT	Presente	CT	Bosque	Sabana	Entre la hojarasca del borde del bosque	Sobre las orillas de charcos temporales y carreteras
	<i>Rhinella marina</i>	S, CP, CT	Presente	CT		Sabana		Sobre las orillas de charcos temporales y carreteras

en el espacio, al igual que la riqueza, la abundancia y la composición de este ensamble de anfibios, se vio afectada por el ciclo de inundación y sequía. Durante la época de sequía casi todas las especies detectadas se concentraron en el estrato herbáceo, muy cerca de los caños o madre viejas, entre la hojarasca y los elementos caídos dentro de los bosques (Figura 5). Pocas especies utilizaron el estrato arbustivo (*S. wandae*, *S. rostratus*, *S. ruber*, *H. crepitans*, *D. mathiassoni*), en el cual se les suele encontrar alimentándose u ocultas entre los huecos de ramas secas. Las pocas especies presentes en las sabanas durante la sequía no hicieron uso de las partes altas de las macollas (*Andropogon selloanus*, *Andropogon bicornis* o *Paspalum plicatulum*), se congregaron cerca de las orillas de los esteros o en los bancos de sabana (*L. fuscus*, *L. macrosternum*, *R. humboldti*), o se ocultaron entre las marcas del ganado o las oquedades del suelo (*L. fragilis*) (Figura 6).

Con la llegada de las lluvias los estratos verticales de las sabanas y los bosques empezaron a ser colonizados por las especies que durante la sequía se concentraban en el suelo (*D. mathiassoni*, *H. crepitans*, *S. rostratus*, *S. blairi*) y aparecieron otras con una gran afinidad por los estratos arbustivos de las sabanas y el estrato subarborio de los bosques (*P. hypocondrialis*, *S. ruber*, *T. typhonius*). Las especies que se encontraban concentradas en la hojarasca durante el verano, se desplazaron hacia la sabana o las partes no inundadas de los bosques de galería (*P. llanera*, *E. ovalis*, *S. ruber*). De igual forma, la estratificación horizontal de la vegetación y la topografía de las sabanas hizo que en la época húmeda el ensamble de anuros se distribuyera de forma más homogénea entre los microhábitats (Figura 6).

Esta colonización también se presentó en los cultivos de arroz y en los pastizales, sin embargo, la poca estratificación vertical de estas coberturas no proveyó hábitats aéreos que favorecieran la presencia de ranas con hábitos de percha. Solamente se observó un par de machos de *D. mathiassoni* posados y cantando en las espigas de *Urochloa humidicola* y *Urochloa decumbens* (Figura 7).

En el caso de los reptiles no se pudo establecer la preferencia y el uso del hábitat, debido a que, en su gran mayoría, las especies observadas fueron registros únicos o con número muy bajo de individuos, por lo que sus hábitats y hábitos no quedaron suficientemente representados. Las especies más abundantes entre las lagartijas y la salamanquejas fueron *Gonatodes concinnatus* (48 %, 24 individuos) y *Hemidactylus palaichthus* (30 %, 15 individuos), y entre las serpientes, *Chironius carinatus* (29 %, 8 individuos), *Corallus hortulanus* (11 %, 3 individuos), *Liophis melanotus* (11 %, 3 individuos) y *Thamnodynastes dixonii* (11 %, 3 individuos). Sin embargo, algunas especies, como las siguientes, presentaron asociaciones muy claras con unidades o elementos del paisaje de las sabanas inundables.

*G. concinnatus* (O'Shaughnessy, 1881) fue el lagarto más común durante las dos épocas del año. Su preferencia de hábitat se inclinó por los bosques y ruinas de las construcciones abandonadas, en las cuales se registraron numerosas posturas eclosionadas (N=9) y sin eclosionar (N=4) entre las grietas, las oquedades de las paredes y las placas del suelo durante la época lluviosa del año. A su vez, se recolectaron ejemplares en los troncos de las palmas y en árboles de los bosques de galería, activos durante las primeras horas de la mañana y las últimas de la tarde.

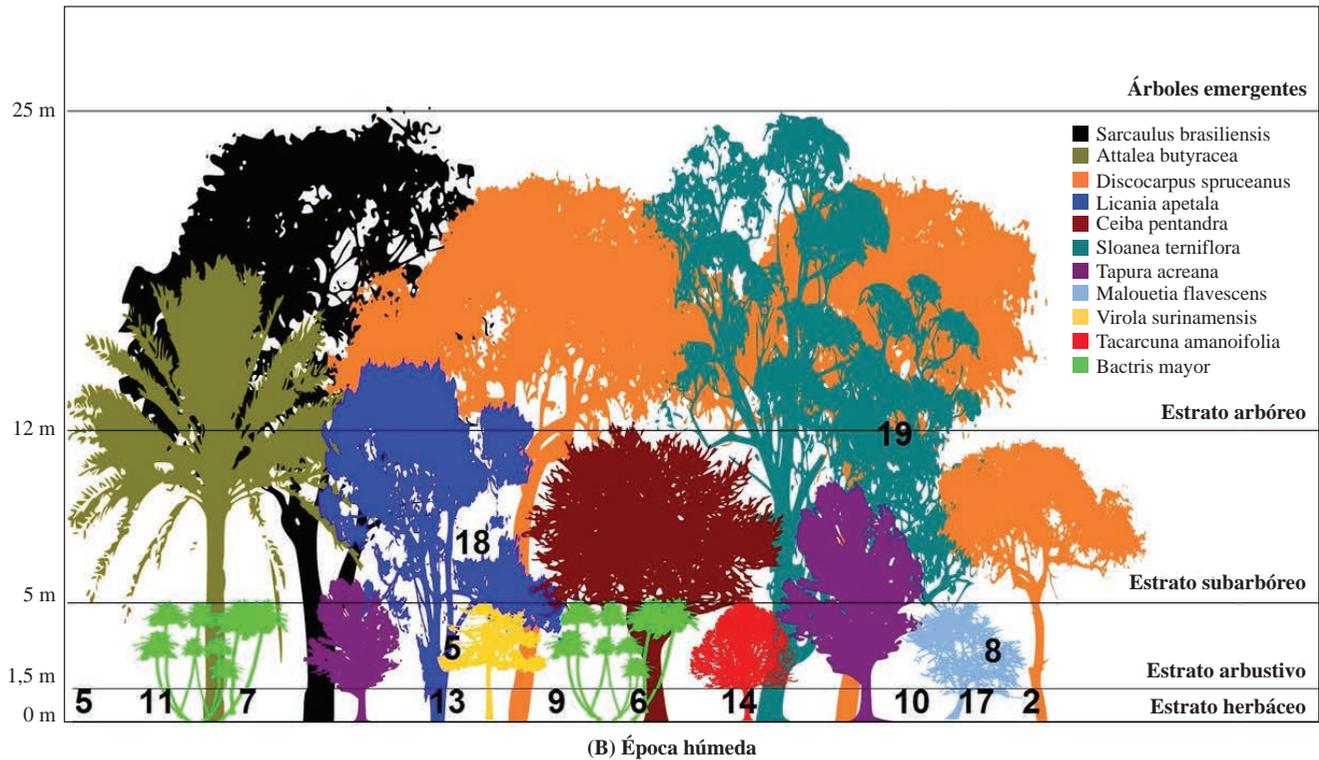
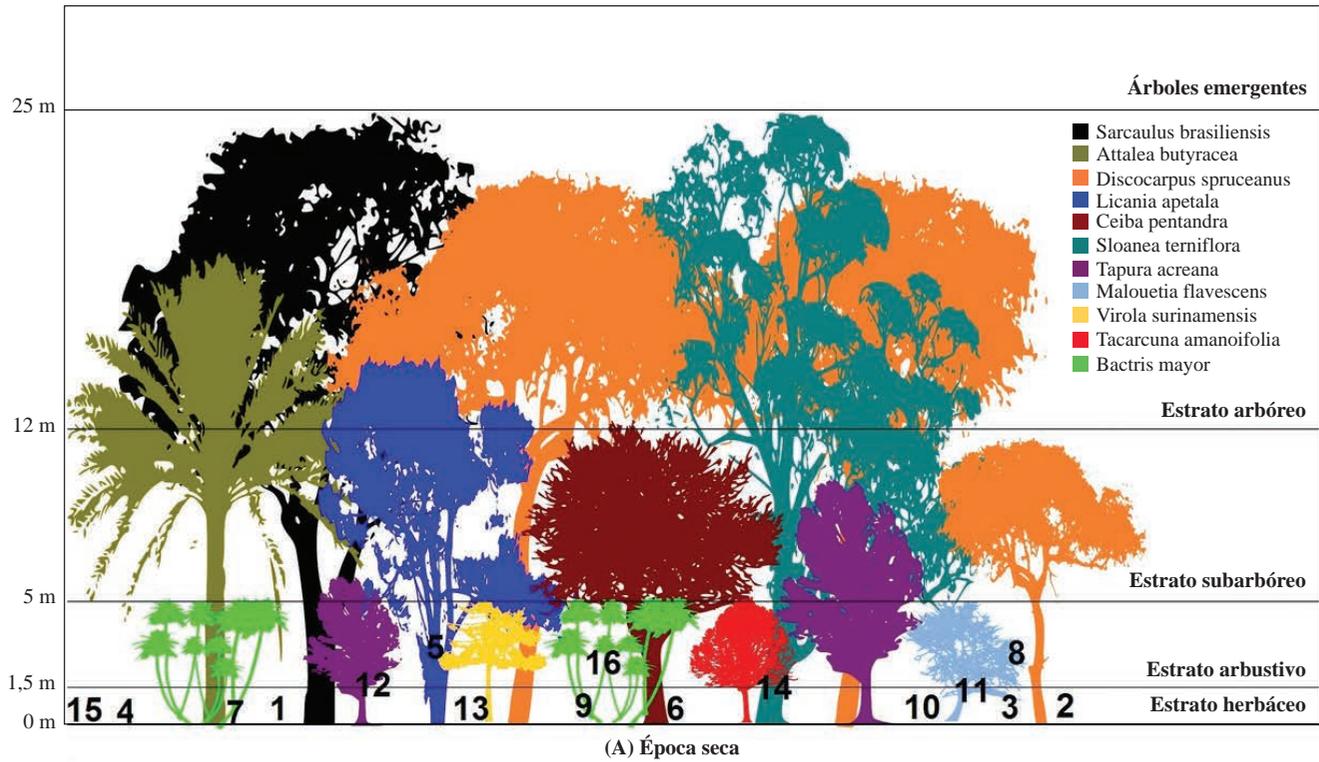
*H. palaichthus* (Kluge, 1969) presentó una fuerte afinidad con los hábitats que ofrecen las construcciones domésticas o las ruinas de estas construcciones abandonadas por los campesinos. Todos los ejemplares de esta especie se recolectaron en estos hábitats. Al parecer su preferencia de hábitat no cambia entre las épocas seca y húmeda.

*Chironius carinatus* (Linnaeus, 1758) fue la serpiente más común durante las dos épocas del año, presentando una mayor abundancia en la época húmeda. Mostró una mayor afinidad por las sabanas arboladas, aunque también se la observó fácilmente en los bosques de galería y las matas de monte durante las primeras horas de la mañana y las últimas de la tarde. De los ocho ejemplares recolectados, dos poseían contenidos estomacales identificados como *H. crepitans* y *L. macrosternum*. Durante las noches se les observó durmiendo a dos o tres metros del suelo sobre ramas de arbustos o árboles. Se recolectaron dos ejemplares (una hembra y un macho) muertos en las carreteras municipales durante la época húmeda, la hembra (LRC: 1.170 mm, LC: 470 mm, incompleta) tenía huevos en gestación, y el macho, de gran tamaño (LRC: 1.065 mm; LC: 505 mm) se encontraba sexualmente activo, lo que sugiere que durante esta época se presenta el periodo reproductivo de esta especie.

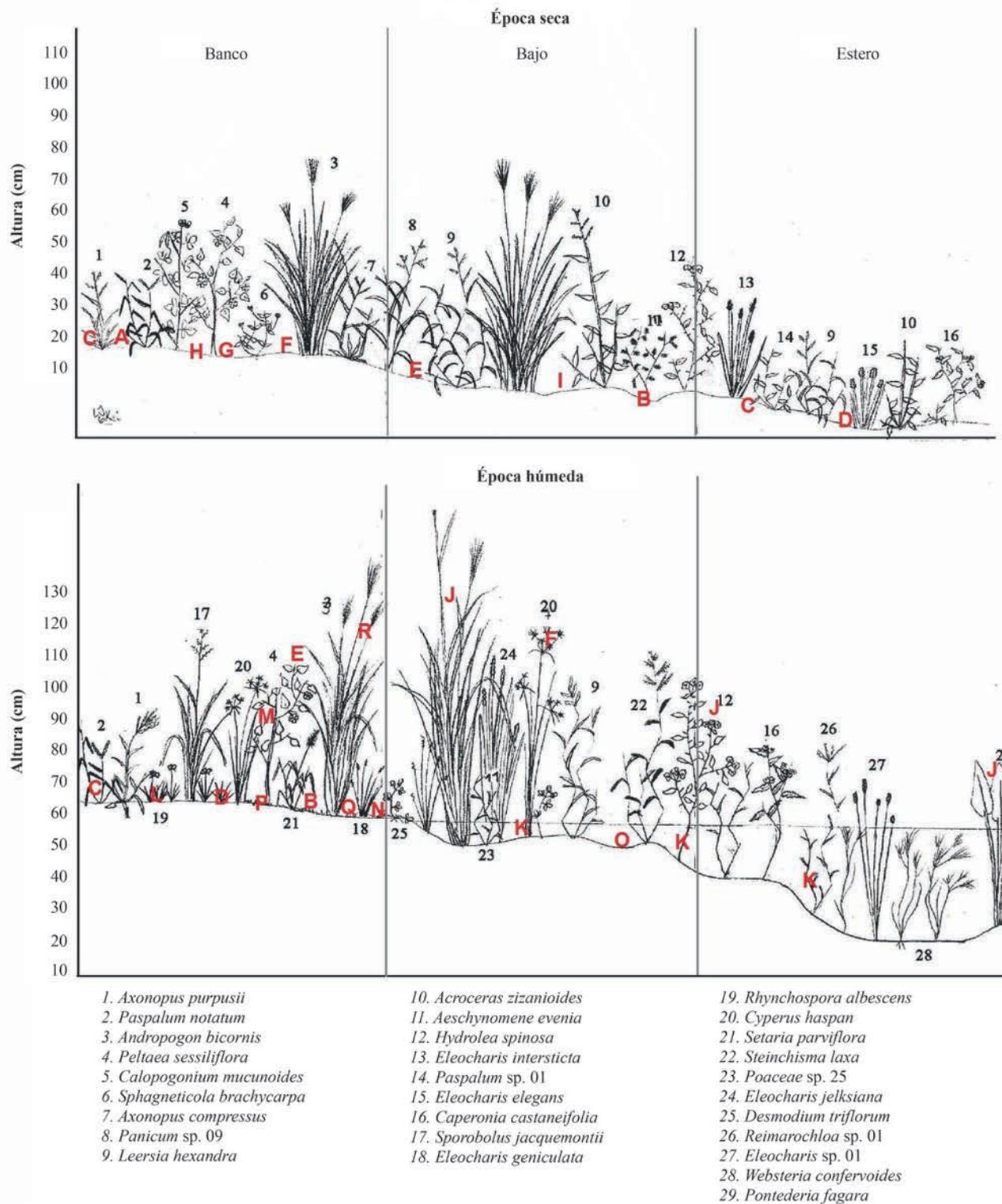
*Chelonoidys carbonara* (Spix, 1824) se observó en casi todas las unidades de paisaje durante la época de sequía, sin embargo, mostró preferencia por los boques de galería y las matas de monte como refugio y por las sabanas como fuente de alimento. Se le pudo observar realizando grandes travesías por las sabanas en búsqueda de refugio durante las últimas horas de la tarde. En la época húmeda se le vio preferentemente en las zonas no inundadas de las sabanas como las banquetas o los taludes de las carreteras.

## Discusión

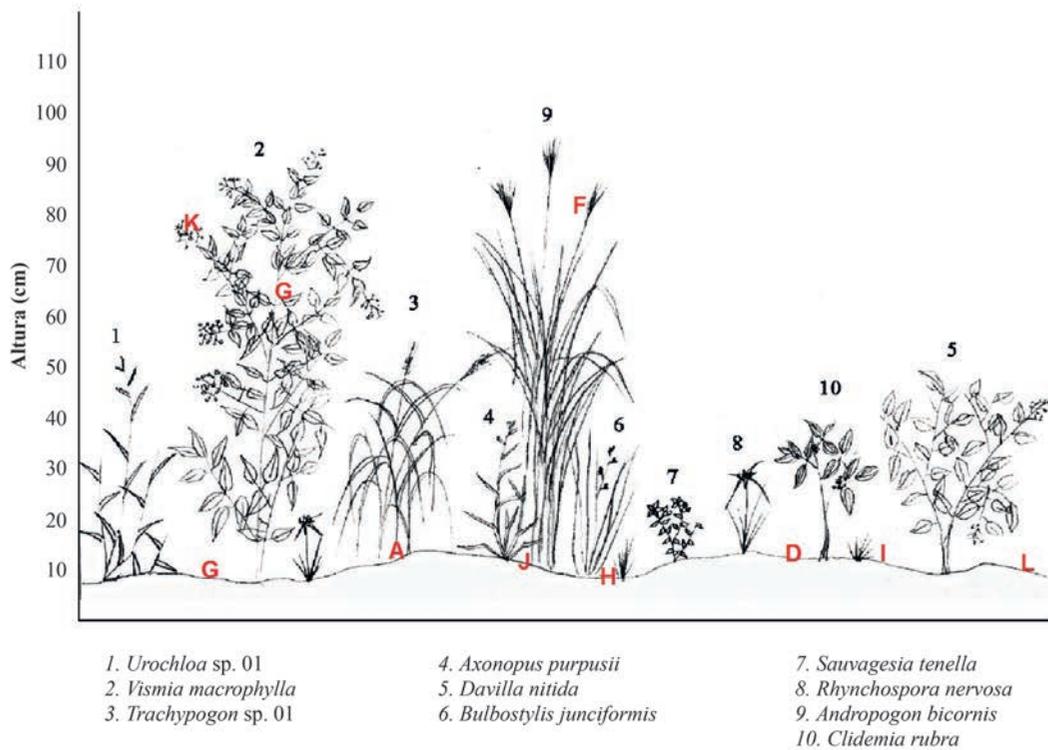
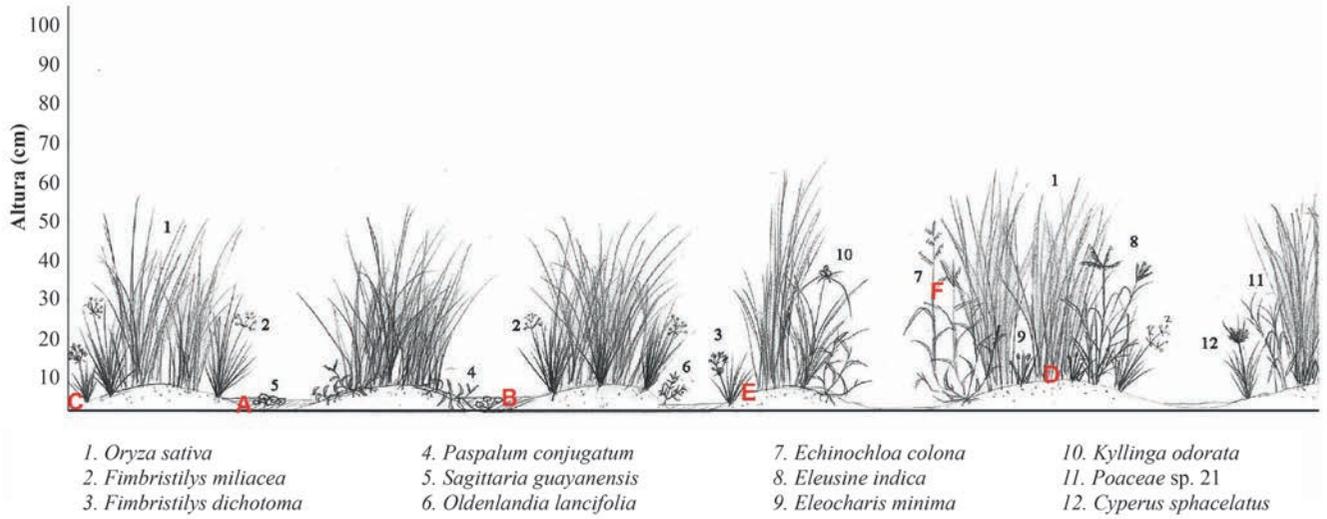
La dinámica ecológica de los ensambles de anfibios y de reptiles de las sabanas inundables estuvo determinada principalmente por tres factores: (1) la marcada estacionalidad entre las épocas seca y húmeda; (2) el pulso de inundación de los principales caños y ríos, y (3) las coberturas vegetales y su transformación debida a las actividades humanas. La



**Figura 5.** Distribución vertical y horizontal del ensamble de anfibios en los bosques: (A) época seca, (B) época húmeda. (1) *Pseudopaludicola llanera*, (2) *Leptodactylus fragilis*, (3) *Leptodactylus macrosternum*, (4) *Rhinella humboldti*, (5) *Hypsiboas crepitans*, (6) *Physalaemus fisheri*, (7) *Leptodactylus colombiensis*, (8) *Scinax rostratus*, (9) *Leptodactylus insularum*, (10) *Elachistocleis ovalis*, (11) *Dendropsophus mathiassoni*, (12) *Scinax wandae*, (13) *Leptodactylus linneatus*, (14) *Scinax blairi*, (15) *Leptodactylus fuscus*, (17) *Pseudis paradoxa*, (18) *Phyllomedusa hyponcondrialis*, (19) *Trachycephalus typhonius*



**Figura 6.** Distribución vertical y horizontal del ensamble de anfibios en las sabanas durante las épocas húmeda y seca. (A) *Pseudopaludicola llanera*, (B) *Leptodactylus fragilis*, (C) *Leptodactylus macrosternum*, (D) *Leptodactylus fuscus*, (E) *Scinax ruber*, (H) *Hypsiboas crepitans*, (G) *Physalaemus fisheri*, (H) *Leptodactylus colombiensis*, (I) *Scinax blairi*, (J) *Dendropsophus mathiassoni*, (K) *Pseudis paradoxa*, (L) *Rhinella humboldtii*, (M) *Scinax rostratus*, (N) *Elachistocleis ovalis*, (O) *Trachycephalus typhonius*, (P) *Rhinella marina*, (Q) *Scinax* sp. (R) *Phyllomedusa hyponcondrialis*



**Figura 7.** Distribución vertical y horizontal del ensamble de anfibios en los cultivos de arroz (superior) y pastos exóticos introducidos (inferior) durante la época húmeda. (A) *Pseudopaludicola llanera*, (B) *Leptodactylus fragilis*, (C) *Leptodactylus macrosternum*, (D) *Leptodactylus fuscus*, (E) *Physalaemus fisheri*, (F) *Dendropsophus mathiassoni*, (G) *Hypsiboas crepitans*, (H) *Pseudis paradoxa*, (I) *Rhinella humboldti*, (J) *Elachistocleis ovalis*, (K) *Phyllomedusa hyponcondrialis*, (L) *Scinax* sp.

relación de estos factores, así como la plasticidad adaptativa de las especies que componen el ensamble de anfibios y reptiles, nos permite comprender cómo la transformación o alteración de estas dinámicas ecológicas por la acción del hombre tiene un impacto negativo en estos organismos y en la integridad de este ecosistema. A continuación se analiza cada uno de estos factores detalladamente.

### **Estacionalidad**

Se puede considerar que los estimadores de tipo *jackknife* de primer y segundo orden sobrestimaron la riqueza del ensamble de anfibios y reptiles durante las dos épocas del año, debido al aumento constante de especies únicas en cada día de muestreo (Figura 2 y 3). No obstante, considerando la dificultad para detectar anfibios durante la época seca del año (Wells, 2007), las curvas de acumulación sugieren que la comunidad de anuros durante esta época del año estuvo bien representada. Por otro lado, aunque en la época húmeda del año la riqueza encontrada estuvo cerca de un 30 % por debajo de lo esperado por los estimadores *jackknife* de primer y segundo orden, se la consideró representativa y, además, concuerda con la riqueza reportada para estos ecosistemas de sabana por Dixon & Staton, 1976, Tárano, 2010, y Acosta-Galvis & Alfaro-Bejarano, 2011. La diferencia entre el número de especies de anfibios detectadas durante las dos épocas del año se debió a dos factores: (1) a la variación en la cantidad de días efectivos de muestreo (16 en la época seca y 12 en la época húmeda) y (2), a la mayor cantidad de hábitats y microhábitats disponibles en la época húmeda. Este es un patrón común para las especies que habitan zonas tropicales, en las cuales las marcadas temporadas de lluvias y los pulsos de inundación y sequía establecen y modulan los ciclos de vida de los anfibios (MacDiarmid & Altig, 1999; Montoya, et al., 2011).

En concordancia con los patrones de los ciclos de vida de los anfibios tropicales (Duellman & Trueb, 1994; Duellman, 2005), durante la época de sequía no se detectó actividad reproductiva en ninguna de las especies registradas o renacuajos en ninguno de los cuerpos de agua visitados. Durante la época húmeda, como se esperaba, se observó una gran actividad reproductiva, la cual generó una abundante cantidad de renacuajos disponibles para la observación durante el estudio. Esto permitió detectar especies nunca antes encontradas en las sabanas inundables, como *H. lanciformis*, o especies no detectadas en sus estadios adultos. Este resultado ilustra la importancia de estudiar los estadios larvales de los anfibios como herramienta útil para maximizar la detección de especies en inventarios de fauna y en evaluaciones ecológicas rápidas, así como para evaluar el impacto de las modificaciones ecológicas ocasionadas por las intervenciones humanas en los hábitats (Lynch, 2006a). En la zona de estudio, los drenajes naturales de las sabanas

han sido modificados de forma directa por las vías de acceso y las zanjas de desagüe de los cultivos de arroz. Esto ha producido la segmentación de las sabanas inundables, creando charcos o pozos temporales aislados de los sistemas hídricos naturales. Esta nueva oferta de microhábitats ha resultado en que los anuros muestren preferencia por depositar sus huevos en charcos temporales derivados de las intervenciones humanas más que en los microhábitats naturales disponibles ( $X^2_{0,95(5) \text{ renacuajos}} = 19,35$ ). Posiblemente, este efecto se debe a que los charcos temporales derivados de las intervenciones humanas poseen menos predadores de los renacuajos, pues están aislados de los sistemas hídricos naturales, en contraste con los microhábitats acuáticos naturales en los cuales los renacuajos cohabitan con peces, larvas de odonatos y coleópteros (MacDiarmid & Altig, 1999). No obstante, se recomienda llevar a cabo estudios más detallados sobre la preferencia y el uso de hábitats y su relación con las transformaciones antrópicas de la estructura y la función de los sistemas hídricos naturales.

Por el contrario, de las 35 especies de reptiles esperadas de acuerdo a lo reportado por Cortéz-Duque & Sánchez-Palomino, 2011, para la zona de estudio, tan solo se detectaron 23 especies en este estudio. Esta baja representatividad de las comunidades de reptiles en los muestreos obedece a tres factores principales: (1) la dificultad para realizar un muestreo eficiente y preciso en cada uno de los hábitats y microhábitats utilizados por los grupos que componen esta comunidad, lo que disminuyó la probabilidad de detección del mayor número posible de especies en el tiempo disponible para el trabajo en campo; (2) la división del esfuerzo de muestreo debido a la especificidad de las técnicas de muestreo para cada uno de los grupos de reptiles (escamados, tortugas y cocodrilos), lo que resultó en una pérdida de efectividad en la detección de las especies, y (3), el cambio estacional en el uso de los hábitats y microhábitats por parte de las especies tropicales (Zug, et al., 2001; Wiederhecker, et al., 2003), lo que ocasiona que especies fácilmente detectables durante la sequía no lo sean durante el invierno y viceversa.

La detección de *Hydrops triangularis* y *Eunectes murinus* únicamente durante la época de sequía es un claro ejemplo de cómo los factores (2) y (3) afectan la detección de los reptiles, ocasionando una baja representatividad en el muestreo. El único ejemplar de *H. triangularis* se recolectó a 30 cm bajo la hojarasca de un bosque de vega a orillas del río Pauto. Su detección se logró gracias al intenso esfuerzo de muestreo rastreando el suelo del bosque y al estado de reposo o estivación que presentaba el individuo en espera del pulso de inundación del río. Por otro lado, los ejemplares de *E. murinus* se detectaron al interior de los bosques de vega, entre las cavidades de las raíces de los árboles, mudando su piel o en estivación.

Además, de las 35 especies esperadas (Cortéz-Duque & Sánchez-Palomino, 2011) y las 55 probables para la región (Acosta-Galvis & Alfaro-Bejarano, 2011; Peñuela, *et al.*, 2011), en este estudio tan solo se compartieron 11 y 15 especies, respectivamente, denotando una baja correspondencia con estos reportes. Sin embargo, las listas presentadas por estos autores no permiten estimar con claridad el estado de conocimiento de la herpetofauna del Casanare y el estado de conservación de sus ecosistemas debido a que: 1) algunos de estos estudios basan sus análisis principalmente en registros del piedemonte con una baja representatividad de los paisajes de sabanas, de bosques de galería y de matas de monte, los cuales son los ecosistemas dominantes en la región; 2) los listados carecen de *voucher* o depósito de ejemplares en las colecciones nacionales registradas que respalden los registros para el Casanare y permitan corroborar su identidad taxonómica y su distribución, y 3) las listas de anfibios y reptiles reportadas representan un recuento histórico de la herpetofauna de la región que dista de representar su situación actual. No obstante, se debe destacar que, a pesar de las falencias, estas aproximaciones a la herpetofauna del Casanare han sido la base para su conocimiento y han ayudado a orientar las futuras investigaciones.

La composición del ensamble de anuros evidencia la evolución de las sabanas y la elección de organismos altamente tolerantes a las condiciones de sequía y a la transformación del paisaje. De las cinco familias de anuros presentes en este estudio, tres (Leptodactylidae, Bufonidae y Microhylidae) contienen las mayores abundancias y están compuestas por especies con rasgos de vida oportunistas, minadoras, poco dependientes del agua y muy versátiles en su preferencia de hábitat (Duellman & Trueb, 1994). Sin embargo, la preferencia del hábitat cambia según la época del año. Durante la época de sequía, los bosques resultaron ser los elementos clave para el establecimiento y mantenimiento del ensamble de anuros de las sabanas inundables. Para este ensamble, los bosques funcionan como el refugio del 96,8 % de la biomasa de estos organismos y del 93,7 % de las especies. Cortéz-Duque & Sánchez-Palomino, 2011, corroboran que los bosques, en especial los bosques de galería, son las coberturas naturales más importantes para los ecosistemas de sabanas inundables del río Pauto. Esto implica que cualquier transformación o destrucción de estas coberturas durante esta época del año pone en riesgo de extinción a las poblaciones de anuros presentes en estos ecosistemas. En contraste, durante la época húmeda son las sabanas las que sostienen la mayor proporción de biomasa y de especies de anuros, proporcionando las condiciones necesarias para el éxito reproductivo y el reclutamiento de larvas. Por ende, las transformaciones mecánicas derivadas de las actividades humanas sobre los suelos de los bancos, las banquetas, los bajos, los esteros o los caños repercuten en

las condiciones fisicoquímicas del agua, el hábitat físico y los drenajes naturales (Montoya, *et al.*, 2011), interrumpiendo y deteriorando las dinámicas de reclutamiento de larvas o individuos jóvenes que garantizan la continuidad de las poblaciones.

Al parecer, la familia Leptodactylidae es el taxón con el mayor grado de adaptación a los marcados cambios periódicos de precipitación. Esta familia presentó la mayor abundancia y riqueza entre todos los anuros encontrados debido a que los rasgos de historia de vida de las especies que componen este taxón han evolucionado de los hábitats acuáticos a los terrestres, reduciendo paulatinamente la dependencia del medio acuático (Heyer, 1969). Estas cualidades les permiten ser las especies dominantes en los bosques y sabanas, así como en los arrozales y potreros durante todo el año. La gran plasticidad adaptativa de estas especies (Heyer, 1969) les permite colonizar una mayor cantidad de hábitats y microhábitats, reduciendo así la competencia con otras especies por los recursos (Wells, 2007), y ocupar hábitats y microhábitats con condiciones extremas de desecación por insolación durante la sequía, así como colonizar hábitats degradados por actividades agrícolas y ganaderas.

#### *Pulso de inundación*

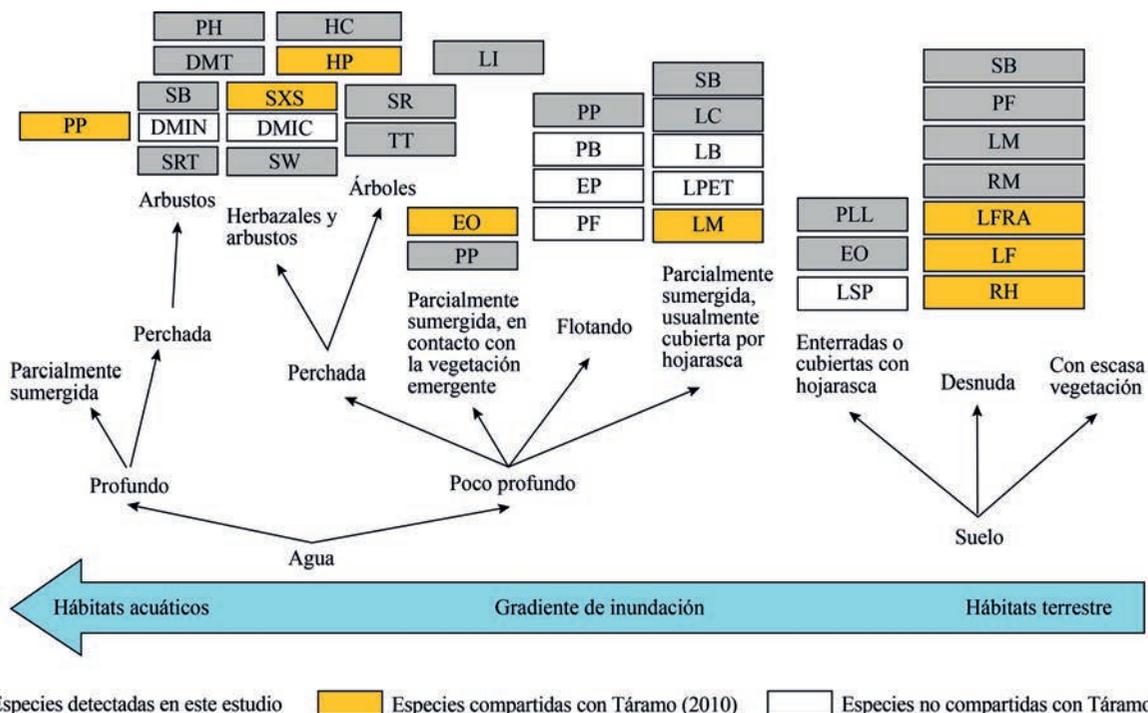
El evento hidrológico más importante para las sabanas inundables del río Pauto es el pulso de inundación, ya que esta es la fuerza motriz que modula los cambios anuales en las variables bióticas y abióticas que tienen lugar en los canales principales y en todos los cuerpos de agua asociados a la planicie de inundación (Montoya, *et al.*, 2011). En consecuencia, este evento influye de forma directa en todos los aspectos del ciclo de vida de los anuros debido a su inevitable dependencia del medio acuático (Wells, 2007) y, de forma indirecta, en los reptiles por la necesidad de encontrar hábitats disponibles para su establecimiento. El comportamiento de la herpetofauna encontrada evidenció de forma conspicua esta causalidad, expresándola en la distribución mayoritaria de la biomasa y la riqueza del ensamble durante la época de sequía en los bosques, y en la distribución más equitativa de la biomasa y la riqueza entre las cuatro coberturas evaluadas durante la época húmeda ( $H'_{seca}=0,7542$ ;  $H'_{húmeda}=1,253$ ). Otras señales evidentes del efecto del pulso de inundación en la dinámica del ensamble de anuros y reptiles, fueron los cambios de preferencia de hábitat durante las dos épocas del año de *P. llanera*, *R. humboldti*, *L. macrosternum*, y *S. ruber*; así como la aparición durante la época húmeda de especies como *P. paradoxa*, *P. hyponcondrialis* y *T. typhoni* en microhábitats específicos, los cuales no se encontraban disponibles durante la sequía (bajos y esteros, Figura 6), o no poseían las condiciones necesarias de humedad para ser utilizados (estratos arbustivo o subárbores de los bosques, Figura 5).

Por otro lado, las inundaciones periódicas que generan el pulso de inundación proporcionan el medio conector entre las poblaciones de anfibios y reptiles que se refugian en los bosques durante la sequía y los nuevos hábitats disponibles de las sabanas con la llegada de las lluvias. La conectividad hidrológica lateral entre el canal principal del río Pauto y los caños sabaneros, la planicie de inundación y la gran cantidad de cuerpos de agua existentes, genera un intercambio de materia orgánica entre la planicie de inundación y los bancos, bajos, esteros y caños durante el pulso de inundación (Montoya, et al., 2011). Este evento permite la colonización de nuevos hábitats en las sabanas por parte de *E. ovalis*, *H. crepitans*, *L. fragilis*, *L. macrosternum*, *P. llanera*, *S. wandae* y *S. x-signatus*, entre otros, garantizando así el éxito reproductivo debido a la persistencia de cuerpos de agua y el intercambio genético entre las poblaciones de estas especies (Wells, 2007).

En las sabanas inundables del río Pauto el proceso de colonización hecho por *L. fragilis*, *L. macrosternum* y *P. llanera* de las coberturas de arroz y pastos exóticos introducidos ha dependido principalmente de la conectividad con las sabanas y los bosques aledaños proporcionada por el

pulso de inundación; si no ocurriera así, los ensamblajes de anfibios estarían ausentes de estas coberturas. Si bien se logró detectar el proceso de colonización de los anfibios sobre los cultivos y los pastos, se desconoce su tasa de colonización, las especies pioneras y la dinámica del ensamblaje de anfibios tolerantes a este tipo de coberturas transformadas. Por tal razón, se recomienda desarrollar estudios que consideren estos aspectos, lo cuales permitirían entender cómo la fauna local se adapta a las transformaciones del paisaje.

En un estudio realizado en las sabanas inundables del estado de Guárico en Venezuela, Tárrano, 2010, también registra el mismo patrón de distribución horizontal del ensamblaje de anuros encontrado en las sabanas inundables del río Pauto en Colombia. Este patrón de distribución se relaciona directamente con el gradiente de inundación y sus hábitats derivados en la época húmeda. Si bien el ensamblaje de anuros en Guárico, Venezuela, es distinto al del río Pauto en Colombia, comparten varias especies con el mismo uso de microhábitats (*E. ovalis*, *H. pugnax*, *L. fragilis*, *L. fuscus*, *L. macrosternum*, *R. humboldti*, *P. paradoxa* y *S. x-signatus*) (Figura 8). Al parecer, el uso de los microhábitats por parte de los anfibios de los ecosistemas de sabanas inundables



**Figura 8.** Uso de microhábitats según el gradiente de inundación. DMIC: *Dendropsophus microcephalus*, DMIN: *Dendropsophus minusculus*, DMT: *Dendropsophus mathiassoni*, EO: *Elachistocleis ovalis*, EP: *Engystomops pustulosus*, HC: *Hypsiboas crepitans*, HP: *Hypsiboas pugnax*, LF: *Leptodactylus fuscus*, LFRA: *Leptodactylus fragilis*, LI: *Leptodactylus insularum*, LM: *Leptodactylus macrosternum*, LPET: *Leptodactylus petersii*, LSP: *Leptodactylus* sp., PB: *Pleurodema brachyops*, PF: *Physalaemus fisheri*, PH: *Phyllomedusa hyponcondrialis*, PP: *Pseudis paradoxa*, RH: *Rhinella humboldti*, RM: *Rhinella marina*, SB: *Scinax blairi*, SR: *Scinax ruber*, SRT: *Scinax rostratus*, SW: *Scinax wandae*, SXS: *Scinax x-signatus*, TT: *Trachicephalus typhonius*. Adaptado de Tárrano, 2010.

durante la época húmeda es bastante específico. La mayoría de las especies presenta una marcada preferencia por un tipo de microhábitat específico, ya sea porque la fisonomía de la vegetación les permite poner sus huevos, ubicar sitios a la manera de percha para emitir su canto de aviso, o porque les proporciona refugio y alimento (Wells, 2007). Los esteros y los bajos resultaron ser los únicos microhábitats utilizados por *P. paradoxa*, considerándosela, así, una especie de hábitos exclusivamente acuáticos. Igualmente las banquetas y los bancos de las sabanas mostraron ser los microhábitats exclusivos de *L. macrosternum*. Dixon & Staton, 1976, reportan la gran habilidad de los individuos de *L. macrosternum* para retornar al microhábitat terrestre del cual han sido retirados después de ser liberados a una distancia prudente del punto de captura y para mantenerse allí durante toda la temporada húmeda. Con la llegada de la sequía y la pérdida de humedad en las sabanas, estas ranas se desplazan hacia el borde de los caños y los cuerpos de agua. Sin embargo, durante la época de sequía en este estudio se pudo observar a numerosos individuos adultos de esta especie usando las oquedades del suelo de los bajos como refugios, los que demuestra la gran tolerancia de esta especie a la desecación.

**Coberturas vegetales y su transformación**

El deterioro de los ecosistemas de las sabanas inundables encontrado concuerda con lo reportado por Cardona-Corzo, et al., 2011, y con lo previsto por Romero-Ruiz, et al., 2009 acerca de los cultivos de pastos exóticos introducidos, los cultivos transitorios y los permanentes. La reducción de la riqueza, la diversidad y la complejidad estructural del ensamble de anfibios y reptiles del río Pauto fue evidente en estas coberturas. Durante la época húmeda, más del

40 % (13 taxones) de las especies de anfibios perdieron su hábitat por el establecimiento de cultivos de pastos exóticos introducidos (*Urochloa humidicola* y *Urochloa decumbens*) y el 72,3 % (18 taxones), por el establecimiento de cultivos de arroz (Figura 7). Aún más drástica fue la pérdida de 100 % de la biodiversidad de anfibios y reptiles durante la sequía, la cual se debió al arado de los suelos para la preparación de los cultivos de arroz, que los convierte en verdaderos desiertos, sin cobertura vegetal, y desnudos ante la erosión del viento, la insolación y las altas temperaturas. De igual forma, en esta época del año, los cultivos de pastos introducidos ofrecen un hábitat muy pobre, por lo que solo el 12,5 % (2 taxones) de las especies logró utilizar esta cobertura, manteniendo muy bajas abundancias. En aquellos pastizales que durante este periodo se encontraban en siembra, la pérdida de la biodiversidad fue de 100 %.

La causa principal del deterioro del ensamble de anfibios y reptiles se debe a la periodicidad, gravedad y persistencia de la transformación de los bosques y sabanas durante los ciclos anuales de siembra de pastos y arroz. La mayor pérdida de hábitat debida a estos cultivos se presenta entre los meses de marzo y abril, en los cuales se realizan las actividades de arado y preparación del suelo para la siembra. Durante este proceso se tala, poda y extrae toda la cobertura natural, dejando el desnudo el suelo y destruyendo los microhábitats de los anfibios (*E. ovalis*, *L. macrosternum*, *P. hyponcondrialis*, *P. paradoxa*, *T. typhonius*, entre otros) y reptiles (*B. atrox*, *L. linneatus*, *L. melanotus*, *O. petolarious*, *P. newwiedii*, *G. speciosus*, *T. teguixin*, entre otros) que se refugian bajo el suelo en espera de la época húmeda que da inicio en mayo (Figura 9). En los cultivos de pastos exóticos introducidos se presenta una segunda “limpieza” de potreros durante el

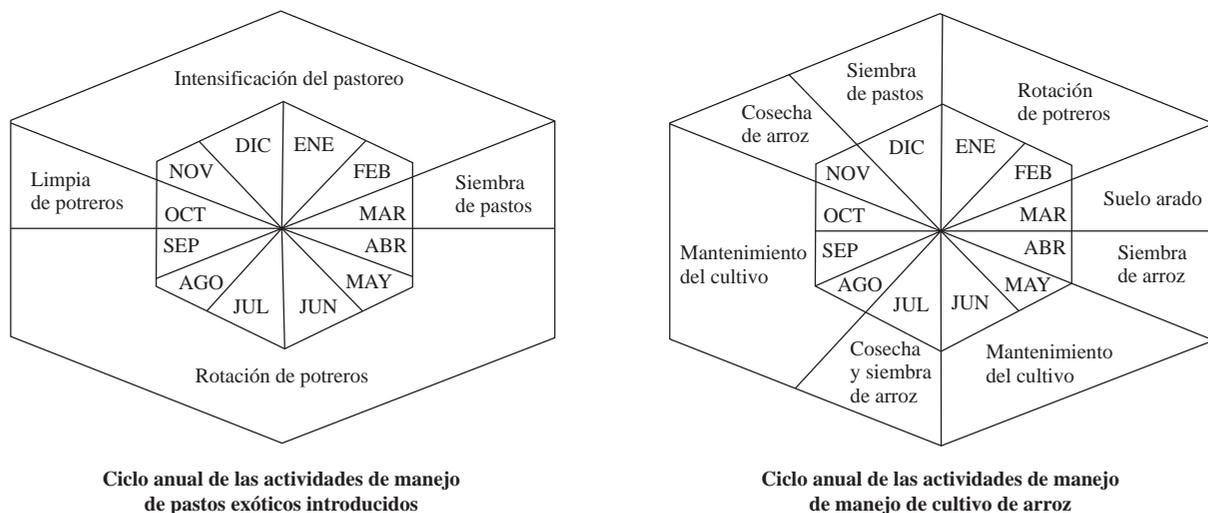


Figura 9. Ciclos anuales de las actividades de manejo de los cultivos de pastos exóticos introducidos y de arroz

mes de octubre, la cual consiste en tumbar el matorral que ha crecido desde la primera limpia al final de la época seca (**Cardona-Corzo, et al., 2011**). En este proceso se destruye parte del hábitat de las especies de anfibios (*H. crepitans*, *H. pugnax*, *S. blairi*, *S. ruber*, *S. rostratus*, *S. wandae*, *S. x-signatus*) y de reptiles (*C. hortulanus*, *Leptophis ahaetulla*, *Oxybelis aeneus*, *T. dixoni*) de hábitos arborícolas.

Al parecer, el cultivo de pastos exóticos introducidos no tiene mucha aceptación entre los ganaderos debido a sus altos costos y el esfuerzo que requieren (**Cardona-Corzo, et al., 2011**). En consecuencia, en un futuro cercano, los cultivos de pastos exóticos introducidos no representarán una amenaza para el ensamble de anfibios y reptiles, por lo que se reducirá la presión negativa que causan en los ecosistemas de sabanas inundables del río Pauto.

Por el contrario, el cultivo de arroz es una práctica agrícola que se encuentra en crecimiento en la región. Según FEDEARROZ (2011), el crecimiento en la Orinoquia es de 29 % gracias a las cepas modificadas resistentes a los suelos ácidos. Durante el trabajo de campo del presente estudio, se presencié el cambio de coberturas de sabana por cultivos de arroz en dos de las tres estaciones de muestro (finca Candalayes y finca El Mirador). El número de hectáreas transformadas fue de 50 a 100, respectivamente, y en conversaciones con los propietarios de estos terrenos, expresaron su intención de aumentar los cultivos al doble en la siguiente temporada. Comparativamente, los cultivos transitorios como el del arroz representan una mayor amenaza para el ensamble de anfibios y reptiles que los cultivos de pastos. La frecuencia de las perturbaciones y las modificaciones de las coberturas naturales, en especial en los bajos, es mucho más alta (Figura 9). Igualmente, la gravedad y agresividad de la transformación mecánica de los suelos de las sabanas producida por el arado y la construcción de diques o canales para drenar los bajos provocan una devastación total de las coberturas naturales y de la matriz del suelo. Esto promueve la colonización de especies invasoras que toleran mejor los cambios topográficos e hídricos y se ven favorecidas por las nuevas condiciones ambientales (*L. fragilis*, *L. fuscus*, *P. fisheri*, *P. llanera*, *R. humboldti* y *R. marina*) (**Bunn & Arthington, 2002**).

La colonización de *L. fragilis*, con abundancias cuarenta veces mayores que las demás especies colonizadoras de los cultivos de arroz, se debe en gran medida a su extraordinaria plasticidad adaptativa frente a ambientes fuertemente perturbados (**Heyer, 1969; Heyer, et al., 2012**), y a la gran oferta de sitios de canto y refugio provistos por las huellas dejadas por el labrado de las llantas de los tractores. Los hábitos de canto de *L. fragilis* son bastante específicos, los machos cantan únicamente desde oquedades o huecos en el suelo, por lo cual las huellas dejadas por el labrado de las

llantas se convierten en el microhábitat ideal para desplegar su canto de cortejo, para la formación de los nidos y para el desarrollo de los renacuajos sin que corran el riesgo de desecación. En consecuencia, el efecto derivado de la transformación de los hábitats bajos y de banquetas por los cultivos de arroz provoca el desplazamiento generalizado de las especies de hábitos acuáticos en condiciones naturales como *P. paradoxa*, siendo sustituidas por especies como *L. fragilis*, *L. fuscus*, *L. macrosternum*, y *P. llanera*, de hábitos terrestres, lo que limita el éxito reproductivo, el reclutamiento y el mantenimiento de la variación espacio-temporal de las poblaciones de hábitos acuáticos en el ecosistema (**Montoya, et al., 2011**).

En conclusión, se logró realizar una aproximación al conocimiento del ensamble de anfibios y reptiles de las sabanas inundables de río Pauto, evaluando su riqueza, abundancia, composición y preferencia de hábitat. Sin embargo, se hizo evidente que se necesita un mayor esfuerzo de muestreo para detectar más especies de probable presencia en estos ecosistemas. En futuros estudios se recomienda hacer salidas de campo en las épocas de transición entre la época húmeda y la seca para así dilucidar del todo la dinámica de este ensamble durante el ciclo anual completo. La actividad agrícola que actualmente representa la mayor amenaza para los anfibios y reptiles son los cultivos transitorios como el de arroz, debido a la devastadora pérdida de hábitat que ocasionan, la periodicidad con la que transforman las coberturas naturales y su acelerada expansión en la región. Esta, sumada a la modificación mecánica de los regímenes hídricos, es la actividad humana más nociva y la que mayor tensión causa en los ecosistemas de las sabanas inundables de la cuenca media y baja del río Pauto.

### Agradecimientos

Este estudio no hubiera sido posible sin la colaboración de los llaneros que habitan las sabanas inundables del río Pauto, en especial a Ramón Gómez, Juan Carlos Gómez (Chigüi), Ana Mora, Pedro Chaquea, Nilson Gualdrón, Renzo Amaya, Manuel Torres, Marixa Barragán, Esaú Gualdrón, Crispulo Bernabé (Venado), Evaristo Ansola, José Hugo Ramírez (Piraña), Polo Sandoval, Marina Cruz y Jhon Fredy Fuentes. Igualmente, agradezco a Felipe Andrés Aponte y Alejandro Montes por su apoyo en el trabajo de campo. También expreso mi gratitud a los curadores, investigadores, docentes y auxiliares de colecciones que facilitaron mi trabajo en la búsqueda de registros de anfibios y reptiles del Casanare, en especial a Lucas Barrientos y Andrew J. Crawford, de la Universidad de los Andes, John D. Lynch y Martha Calderón, del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, Julio Mario Hoyos, de la Pontificia Universidad Javeriana, Claudia Medina, del Instituto Alexander von Humboldt, Hno. José Edilson

Espitia Barrera y José Joaquín Celetia Bernal, de la Universidad de la Salle. Agradezco a los amigos y colegas que me facilitaron fotos de algunas especies, así como parte de sus resultados parciales sobre la vegetación y estructura de las coberturas vegetales de las sabanas inundables, en especial a Luisa F. Montaña-Londoño, Diego M. Cabrera, Laura Giraldo, Vicente Preciado, Daniel Cubillos y Liz K. Ladino. Finalmente, doy gracias a Javier Méndez, quien con su revisión crítica del documento hizo que este fuera más sólido y completo.

Este estudio se desarrolló en el marco del convenio de colaboración DHS No. 5211409 celebrado entre Ecopetrol y la alianza Yoluka ONG - Fundación Horizonte Verde para la ejecución del proyecto “Evaluación de la salud ecosistémica de las sabanas inundables de la cuenca media y baja el río Pauto, Casanare”, proyecto ganador de la Convocatoria a la Biodiversidad 2011 de Ecopetrol con el apoyo del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.

### Conflicto de interés

El autor declara que no tiene conflicto de interés.

### Bibliografía

- Acosta-Galvis, A.R., Bejarano, J.** 2011. Anfibios del Casanare. En: **Usma, J.S., & F., Trujillo.** (Editores). Biodiversidad del Casanare: ecosistemas estratégicos del Departamento. Gobernación de Casanare - WWF Colombia. Bogotá D.C.138-152pp.
- Alfaro-Bejarano, J., Acosta-Galvis, A.R.** 2011. Reptiles del Casanare. En: **Usma, J.S. & Trujillo, F.** (Editores). Biodiversidad del Casanare: ecosistemas estratégicos del Departamento. Gobernación de Casanare - WWF Colombia. Bogotá D.C., 53-168pp.
- Angarita-Sierra T., Ospina-Sarria, J., Anganoy-Criollo, M., Pedroza-Banda, R., Lynch, J.D.** 2013. Guía de campo de los anfibios y reptiles del departamento de Casanare (Colombia). Serie Biodiversidad para la Sociedad No. 2. Universidad Nacional de Colombia, Sede Orinoquía; YOLUKA ONG, Fundación de Investigación en Biodiversidad y Conservación. Bogotá-Arauca.173pp
- Ayala, S. C.** 1986. Saurios de Colombia: lista actualizada y distribución de ejemplares colombianos en los museos. *Caldasia* **15** (71-75): 555-597.
- Angulo, A., Rueda-Almonacid, J.V., Rodríguez-Mahecha, J.V., La Marca, E.** (Eds). 2006. Técnicas de inventario y monitoreo para los anfibios de la región tropical andina. Conservación Internacional. Serie Manuales de Campo N° 2. Panamericana Formas e Impresos S.A., Bogotá D.C. 230pp
- Bunn, S. E., Arthington, A.H.** 2002. Basic principles and ecology consequences of altered flow regimens for aquatic biodiversity. *Environmental Management*. **30**: 492-507
- Cáceres-Andrade S.P., Urbina-Cardona, J.N.** (2009). Ensamble de anuros de sistemas productivos y bosque en el piedemonte llanero, departamento del Meta, Colombia. *Caldasia* **31** (1): 175-194.
- Campbell, J. A. and W.W. Lamar.** 2004. The venomous reptiles of the western hemisphere, 2 vols. Comstock (Cornell University Press), Ithaca, NY, 962 pp.
- Cardona-Cardozo, A., Pinzón-Pérez, L., Castellanos-Castro, C., Mora-Fernández, C., Vargas-Ríos, O.** 2011. Amenazas para la conservación de las comunidades vegetales de la cuenca del baja Río Pauto. En Sicard, T.L. (Editor) Mamíferos, reptiles y ecosistemas del bloque Cubiro (Casanare): educación ambiental para la conservación. Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia, Alange Energy Corp. Bogotá, 191-226pp.
- Caro C., Trujillo, F., Suárez, C.** 2006. Evaluación y oferta regional de humedales de la Orinoquía: contribución a un sistema de clasificación de ambientes acuáticos. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT.150pp.
- Caicedo-Portilla, R., & C.J Dulcey-Cala.** 2011. Distribución del gecko introducido *Hemidactylus frenatus* (Dumeril y Bribon 1836) (Squamata: Gekkonidae). En Colombia, *Biota Colombiana*, **12**, 2: 45-56pp.
- Cortés-C., Rangel-Ch, J.O.** 2011. Los bosques de mangle en un gradiente de salinidad en la bahía de Cispatá – Boca Tinajones, departamento de Córdoba – Colombia. *Caldasia* **33**(1): 155-176.
- Cortés J., Sánchez-Palomino, P.** 2011. Diversidad de reptiles del bloque Cubiro. En Sicard, T.L.(Editor), Mamíferos, reptiles y ecosistemas del bloque Cubiro (Casanare): educación ambiental para la conservación(Editor). Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia, Alange Energy Corp. Bogotá, 247-273pp.
- Dixon, J.R, Staton, JM.** 1976. Some aspects of the biology of *Leptodactylus macrosternum* Miranda-Ribeiro (Anura: Leptodactylidae) of the Venezuelan Llanos. *Herpetologica*. **36**; 2: 227-232.
- Duellman, W.E.** 2005. Cusco Amazónico/ the Lives of Amphibians and Reptiles in an Amazonian Rainforest. Comstock Publishing Associates, Ithica, New York. Xv + 433 pp.
- Duellman, W.E., Trueb, L.** 1994. Biology of Amphibians. Baltimore: The Johns Hopkins University Press. 670 pp.
- Fedearroz.** 2011. Boletín informativo de la federación nacional de arroceros. Fondo Nacional del arroz. Bogotá D.C. (251): 1-8 pp.
- Frost D. R, Grant, T., Faivovich, J. Bain, R. H., Haas, A., Haddad, C., De Sa R., Channing, A., Wilkinson, M. Donnellan, S. C., Raxworthy, C. J., Campbell, J. A., Blotto, B. L., Moler, P., Drewes, R. C., Nussbaum, R. A., Lynch, J. D. Green, D. M., Wheeler D.** 2006. The Amphibian Tree of Life. *Bulletin of the American Museum of Natural History*. (297): 370 pp.

- Hammer, Ø. Harper, D.A. T., Ryan, P.D.** 2004. Past: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4, art.4.
- Harvey M. B., Ugueto, G.N., Gutberlet, R. L. Jr.** 2012. Review of Teiid Morphology with a Revised Taxonomy and Phylogeny of the Teiidae (Lepidosauria: Squamata) *Zootaxa* (3459): 1–156.
- Hayer, R. W.** 1969. The adaptative ecology of the species groups the genus *Leptodactylus* (Amphibians, Leptodactylidae). *Evolution* (23): 421-428.
- Heyer, W. R., Heyer, M. M.** 2012. Systematics, distribution, and bibliography of the frog *Leptodactylus validus* Garman, 1888 (Amphibia: Leptodactylidae). *Proceedings of the Biological Society of Washington*, **125** (3): 276-294.
- Lerh, E.** 2002. *Amphibien und Reptilien in Peru – Natur und Tier Verlag, Münster.* 206 pp.
- Lynch, J.D., Suárez-Mayorga, A.** 2011. Clave ilustrada de los renacuajos en las tierras bajas al oriente de los Andes, con énfasis en Hylidae. *Caldasia* **33** (1): 235-270.
- Lynch, J.D.** 2006a. The tadpoles of frogs and toads found in the lowlands of Northern Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **30** (116): 443-457.
- McDiarmid, R.W., Altig, R.** 1999. *Tadpoles. The biology of anuran larvae.* University of Chicago Press. 444 pp.
- Montoya, J. V., Castillo, M. M., Sánchez, L.** 2011. La importancia de las inundaciones periódicas para el funcionamiento y conservación de los ecosistemas inundables de grandes ríos tropicales: estudios en la cuenca del Orinoco. *Interciencia*. **36** (12): 899-907
- Mora-Fernández C., Peñuela-Recio L.** (Eds) 2013. Salud ecosistémica de las sabanas inundables asociadas a la cuenca del río Pauto, Casanare, Colombia. Yoluka ONG, Fundación de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Fundación Horizonte Verde y Ecopetrol S.A. 150 pp.
- Mora-Fernández, C., Castellanos, C., Cardona, A., Pinzón, Vargas-Ríos, O.** 2011. Introducción. 15-56 pp. En **Sicarad T. L.** (Editor) Mamíferos, reptiles y ecosistemas del bloque Cubiro (Casanare): educación ambiental para la conservación. Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia, Alange Energy Corp. Bogotá. 432 pp.
- Neiff, J. J.** 1981. Panorama ecológico de los cuerpos de agua del nordeste argentino. *Symposia, VI Jornadas Argentinas de Zoología*: 115 - 151.
- Rangel-Ch., J.O.** 1997. (Ed.) Colombia Diversidad Biótica II. Tipos de vegetación en Colombia. Instituto de Ciencias Naturales - Universidad Nacional de Colombia. 436 pp.
- Rangel-Ch., J.O.** 2004. (Ed.) Colombia Diversidad Biótica IV. El Chocó biogeográfico/Costa Pacífica. Instituto de Ciencias Naturales – Conservación Internacional. 997 pp.
- Rangel-Ch., J.O.** 2012. (Ed.). Colombia Diversidad Biótica XII. La región Caribe de Colombia. Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales. 1018 pp.
- Palacios-P., Rodríguez-Z., Rangel-Ch, J.O.** 2012. Cambios en el clima y en la vegetación en ambientes estuarinos de la bahía de Cispatá (Córdoba – Caribe colombiano). En: J.O. Rangel-Ch. (ed.). Colombia Diversidad Biótica XII. La región Caribe de Colombia: 145-164. Universidad Nacional de Colombia – Instituto de Ciencias Naturales. 1018 pp.
- Pedroza-Bandan R., Angarita-Sierra, T.** 2011. Herpetofauna de los humedales La Bolsa y Charco de Oro, Andalucía, Valle del Cauca. *REV. ACAD. COLOMB. CIENC.*: **XXXV** (35): 243-260.
- Peñuela L., Castro, F., Ocampo-Peñuela, N.** 2011. Las reservas naturales del nodo Orinoquía en su rol de conservación de la biodiversidad. Fundación Horizonte Verde y RESNATUR. Colombia. 104 pp.
- Rueda-Almonacid, J. V., Mittermeier, C.L., Rodríguez-Mahecha, A., Mast, J. V., Vogt, R. B., Rhodin, R. C., de la Ossa-Velásquez, G. J., Rueda, J. N., Mittermeier, C.G.** 2007. Las tortugas y los cocodrilianos de los países andinos del trópico. Serie de guías tropicales de campo No. 6. Conservación Internacional. Editorial Panamericana, Formas e Impresos. Bogotá, Colombia, 538 pp.
- Sarmiento, G.** 1984. *Ecology of Neotropical Savannas.* Harvard University Press. Boston. USA. Xii + 235 p.
- Tárano, Z.** 2010. Advertisement calls calling habits of frogs from a flooded savanna of Venezuela. *South American Journal of Herpetology*. **5** (3): 221-240
- Wells, K. D.** 2007. *The Ecology and Behavior of Amphibians.* The University of Chicago Press. Chicago-London. 729-783 pp.
- Wiederhecker, H., Pinto, C., Adriana, C., Paiva, S., Marcela, S., Colli, E., Guarino, R.** 2003. The demography of the lizard *Tropidurus torquatus* (Squamata, Tropiduridae) in a highly seasonal neotropical savanna. *Phyllomedusa*. **2** (1): 09-19.
- Wüster, W., Yrasuquin J. L., Mijares-Urrutia, ?.** 2001. A new species of Indigo Snake from North-Western Venezuela. (Serpentes: Colubridae: Drymarchon) *Herpetological Journal*. (11): 157-165.
- Zug, G. R., Vitt, L. J., Caldwell, J. P.** 2001. *Herpetology: An Introductory Biology of Amphibians and Reptiles.* Academic Press, New York xiv + 630 pp.

---

**Anexo**


---

**ANURA BUFONIDAE*****Rhinella******Rhinella humboldti* (Gallardo, 1965)****Hábitat:** sabanas, potreros, aéreas abiertas en general**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, finca La Breñaña, finca Altamira; municipio de Trinidad, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, finca El Mirador, 180 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS 253-255, 324-327, 368-370, 459, 527, 532, 554, 556, 621, 640*, depositadas en (ICN)

***Rhinella marina* (Linnaeus, 1758)****Hábitat:** sabanas, potreros, aéreas abiertas en general**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, finca La Breñaña, finca Altamira; municipio de Trinidad, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, finca El Mirador, 180 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS 457, 469*, depositadas en (ICN)

**HYLIDAE*****Dendropsophus******Dendropsophus mathiassoni* (Cochran y Goin, 1970)****Hábitat:** sabanas, potreros, bordes de bosque, aéreas abiertas en general o sobre la vegetación emergente de los esteros y bajos**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, finca La Breñaña, finca Altamira; municipio de Trinidad, vereda San Vicente, finca Candalayes, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, finca El Mirador, 180 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS 204, 257, 467, 470- 476, 536, 553, 598, 599, 606, 625-628*, depositadas en (ICN)

***Hypsiboas******Hypsiboas crepitans* (Wied-Neuwied, 1824)****Hábitat:** sabanas, rastrojos altos y bajos, potreros arbolados, bordes de bosque**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús,

finca La Breñaña, finca Altamira; municipio de Trinidad, vereda San Vicente, finca Candalayes, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, finca El Mirador, 180 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS169, 205, 258, 282, 313, 371, 421, 422, 439, 443-447, 465, 466, 477, 551, 564, 580, 613, 622, 642, 653*, depositadas en (ICN)

***Phyllomedusa******Phyllomedusa hypochondrialis* (Daudin, 1800)****Hábitat:** sabanas, rastrojos altos y bajos, potreros arbolados, bordes de bosque, bosques de galería**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, finca La Breñaña, finca Altamira; municipio de Trinidad, vereda San Vicente, finca Candalayes, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, finca El Mirador, 180 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS430, 431, 559, 560, 561, 562, 612, 619* depositadas en (ICN)

***Pseudis******Pseudis paradoxa* (Linnaeus, 1758)****Hábitat:** sabanas, bajos, rastrojos bajos, potreros arbolados, bordes de bosque**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, finca Altamira, 160 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS478, 513, 516-523, 611, 617, 629, 641* depositadas en (ICN)

***Scinax******Scinax blairi* (Fouquette y Pyburn, 1972)****Hábitat:** sabanas, rastrojos bajos, potreros arbolados, bordes de bosque**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de Trinidad, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, 180 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS 162, 616* depositadas en (ICN)

***Scinax rostratus* (Peters, 1863)****Hábitat:** sabanas, rastrojos bajos, potreros arbolados, bordes de bosque**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, finca La Breñaña, finca Altamira; municipio de Trinidad,

vereda San Vicente, finca Candalayes, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, finca El Mirador, 180 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS224, 237, 240, 341, 427, 511, 512, 534, 535, 615* depositadas en (ICN)

***Scinax ruber* (Laurenti, 1768)**

**Hábitat:** sabanas, rastrojos bajos, potreros arbolados, bordes de bosque

**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, finca La Breña, finca Altamira; municipio de Trinidad, vereda San Vicente, finca Candalayes, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, finca El Mirador, 180 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS166, 231, 236, 238, 239, 312, 394, 395, 423, 557, 558* depositadas en (ICN)

***Scinax wandae* (Pyburn y Fouquette, 1971)**

**Hábitat:** sabanas, esteros y bajos, rastrojos bajos, potreros arbolados, bordes de bosque

**Dieta:** Insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, finca La Breña, finca Altamira; municipio de Trinidad, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, finca El Mirador, 180 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS241, 461, 654, 655* depositadas en (ICN)

***Scinax* sp.**

**Hábitat:** sabanas, bajos, rastrojos bajos, potreros arbolados, bordes de bosque

**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, finca Altamira, 160 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS514* depositadas en (ICN)

***Trachycephalus typhonius* (Linnaeus, 1758)**

**Hábitat:** sabanas, bosque de galería, bordes de bosque

**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, finca Altamira, 160 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS 515, 540, 543, 547* depositadas en (ICN)

**LEIUPERIDAE**

***Physalaemus***

***Physalaemus fischeri* (Boulenger, 1890)**

**Hábitat:** sabanas, potreros, cultivos de arroz, bosque de galería, bordes de bosque

**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, finca Altamira, 160 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS372-374, 416, 425, 428, 429, 448, 636* depositadas en (ICN)

***Pseudopaludicola***

***Pseudopaludicola llanera* (Lynch, 1989)**

**Hábitat:** sabanas, potreros, bosque de galería entre la hojarasca

**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, finca Altamira, 160 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS 208, 209, 211-220, 222-229, 232, 233, 250-252, 287, 303, 342-345, 375-382, 565, 566, 638, 639* depositadas en (ICN)

**LEPTODACTYLIDAE**

***Leptodactylus***

***Leptodactylus colombiensis* (Heyer, 1994)**

**Hábitat:** sabanas, potreros, bordes de bosque

**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, finca La Breña, finca Altamira; municipio de Trinidad, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, 160 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS 207, 267, 367, 401, 409, 419, 401, 529, 530, 538, 541, 542, 545* depositadas en (ICN)

***Leptodactylus fragilis* (Brocchi, 1877)**

**Hábitat:** sabanas, bosque de galería, bordes de bosque

**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, finca La Breña, finca Altamira; municipio de Trinidad, vereda San Vicente, finca Candalayes, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, finca El Mirador, 160-180 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS259-264, 279, 280, 307, 309, 318, 321, 323, 328-330, 356-362, 366, 384, 398-400, 402-407, 417, 418, 464, 479-483, 496, 531, 570, 571, 576-578, 601, 607, 624, 634* depositadas en (ICN)

***Leptodactylus fuscus* (Schneider, 1799)**

**Hábitat:** sabanas, potreros, arroceras, bordes de bosque

**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, finca La Breña, finca Altamira; municipio de Trinidad, vereda San Vicente, finca Candalayes, vereda El Banco de la

Cañada, finca La Palmita, finca El Mirador, 160-180 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS* 227, 246, 247, 265, 266, 277, 278, 304, 305, 310, 349, 363, 385, 396, 397, 408, 438, 440-442, 458, 460, 462, 463, 468 487, 488, 489, 490, 491, 497, 498-510, 533, 544, 567, 581 586-597, 603, 635, 637, 644 depositadas en (ICN)

***Leptodactylus insularum* (Barbour, 1906)**

**Hábitat:** bordes de bosque de galería, a orillas caños

**Dieta:** insectívoro; en ocasiones, otras ranas de talla pequeña.

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, finca La Bretaña, finca Altamira 160-180 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS* 223, 268, 269, 537, 539, 546, 555 depositadas en (ICN)

***Leptodactylus lineatus* (Schneider, 1799)**

**Hábitat:** sabanas, potreros, arrozceras, bordes de bosque

**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, finca La Bretaña, finca Altamira; municipio de Trinidad, vereda San Vicente, finca Candalayes, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, finca El Mirador, 160-180 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS* 393, 656, 661 depositadas en (ICN)

***Leptodactylus macrosternum* (Miranda-Ribeiro, 1926)**

**Hábitat:** sabanas, potreros, arrozceras, bordes de bosque

**Dieta:** insectívoro; en ocasiones, otras ranas de talla pequeña.

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, finca La Bretaña, finca Altamira; municipio de Trinidad, vereda San Vicente, finca Candalayes, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, finca El Mirador, 160-180 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS* 206, 221, 225, 226, 228, 248, 249, 270-276, 281, 311, 350-355, 364, 365, 383, 386, 389, 420, 484-486, 563, 568, 569, 572-574, 579, 582-585, 608-610, 614, 618, 620 depositadas en (ICN)

**MICROHILYDAE**

***Elachistocleis***

***Elachistocleisovalis* “nomendubium” (Schneider, 1799)**

**Hábitat:** bosque, sabana, potreros

**Dieta:** insectívoro

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, finca La Bretaña, finca Altamira; municipio de Trinidad, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, 160 mns, marzo y julio de 2012; *Teddy Angarita-Sierra TAS* 256, 331, 412, 623, 658, 659, 660 depositadas en (ICN)

**SAURIA**

**GYMNOPHTHALMIDAE**

***Gymnophthalmus***

***Gymnophthalmus speciosus* (Hallowell, 1861)**

**Hábitat:** hojarasca de los bosques de galería, casas abandonadas, escombros

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, 180 mns, marzo 2012; *Angarita-Sierra T., TAS* 437 (ICN)

**GEKKONIDAE**

***Gonatodes***

***Gonatodes concinnatus* (O’Shaughnessy, 1881)**

**Hábitat:** hojarasca de los bosques de galería, tronco de las palmas y árboles, casas abandonadas, escombros

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, vereda La Palestina, finca La Lucha; municipio de Trinidad, finca Candalayes, 180 mns, marzo 2012; *Angarita-Sierra T., TAS* 165-167, 234, 243, 316, 317, 333-337, 410, 411, 413-415, 424, 425, 434, 526, 528 (ICN)

***Hemidactylus***

***Hemidactylus palaichthus* (Kluge 1969)**

**Hábitat:** casas, ranchos o corrales de las fincas, casas abandonadas, escombros

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, 180 mns, marzo 2012; *Angarita-Sierra T., TAS* 163, 168, 432, 435, 436, 449-455, 492-494 (ICN)

**IGUANIDAE**

***Iguana***

***Iguana iguana* (Linnaeus, 1758)**

**Hábitat:** rastrojos altos, bancos de sabana, bosques de galería o vega

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de Trinidad, vereda El Banco de la Cañada, finca El Mirador, 180 mns, julio 2012; *Angarita-Sierra T., TAS* 633 (ICN)

**TEIIDAE**

***Ameiva***

***Ameiva praesignis* (Baird & Girard, 1852).**

**Hábitat:** bancos de sabana, bosques de galería, corrales de las casas

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, 180 mns, marzo y julio de 2012; *Angarita-Sierra T.*, TAS 314,315, 433, 435 ICN

*Cnemidophorus*

*Cnemidophorus gramivagus* (Linnaeus, 1758)

**Hábitat:** bancos de sabana, bosques de galería, corrales de las casas

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de Trinidad, finca Candalayes; municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, 180 mns, marzo y julio de 2012; *Angarita-Sierra T.*, TAS 442, 522 (ICN)

*Tupinambis*

*Tupinambis teguixin* (Linnaeus, 1758)

**Hábitat:** bancos de sabana, bosques de galería, corrales de las casas

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de Trinidad, finca Candalayes; municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, 180 mns, marzo y julio de 2012; *Angarita-Sierra T.*, TAS 244,549, 552 (ICN)

POLYCHROTIDAE

*Anolis*

*Anolis auratus* (Daudin, 1802)

**Hábitat:** bancos de sabana, bosques de galería, corrales de las casas

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de Trinidad, finca Candalayes, 180 mns, marzo 2012; *Angarita-Sierra T.*, TAS 525 (ICN)

TESTUDINES PODOCNEMIDIDAE

*Podocnemis*

*Podocnemis vogli* (Müller, 1935)

**Hábitat:** caños de aguas negras o blancas, bosques de galería

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Caño Orocio, julio 2012; *Angarita-Sierra T.*, TAS 604 (ICN)

SERPENTES

BOIIDAE

*Corallus*

*Corallus hortulanus* (Linnaeus, 1758)

**Hábitat:** bosques de galería, caños, rastrojos altos

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús; municipio de Trinidad, vereda San Vicente, finca Candalayes, marzo-julio 2012; *Angarita-Sierra T.* TAS 283, 456, 600 (ICN)

COLUBRIDAE

*Chironius*

*Chironius carinatus* (Linnaeus, 1758)

**Hábitat:** bancos de sabana, bosques de galería, caños, rastrojos altos

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús, vereda Ulere, finca Altamira; municipio de Trinidad, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, finca El Mirador, marzo-julio 2012; *Angarita-Sierra T.* TAS 210, 524, 548, 630-632, 645, 645, 657, 663 (ICN)

*Hydrops*

*Hydrops triangularis* (Wagler 1824)

**Hábitat:** bosques de galería, bosques de vega, caños de aguas negras o blancas

COLOMBIA: departamento del Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Ulere, finca Altamira, marzo, 2012; *Angarita-Sierra T.* TAS 235 (ICN)

*Leptodeira*

*Leptodeira annulata* (Linnaeus, 1758)

**Hábitat:** bosques de galería, bosques de vega, caños de aguas negras o blancas

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Ulere, finca Altamira, marzo, 2012; *Angarita-Sierra T.* TAS 245, 284 (ICN)

*Leptophis*

*Leptophis ahaetulla* (Linnaeus, 1758)

**Hábitat:** bosques de galería, bosques de vega, rastrojos altos y bajos, sabanas arboladas

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de Trinidad, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, julio, 2012; *Angarita-Sierra T.* TAS 602 (ICN)

*Liophis*

*Liophis lineatus* (Linnaeus, 1758)

**Hábitat:** bosques de galería, bosques de vega, rastrojos altos y bajos, sabanas arboladas

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de Trinidad, vereda El Banco de la Cañada, finca El Mirador, marzo, 2012; *Angarita-Sierra T.* TAS 348 (ICN)

***Liophis melanotus* (Shaw, 1802)**

**Hábitat:** bosques de galería, bosques de vega, rastrojos altos y bajos, sabanas arboladas

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de Trinidad, vereda El Banco de la Cañada, finca El Mirador, marzo 2012; *Angarita-Sierra T.* TAS 338, 339, 392 (ICN)

***Oxybelis******Oxybelis aeneus* (Wagler, 1824)**

**Hábitat:** bosques de galería, matas de monte, rastrojos altos y bajos, sabanas arboladas

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de Trinidad, vereda El Banco de la Cañada, finca El Mirador, julio, 2012; *Angarita-Sierra T.* TAS 647, 648, 649 (ICN)

***Oxyrhopus******Oxyrhopus petolarius* (Linnaeus, 1758)**

**Hábitat:** bosques de galería, matas de monte, rastrojos altos y bajos, sabanas arboladas

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de Trinidad, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, julio, 2012; *Angarita-Sierra T.* TAS 662 (ICN)

***Pseudoboa******Pseudoboa newiedii* (Duméril, Bibron & Duméril, 1854)**

**Hábitat:** bosques de galería, matas de monte, rastrojos altos y bajos, sabanas arboladas

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de Trinidad, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, julio, 2012; *Angarita-Sierra T.* TAS 605 (ICN)

***Thamnodynastes******Thamnodynastes dixonii* (Bailey y Thomas, 2006)**

**Hábitat:** bosques de galería, matas de monte, rastrojos altos y bajos, sabanas arboladas

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de Trinidad, vereda El Banco de la Cañada, finca La Palmita, marzo-julio 2012; *Angarita-Sierra T.* TAS 390, 650, 651 (ICN)

**VIPERIDAE*****Bothrops******Bothrops atrox* (Linnaeus, 1758)**

**Hábitat:** bancos de sabana, bajos, bosques de galería, rastrojos altos

COLOMBIA: departamento de Casanare, municipio de San Luis de Palenque, vereda Guaracura, Colegio Emaús; municipio de Trinidad, vereda San Vicente, finca Candalayes. marzo-julio, 2012; *Angarita-Sierra T.* TAS 285, 286 (ICN)

# Resultados preliminares del cultivo experimental de *Gracilaria verrucosa* (Hudson) Papenfuss (= *G. caudata* J. Agardh) (Rhodophyta: Gracilariaceae) en la Costa Caribe de Colombia

Jairo Napoleón Molina-Vargas, Ricardo Álvarez-León\*

Fundación Verdes Horizontes, Manizales, Colombia

## Resumen

Se registran los resultados de la investigación realizada en la bahía de Fray Domingo, playa de Punta de Piedra, (10° 52' N y 75° 08' O, aproximadamente), en el departamento de Atlántico, Caribe colombiano, entre el 30 de junio y el 1 de noviembre de 2004. Se llevó a cabo un ensayo de cultivo con el alga roja *Gracilaria verrucosa* utilizando una estructura artesanal cuya cuerda principal con mangas plásticas perforadas sirvió de soporte a las algas rojas; la estructura se colocó a una profundidad de 1,40 m, fijándola al fondo y manteniéndola a flote. El tendido se revisó cada 15 días para observar el desarrollo de las ramas nuevas y el crecimiento apical de los filamentos. El crecimiento de las algas fue irregular, observándose que los penachos de algas fijadas originalmente crecieron uniformemente, en tanto que en los otros, solo se notó buen crecimiento en los extremos de las mangas. El peso fresco de la cuerda principal con mangas y algas fue de 2,5 kg. Los filamentos más largos alcanzaron los 22 cm. El crecimiento promedio de la fronda fue de 15 cm. Las algas cultivadas crecieron sin ataques invasivos, aunque sí se observaron abundantes epífitas tanto en la cuerda principal como en las cuerdas secundarias de la estructura o módulo de cultivo, las cuales pertenecían, en orden de abundancia, a las clases Rhodophyceae, Phaeophyceae y Chlorophyceae. La fronda de *Hypnea musciformis* fue la más abundante y la de mejor crecimiento; la fauna asociada estaba conformada especialmente por crustáceos juveniles: cangrejos, camarones y langostas.

**Palabras clave:** ficocultura, macroalgas rojas, *Gracilaria verrucosa*, Caribe, Colombia

**Preliminary results of an experimental crop of *Gracilaria verrucosa* (Hudson) Papenfuss (= *G. caudata* J. Agardh) (Rhodophyta: Gracilariaceae) on the Colombian Caribbean Coast**

## Abstract

We present the results of the study carried out in Fray Domingo Bay, Punta de Piedra Beach (10° 52' N and 75° 08' W approximately), Department of Atlántico, on the Colombian Caribbean coast, from June 30 to November 1, 2004. An experimental crop of the red algae *Gracilaria verrucosa* was developed using a handmade structure whose main rope with plastic perforated sleeves served as support for the algae. This structure was placed at a depth of 1.40 m and fixed to the bottom to maintain it floating. The structure was inspected every 15 days to observe the development of new branches and the apical growth in the filaments. The growth of the algae was irregular, as the feathers of those originally fixed grew evenly while in others growth was observed only in the end sections of the sleeves. The fresh weight of the main rope with sleeves and algae was 2.5 kg. The longest filaments were 22 cm long. Fronds growth average was of 15 cm. Cultivated algae grew without invasive attacks, but we did observe abundant epiphytes on the main and secondary ropes of the structure, which belonged to the Rhodophyceae, Phaeophyceae and Chlorophyceae classes in order of abundance. *Hypnea musciformis* was the most abundant species and showed the best growth rate. The associated fauna consisted mainly of juvenile crustaceans: crabs, shrimps and lobsters.

**Key words:** Floculture, red macroalgae, *Gracilaria verrucosa*, Caribbean, Colombia

## Introducción

La acuicultura en Colombia ha tenido un gran apoyo gubernamental y privado. La celebración de convenios y misiones ha permitido estructurar las bases científicas y tecnológicas para garantizar el manejo adecuado de sus

recursos acuáticos; sin embargo, el desarrollo alcanzado no es el ideal para un país que, como Colombia, es megadiverso y cuenta con un considerable patrimonio renovable y no renovable, tanto marino como continental, en sus diferentes pisos térmicos y profundidades submarinas (Álvarez-León, 1982; Álvarez-León & Rodríguez-Forero, 2000).

El mito de “país subdesarrollado” que no cree en sí mismo, que no puede hacer más por falta de recursos y de tecnología, que está destinado a estar eternamente “en vías de desarrollo”, es uno de los factores que inciden en el freno al desarrollo acuícola (**Rodríguez-Gómez, et al., 1995; Álvarez-León & Rodríguez-Forero, 2000**). Además, la falta de difusión de los paquetes tecnológicos completos para especies nativas, la introducción de especies exóticas con paquetes tecnológicos transferidos (**Hernández-Camacho, 1971; Gutiérrez-Bonilla, 2002**), así como la inadecuada canalización y fluidez de las líneas de crédito, la escasa publicación de resultados y la ausencia de publicidad para difundir los beneficios de los productos acuícolas han frenado o retardado el desarrollo del sector.

Aunque las especies utilizadas hasta el momento ascienden a 95 (algas, moluscos, crustáceos, peces), existe un enorme potencial para el desarrollo e implementación de biosistemas integrados en los ambientes costeros y continentales (**Álvarez-León & Rodríguez-Forero, 2000**). En el caso de las algas marinas, el conocimiento de las especies nativas ha mejorado en cuanto a la composición específica en los diferentes ecosistemas y a su identificación. Estos esfuerzos se iniciaron con el trabajo de **Bula-Meyer, 1989**, en el que se resaltó el potencial ficológico y la factibilidad de los cultivos, pero fue sin duda el esfuerzo de **Díaz-Pulido & Díaz-Ruíz, 2003**, el que proporcionó un panorama real de la riqueza y la diversidad de las algas en el Caribe colombiano, cuyo número asciende a 565 especies. El potencial químico de un número considerable de ellas ya ha sido evaluado (**Álvarez-León, et al., 2007**), así como la posibilidad de su utilización como fuente de coloides para la fabricación de medios de cultivo y extractos experimentales (**Álvarez-León, et al., 2008**).

El estudio de las algas exóticas, en cambio, apenas está comenzando con la única registrada hasta el momento, *Eucheuma isiforme* (C.Agardh) J.Agardh (que, según se comprobó, era en realidad *Kappaphycus alvarezii*), en La Guajira colombiana (**Gallo-Peña & Rincones-León, 2003; Rincones-León & Gallo-Peña, 2004**). Con motivo de la introducción al medio natural de dicha alga en el Cabo de la Vela, para apoyar las necesidades de la población pescadora de la tribu Wayúu, se realizó un informe detallado sobre la taxonomía, la biología y la ecología del alga (**Díaz-Pulido & Díaz-Ruíz, 2004**). Recientemente, **Rincones-León & Moreno, 2009**, presentaron los resultados de la experiencia desarrollada a través de un proyecto de maricultura de algas como alternativa de desarrollo sostenible de las comunidades costeras de La Guajira.

**\*Correspondencia:**

Ricardo Álvarez-León, ricardoalvarezleon@gmail.com

**Recibido:** 27 de septiembre de 2013

**Aceptado:** 5 de mayo de 2014

**La ficocultura nacional**

Los cultivos experimentales de macroalgas bentónicas apenas comienzan en Colombia. El primer informe de investigación en este campo fue presentado por **Bula-Meyer & de Newball, 1983**, quienes desarrollaron un cultivo experimental en el mar del alga roja *Grateulopia filicina* al sur del Rodadero en la costa del Caribe colombiano (Santa Marta, Magdalena).

Otros trabajos de investigación en el Caribe son los realizados por **Morales-Sánchez & Ángel-López, 1975**, especialmente sobre *Bryothamnion seaforthii* y *Gracilaria mammillaris* en el Golfo de Morrosquillo, así como los de **Gaviria-Melo, 1977**, y **González-Delgadillo & Rojas-Ortega, 1995**, llevados a cabo para conocer las características específicas de las algas encontradas y las épocas de su reproducción; el de **Durán-Salcedo, 1979**, sobre algunos aspectos ecológicos de *Gracilaria cornea* y su posible cultivo; el de **Grajales-Orozco & Poveda-Jiménez, 1997**, sobre *G. mammillaris* y *S. filiformis* en Cartagena. También se han evaluado diferentes posibilidades de cultivo en los estudios de **Montaña-Fernández, 2006**, con *Hypnea musciformis* en las áreas de Taganga y Puerto Luz (Santa Marta), de **Delgadillo-Garzón, et al., 2005**, con *Gracilaria* spp. en la Guajira, y de **Delgadillo-Garzón & Newmark-Umbreit, 2008**, con *Grateloupia* sp., *Gracilaria cervicornis*, *Hydropuntia cornea* e *H. musciformis* en la Bahía Portete y *H. musciformis* también en Taganga y Puerto Luz (**Camacho-Hadad & Montaña-Fernández, 2012**).

En la actualidad se tiene información básica y hay ensayos preliminares de cultivo de nueve algas rojas en el Caribe, así como estudios preliminares básicos sobre dos algas rojas en el Pacífico (Tabla 1). La información sobre el cultivo de algas marinas en Colombia se puede resumir de acuerdo a las instituciones responsables así:

(1) La Universidad del Magdalena, a través de sus investigadores y con el apoyo de Colciencias, ha realizado diversos esfuerzos para evaluar la posible utilización industrial de las algas, así como de los cultivos que pudieran suplir la cantidad necesaria de materia prima, utilizando la rodófito *G. filicina* (**Bula-Meyer & de Newball, 1983; Bula-Meyer, 1989a, 1989b**).

(2) La Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, a través de las tesis profesionales de sus egresados en Biología Marina y su participación en eventos, ha dado a conocer algunas características de los ecosistemas que han sido evaluados, al igual que las características específicas y las épocas de reproducción (**Gaviria-Melo, 1977, Durán-Salcedo, 1979; González-Delgadillo & Rojas-Ortega, 1995, Delgadillo-Garzón, et al., 2005, Camacho-Hadad & Sánchez, 2008**), y organizó un seminario de investigación para evaluar las ventajas del alga asiática *K. alvarezii*, presente en algunas regiones del Caribe (**García-Vásquez & Pardo-Castro, 2002**).

(3) El Instituto para la Investigación de los Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, a través de investigadores propios y contratados, ha comenzado a evaluar la factibilidad del cultivo de la rodófito nativa *Eucheuma isiforme* (Dawes, 1986; Littler & Littler, 2000; Gallo-Peña & Rincones-León, 2003), e introdujo *K. alvarezii* al medio natural (Díaz-Pulido & Díaz-Ruiz, 2004) para ofrecer una alternativa económica a las comunidades Wayúu a lo largo del litoral de La Guajira en un sector de 25 km entre el Cabo de la Vela y Alema.

(4) Corpoguajira desarrolló el programa básico de capacitación de las comunidades del Cabo de la Vela, La Guajira, en el cultivo de algas marinas (Cuartas, 2004).

(5) La Universidad del Valle, a través de sus investigadores y de sus estudiantes de tesis en Biología, ha trabajado en detalle sobre aspectos ecológicos y fisiológicos de las algas del Pacífico, especialmente las asociadas al ecosistema de manglar *Bostrychia calliptera* y *Catenella impudica*. Asimismo, se han desarrollado trabajos sobre crecimiento, distribución y repoblamiento (Cárdenas-Cruz, 1992; Gómez & Blanco, 1993; Peña-Salamanca, et al., 1996), así como del crecimiento en *Caulerpa sertularioides* (Marín-Salgado & Peña-Salamanca, 2011).

### La ficocultura internacional

El país con mayor experiencia en el cultivo artificial de *Gracilaria* es China. Los cultivos experimentales, y en algunos casos los de escala industrial, se vienen desarrollando en la costa sur del continente y en la costa este de Taiwán. Para el cultivo de *Gracilaria* se utilizan dos métodos: (1) la propagación vegetativa de las frondas en soportes artificiales, y (2) la diseminación de esporas sobre sustratos sólidos previamente acondicionados. La utilización de uno u otro método depende de las características biológicas de las especies. (Molina-Vargas, 2004).

El primer método es el más adecuado para las especies cuyas esporas son fáciles de obtener. *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* es un ejemplo, pues se propaga vegetativamente y puede cosecharse de tiempo en tiempo durante todo el periodo de crecimiento; *Gracilaria blodgettii* y *Gracilaria parvispora* son otros ejemplos de algas que se propagan a través de esporas liberadas de vez en cuando en primavera, verano y otoño. Con este método, las esporas se cultivan en estanques de agua de mar, en lagos salados o en salinas abandonadas. Los procedimientos son fáciles. El segundo método se usa para cultivar especies que tengan buena calidad y alto contenido de agar, tales como *Gracilaria*

**Tabla 1.** Relación de las algas nativas e introducidas cuyo cultivo ha sido evaluado en Colombia. A= Cultivo monoalgal, B= Cultivo experimental, (\*) especie asiática introducida. (1) Bula & de Newball (1983), (2) Bula (1989b), (3) Camacho & Sánchez (2008), (4) Camacho & Sánchez (2012), (5) Delgadillo & Newmark (2008), (6) Delgadillo-Garzón, et al. (2005), (7) Durán (1979), (8) García & Pardo (2002), (9) Gaviria (1977), (10) Marín & Peña (2011), (11) Montaña (2006), (12) Morales & Ángel (1975), (13) Rincones & Gallo (2004).

Familias/Especies	Cuenca hidrográfica	Tipo de cultivo	Fuente (s)
<b>Chlorophyceae</b>			
1. <i>Chlorella</i> sp.	Caribe	A	9
<b>Ulvophyceae</b>			
2. <i>Caulerpa sertularioides</i> (J. V. Lamouroux)	Pacífico	A	10
<b>Thalassiosiraceae</b>			
3. <i>Skeletonema costatum</i>	Caribe	A	9
<b>Myxophyceae</b>			
4. <i>Spirulina</i> sp.	Caribe	A	9
<b>Rhodophyceae</b>			
<b>Halymeniaceae</b>			
5. <i>Grateloupia filicina</i> (J. V. Lamouroux) C. Agardh	Caribe	B	1, 2
<b>Gracilariaceae</b>			
6. <i>Gracilaria cervicornis</i> (Turner) J. Agardh	Caribe	B	5
7. <i>Gracilaria mammillaris</i> (Montagne) M.A. Howe	Caribe	B	12
8. <i>Gracilarias</i> pp.			6
9. <i>Grateloupias</i> pp.			5
10. <i>Hydropuntia cornea</i> (J. Agardh) M. J. Winne	Caribe	B	5, 7
11. <i>Hypnea musciformis</i> (Wulfen) J. V. Lamouroux	Caribe	B	3, 4, 5
<b>Solieriaceae</b>			
12. <i>Kappaphycus alvarezii</i> (Doty) Doty ex P. C. Silva	Caribe*	B	8, 13
<b>Rhodomelaceae</b>			
13. <i>Bryothamnion seaforthii</i> (Turner) Kützing	Caribe	B	12

*asiatica*, *G. tenuistipitata*, *Gracilaria gigas* y *Gracilaria sjoestedtii*, entre otras, las cuales se propagan solamente por medio de esporas (Molina-Vargas, 2004).

El cultivo artificial de *Gracilaria* se lleva a cabo teniendo en cuenta sus características biológicas. Se deben seleccionar sitios adecuados y tomar medidas efectivas con el fin de conseguir buenos resultados. El género *Gracilaria* es cosmopolita, está presente en mares de todas las latitudes, desde el Ártico hasta las regiones templadas y tropicales. Desde su primera descripción realizada por Greville en 1830, el registro de especies se ha venido incrementado y en la actualidad se han descrito 150 especies en diversas partes del mundo. Las algas del género *Gracilaria* exhiben talos erectos que surgen de un pequeño soporte en forma de disco. En la mayor parte de las especies los talos son cilíndricos, pero también se presentan especies con talos deprimidos o en forma de láminas. Son raras las especies con forma de hoja. Las ramas son alternas o, algunas veces, subdicotómicas (Molina-Vargas, 2004).

La estructura interna del talo de *Gracilaria* consiste de corteza y médula. Las células corticales son pequeñas. Una o dos de las capas más externas tienen células con los pigmentos característicos de la clase. La médula está constituida por grandes células parenquimatosas. Las capas de la corteza, el tamaño y el número de células medulares, así como el cambio de las células de la corteza a la médula se utilizan para la identificación de las especies (Molina-Vargas, 2004).

A nivel internacional, Robledo-Ramírez, 2000, confirma que los resultados del cultivo de *K. alvarezii* (= *Eucheuma cottonii* = *Eucheuma striatum* var. *tambalang*) y de *Eucheuma denticulatum* (= *E. spinosum*) en el sur de Filipinas es el más espectacular y exitoso ejemplo de una empresa de maricultura a nivel mundial.

Se registran exitosos cultivos de *G. verrucosa* orientados a aprovechar económicamente sus coloides en las costas americanas del Pacífico chileno (Dellarossa, et al., 1980) y del mexicano (Lobo-Niembro et al., 1988), así como del Atlántico uruguayo (Fabiano & Santana, 1996) y argentino (Boraso de Zaixo, 1987).

Las praderas de *Gracilaria* spp. en Latinoamérica y el Caribe varían entre la sobreexplotación y la ausencia de aprovechamiento, y *Eucheuma* spp. se consume en cantidades mínimas. El incremento en la producción de algas puede lograrse a través de un programa de selección de cepas a largo plazo que tome en cuenta la variabilidad intraespecífica, la variabilidad intraindividual y, probablemente, diferencias entre fases nucleares (Espinoza-Avalos, 1996).

## Materiales y métodos

### Selección de la playa para el cultivo

La playa que se utilizó para el ensayo preliminar de cultivo está ubicada en la región de Punta de Piedra (10° 52' 00" N y 75° 07' 59" O, aproximadamente) en el departamento del Atlántico, Caribe colombiano. La playa se encuentra en la denominada bahía de Fray Domingo y tiene las siguientes características: parcialmente protegida de los vientos alisios por una barrera natural de pequeñas dunas y manglares (*Rhizophora*, *Avicennia*, *Conocarpus*); oleaje suave, profundidad aproximada de 1.20 m y fondo arenoso e inestable (Figura 1a, b, c, d).

El clima de la zona es de tipo tropical seco o xeromegaterno tropical, es decir, corresponde a una vegetación propia de la sequedad y las altas temperaturas. Conforme a la clasificación climática de Köppen, le corresponde un clima tropical de sabana. La temperatura promedio es de 27,4 °C. De noviembre hasta principios de abril, o sea, coincidiendo con el invierno boreal, soplan los vientos alisios del noreste que mitigan en parte el intenso calor. Hacia fines de junio soplan los alisios del sureste, produciendo el veranillo de San Juan. El régimen de precipitación se rige por dos periodos: uno seco, de diciembre a abril, y otro lluvioso que abarca de abril a principios de diciembre. En abril o mayo empiezan las lluvias de "primera". Hacia fines de junio, gran parte de julio y a veces en agosto, tiende a disminuir la lluvia, constituyéndose una "seca" conocida como veranillo de San Juan. La precipitación anual promedio es de 821 mm (<http://es.wikipedia.org/wiki/Barranquilla>). En el agua, las variaciones suelen ser mínimas, entre 26,8 y 27,8 °C, el pH fluctúa entre 7,1 y 8,7 unidades y el oxígeno disuelto, entre 4,2 y 5,3 mg/l (<http://www.crautonomia.gov.co/documentos/Planes/2013/4%20Sintesis%20Ambiental.pdf>).

### Descripción del proceso de recolección y siembra

Las frondas de *G. verrucosa* se recolectaron en la playa expuesta al mar abierto con oleaje de rompientes. El lecho marino en ese punto está constituido por rocas grandes mar adentro y rocas pequeñas cerca de la playa, de 30 cm de diámetro en promedio, en la zona eulitoral. Allí las rocas están cubiertas por arena y algas, y quedan expuestas según los movimientos del mar.

### Penachos frescos de *G. verrucosa*

El 29 de junio de 2004, cuando se realizó la recolección, las rocas estaban cubiertas parcialmente por la arena y durante la marea baja las rocas con penachos de algas localizadas en la zona supralitoral quedaban al aire libre. Para la siembra se recogieron las algas ubicadas en la zona sublitoral a una profundidad de 70 cm. No se hizo selección alguna para la recolección. Se desprendieron penachos grandes a mano y se llevaron a una caneca plástica (100 litros de capacidad



**Figura 1.** (a) Superior izquierda. *Gracilaria verrucosa* en su ambiente natural de arena y rocas subyacentes; durante la marea baja quedan expuestas al sol. (b) Superior derecha. Manejo fresco de *G. verrucosa* recolectado a 70 cm de profundidad; nótese los extremos amarillos de la fronda por exceso de luz solar. (c) Inferior izquierda. Penachos de *G. verrucosa* 120 días después de la siembra en mallas de plástico. (d) Inferior derecha. Frondas de *Hypnea muciformis* que crecieron asociadas a *G. verrucosa*.

aproximada) con agua de mar fresca. Se trasladó la caneca con las algas a la cabaña de trabajo, con el fin de montarlas para la siembra (Figura 1a, b).

#### **Enmallado y encordado de las frondas de *Gracilaria verrucosa***

Para el entalegado se utilizaron mangas de malla plástica de las usadas para empacar frutas. Se cortaron piezas de 1 m (Figura 1b), se anudaron en un extremo y se llenaron y anudaron con atados de frondas maduras de 10 cm. Los atados de frondas usados se cortaron cerca al disco basal. En cada manga se anudaron cinco atados; el peso de cada manga cargada de frondas fue de 50 g. Las mangas se ataron a una cuerda principal de polietileno (diámetro: ¼ de pulgada). La cuerda principal pesó 200 g y el peso total fue de 1.200 g. Se ataron 20 mangas, a razón de una manga por metro.

La cuerda y las mangas con las frondas de *G. verrucosa* se colocaron dentro del tanque con agua de mar y se trasladaron a la orilla para la labor de siembra.

El 30 de junio de 2004 se instaló el ensayo de cultivo utilizando dos anclas fabricados artesanalmente con varillas de hierro de ½ pulgada y tubos de PVC de 3 pulgadas de diámetro y 60 cm de largo. Se reforzó el anclaje con sacos de polipropileno cargados de arena hasta conseguir un peso de 15 kg, aproximadamente. A las anclas se ataron cuerdas de nylon de ½ cm de diámetro y en el extremo libre se ataron envases desechables de plástico de 2 ½ litros de capacidad previamente sellados con sus tapas. Se tendió la cuerda principal con las mangas a una profundidad de 1.40 m. Cada extremo de la cuerda se anudó a su respectiva cuerda de la boya. El tendido de

la cuerda principal se dejó algo flojo y en el sentido de las corrientes naturales, de manera que las mangas tuvieran libertad de movimiento.

## Resultados

El tendido se revisó cada 15 días y se observó el crecimiento de ramas nuevas y crecimiento apical de los filamentos. Algunas frondas (alrededor de 5 %) salieron de la malla y se perdieron.

El 1 de noviembre se retiró la cuerda principal con todas las mangas y las frondas. Se observó que el crecimiento de las algas fue irregular, es decir con longitudes diferentes. Algunas algas de los penachos entalagados crecieron uniformemente, en tanto que en otros solo se notó buen crecimiento en los extremos de la manga (Figura 1c).

El peso fresco de la cuerda principal con mangas y algas fue de 2,5 kg. Los filamentos más largos alcanzaron los 22 cm. El crecimiento promedio de las frondas fue de 15 cm.

Contrario a lo esperado, las algas cultivadas crecieron sin ataques invasivos de moluscos y poliquetos, que sí se observaron en las algas epifitas y los crustáceos. Solo en algunos mechones se notó la presencia de *H. musciformis*, cuyas frondas alcanzaron el mismo tamaño de las de *G. verrucosa*, hacia el mes de octubre. Se observó mayor epifitismo sobre la cuerda principal, donde se fijaron

**Tabla 2.** Relación de las algas nativas asociadas al cultivo experimental de *Gracilaria verrucosa* en la bahía de Fray Domingo, Atlántico, Caribe colombiano. Los números corresponden a la colección de INVEMAR, donde fueron depositados los ejemplares.

Especies	Número en el catálogo
Chlorophyceae	
<i>Chaetomorpha</i> sp.	
<i>Cladophora prolifera</i> (Roth) Kützing	157
<i>Enteromorpha</i> sp.	
<i>Ulva flexuosa</i> Wulfen	156
Phaeophyceae	
<i>Dictyota</i> sp.	
<i>Dictyopteris</i> sp.	
<i>Spatoglossum schroederi</i> (C. Agardh) Kützing	133
Rhodophyceae	
<i>Bryothamnion triquetrum</i> (S. G. Gmelin) M. A. Howe	483, 487
<i>Gracilaria</i> sp.	
<i>Gracilaria blodgettii</i> Harvey	482, 484, 485, 486, 488
<i>Hypnea musciformis</i> (Wulfen) J. V. Lamouroux	489

abundantes frondas de *H. musciformis*, lo cual corrobora su preferencia por el sustrato de polietileno. Se fijaron, además, varias especies de Rhodophyceae (*Bryothamnion*, *Gracilaria*, *Hypnea*), Phaeophyceae (*Dictyota*, *Dictyopteris*, *Spatoglossum*) y Chlorophyceae (*Chaetomorpha*, *Enteromorpha*, *Ulva*). En el momento de retirar la cuerda se escaparon decenas de crustáceos juveniles: cangrejos, camarones y langostas, aunque algunos estaban aferrados a las algas, incluso después de que estas quedaron al aire libre (Figura 1c, d).

## Conclusiones

En cinco meses el peso fresco de la cuerda principal con mangas y algas fue de 2,5 kg. Los filamentos más largos alcanzaron los 22 cm. El crecimiento promedio de las frondas fue de 15 cm. Como en el resto del continente, su estabilidad se alcanzó entre los meses de junio, julio y agosto. Su crecimiento experimentó un continuo incremento y la densidad fue bastante estable. La tasa promedio de crecimiento se calculó en 1,08 en los 120 días de cultivo.

Las algas cultivadas crecieron sin ataques invasivos, aunque si se observó competencia por el espacio disponible en las cuerdas y mangas con otras algas (especies de Chlorophyceae, Phaeophyceae, Rhodophyceae).

La fauna acompañante incluyó, principalmente, crustáceos juveniles (cangrejos, camarones y langostas), por lo que se comprobó la importancia de las estructuras dispuestas en la bahía como refugio de los estadios juveniles de estos individuos.

**Tabla 3.** Relación de las algas nativas asociadas al sustrato rocoso cercano al cultivo experimental de *Gracilaria verrucosa* en la bahía de Fray Domingo, Atlántico, Caribe colombiano. Los números corresponden a la colección de INVEMAR, donde fueron depositados los ejemplares.

Especies	Número en el catálogo
Chlorophyceae	
<i>Cladophora prolifera</i> (Roth) Kützing	
<i>Cladophora prolifera</i> (Roth) Kützing	157
<i>Ulva flexuosa</i> Wulfen	
<i>Ulva flexuosa</i> Wulfen	156
Phaeophyceae	
<i>Spatoglossum schroederi</i> (C. Agardh) Kützing	
<i>Spatoglossum schroederi</i> (C. Agardh) Kützing	133
Rhodophyceae	
<i>Bryothamnion triquetrum</i> (S. G. Gmelin) M. A. Howe	
<i>Bryothamnion triquetrum</i> (S. G. Gmelin) M. A. Howe	483, 487
<i>Gracilaria</i> sp.	
<i>Gracilaria blodgettii</i> Harvey	482, 484, 485, 486, 488
<i>Hypnea musciformis</i> (Wulfen) J. V. Lamouroux	489

El éxito de proyectos con especies de importancia comercial (*G. verrucosa*, entre otras) por ser fuentes de agar (Arias-Rojas & Barragán-Pardo, 2005; Dulce-Rivadeneira & Montilla-Escudero, 2005; Villalobos-Rodríguez, et al., 2007; Montilla-Escudero, et al., 2011) y de otros compuestos asociados, permite incentivar la actividad del cultivo de organismos marinos por parte de las comunidades costeras y de los grupos académicos de investigación.

### Agradecimientos

Especialmente al personal que colaboró en la recolección de las algas, en el montaje de la unidad de cultivo y en la retirada de la unidad en el momento de la recolección final y a la colega Marta Díaz-Ruiz, curadora de la colección de algas del INVEMAR, por la revisión de las algas acompañantes del cultivo y a las presentes en el sustrato rocoso adyacente al proyecto, y su determinación taxonómica.

### Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés

### Bibliografía

- Álvarez-León, R., Rodríguez-Forero, A. 2000. La acuicultura en Colombia: estado actual y perspectivas. Rev. INFOPECA Internacional. **6**: 40-47.
- Álvarez-León, R. 1982. Antecedentes y posibilidades para el desarrollo de la acuicultura en Colombia. Rev. Lat.-Amer. Acuic. **13**: 9-19.
- Álvarez-León, R., Pardo-Pardo, C. M. , Trespalacios-Rangel, A.A. 2007. Evaluación y utilización potencial de las macroalgas marinas del Caribe y el Pacífico de Colombia: estado actual de su conocimiento. UDC-Rev. BIOSALUD (Rev. Cienc. Básicas). **6**: 113-129.
- Álvarez-León, R., Trespalacios-Rangel A.A., Mercado-Reyes, M.M. 2008. Experiencias colombianas en la utilización de medios de cultivo y extractos experimentales a partir de macroalgas marinas del Caribe: estado actual de su conocimiento. UDC-Rev. BIOSALUD (Rev. Cienc. Básicas). **7**: 107-113.
- Arias-Rojas, M. del P., Barragán-Pardo, J. 2005. Determinación de la productividad del agar microbiológico a partir de algas rojas (*Gracilaria cilíndrica*, *G. mamillaris*, *G. verrucosa*) con diferentes especies bacterianas. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia.
- Boraso de Zaixo, A.L. 1987. *Gracilaria verrucosa* in Golfo Nuevo, Chubut, Argentina. Biological parameters and environmental factors. Hydrobiologica. **151/152**: 239-244.
- Bula-Meyer, G.A., de Newball, S. 1983. Cultivo experimental en el mar del alga béntica *Grateloupia filicina* (Cryptonemiales, Rhodophyta). Proyecto UTM/Colciencias, Santa Marta (Magdalena). Informe final, 45 p.
- Bula-Meyer, G.A. 1989a. Las macroalgas bénticas marinas como recurso potencial económico en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **17** (65): 383-387.
- Bula-Meyer, G.A. 1989b. Cultivo experimental en el mar del alga béntica *Grateloupia filicina*, pp. 101-104, In: de Oliveira, E. C. & N. Kautsky (eds.) Workshop Cultivation of Seaweeds in Latin America. Sao Sebastiao (S. P.) Brazil. April 2-8, 141 p.
- Camacho-Hadad, O.M., Sánchez, L. 2008. Dinámica temporal de biomasa y estados reproductivos de *Hypnea musciformis* en Punta La Loma, Magdalena: resultados preliminares. pp. 98, En: Garay, J. & M. C. Páez (eds.). Seminario Nacional de Ciencia y Tecnología del Mar (SENALMAR). INVEMAR, San Andrés Isla, Colombia, 428 p.
- Camacho-Hadad, O.M., Montaña-Fernández, J. 2012. Cultivo experimental en el mar del alga roja *Hypnea musciformis* en el área de Santa Marta, Caribe colombiano. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras, **41** (1): 29-46.
- Cárdenas-Cruz, L. S. 1992. Estudio preliminar sobre el crecimiento y repoblamiento de dos especies de macroalgas rojas *Catenella impudica* y *Bostrichia caliptera* en condiciones naturales en Punta Soldado (Bahía de Buenaventura) costa Pacífica colombiana. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias, Universidad del Valle.
- Cuartas, A. 2004. Programa de capacitación en el cultivo de algas marinas a las comunidades del Cabo de la Vela, Península de La Guajira. Corpoguajira. Riohacha (Guajira). Informe final, 51 p.
- Dawes, C. J. 1986. Botánica marina. 1ª Edición. Edit. Limusa-Wiley. México D. C. (México), 673 p.
- Delgadillo-Garzón, O., Newmark-Umbreit, F. 2008. Cultivo piloto de microalgas rojas (Rhodophyta) en la Bahía Portete, Guajira colombiana. Bol. Inst. Inv. Mar. y Cost. **37** (2): 7-26.
- Delgadillo-Garzón, O., Díaz-Ruiz, M. Lara, O. 2005. Experimentos preliminares en Santa Marta para integrar a las macroalgas *Gracilaria* dentro de un policultivo en La Guajira, Caribe colombiano. pp. 56, En: Universidad de La Habana (ed.). VII Congreso de Ficología de Latinoamérica y el Caribe. V Reunión Iberoamericana de Ficología. Universidad de La Habana, La Habana (Cuba), 158 p.
- Dellarossa, V., Romo, H., Alveal, K. 1980. Avances en el conocimiento ecológico de *Gracilaria verrucosa* en el área de Concepción, Chile. Bol. Inst. Oceanogr. **29** (2): 149-155.
- Díaz-Pulido, G., Díaz-Ruiz, M.C. 2003. Diversity of benthic marine algae of the Colombian Atlantic, Biota Colombiana **4** (2): 203-246.
- Díaz-Pulido, G., Díaz-Ruiz, M.C. 2004. Informe sobre la taxonomía, biología y ecología del alga cultivada en el Cabo de la Vela, península de La Guajira. INVEMAR-MHNM. Informe técnico, 55 p.

- Dulce-Rivadeneira, M., Montilla-Escudero, A.** 2005. Obtención de agar microbiológico a partir de *Gracilaria verrucosa*: evaluación de su productividad en agar nutritivo con diferentes especies bacterianas. Tesis profesional. Facultad de Ciencias. Departamento de Microbiología. Pontificia Universidad Javeriana.
- Durán-Salcedo, A.** 1979. Algunos aspectos ecológicos de *Gracilaria cornea* J. Agardh (Gracilariaceae: Gigartinales: Rhodophyta). Tesis profesional. Facultad de Biología Marina. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 30 p.
- Espinoza-Avalos, J.** 1996. Reflexiones sobre la cosecha, el cultivo y los coloides de las macroalgas marinas *Gracilaria* y *Euclima* en Latinoamérica y el Caribe. *Interciencia*. **21** (6): 255-258.
- Fabiano, G., Santana, O.** 1996. Cultivo de algas agaríferas (*Gracilaria verrucosa*) y abalón rojo (*Haliotis rufescens*) en Uruguay. *Agrociencia*: 222. <http://www.fagro.edu.uy/~agrociencia/index.php/directorio/articulo/viewFile/500/410>
- Gallo-Peña, H.M., Rincones-León, R.E.** 2003. Factibilidad del cultivo de algas marinas. Proyecto Corpoguajira / IIRBAVH / FAO Fortalecimiento para el desarrollo de empresas rurales a partir de productos de la biodiversidad en el Cabo de la Vela, departamento de La Guajira. Consultoría Fase II. Bogotá D. C. (Colombia). Informe final, 55 p.
- García-Vásquez, A., Pardo-Castro, P.V.** 2002. Observaciones de la adaptación de *Kappaphycus alvarezii* (Doty, 1988) y las variaciones de su tasa de crecimiento en el Acuario Mundo Marino. Seminario de Investigación. Facultad de Biología Marina, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Santa Marta (Magdalena).
- Gaviria-Melo, S.** 1977. Observación de los períodos de reproducción de algunas especies de algas colombianas. Tesis profesional. Facultad de Biología Marina, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Gómez, S., Blanco, M.C.** 1993. Tasas de crecimiento en dos especies de algas rojas de importancia comercial en la bahía de Buenaventura. Tesis profesional. Facultad de Ciencias, Universidad del Valle.
- González-Delgado, A. M., Rojas-Ortega, J.** 1995. Estructura y composición de la comunidad macroalgal en el sistema arrecifal coralino del archipiélago de San Bernardo, Caribe colombiano. Tesis profesional. Facultad de Biología Marina, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 67 p.
- Grajales-Orozco, A., Poveda-Jiménez, L.E.** 1997. Abundancia, estados reproductivos y algunos parámetros químicos de las macroalgas *Gracilaria mammillaris* y *Solieria filiformis* en Cartagena de Indias, Caribe colombiano. Tesis profesional. Facultad de Biología Marina. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Gutiérrez-Bonilla, F. de P.** 2002. Introducción, trasplante y repoblación con recursos hidrobiológicos: marco normativo nacional, internacional y competencias institucionales en Colombia. MMA/RAMSAR/CVC. Santa Fe de Bogotá D. C. (Colombia), 24 p.
- Hernández-Camacho, J. I.** 1971. Aspectos sobre la introducción de especies exóticas. I Sem. Nal. de Piscicultura. Manizales (Caldas), enero 12-16.
- Littler, D. C., Littler M.M.** 2000. Caribbean reef plants. Offshore Graphics. Washington (USA), 542 p.
- Lobo-Niembro, J.M., Marcos Ramírez, R.** 1988. Cobertura, fenología y gel de *Gracilaria verrucosa* (Hudson) Papenfuss (Rhodophyta, Gigartinales) durante un ciclo anual en el estero de Punta Banda, Baja California. Tesis profesional (Oceanólogo), Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, 37 p.
- Marín-Salgado, H. & E. Peña-Salamanca.** 2011. Ensayos para el cultivo experimental de *Caulerpa sertularioides* (Chlorophyta, Bryopsidales) en estanques de camarón en el Pacífico colombiano. *Rev. El Bohío* (Por un Medio Ambiente Responsable), 1 (3): 1-9.
- Molina-Vargas, J.N.** (trad.). 2004. Manual de entrenamiento para el cultivo de *Gracilaria* spp. y el procesamiento de algas en China. FAO. (Traducción Jairo Napoleón Molina-Vargas, 2004) (Revisión técnica Ricardo Álvarez-León, 2005).
- Morales-Sánchez, J.E., Ángel-López, L.** 1975. Observaciones ecológicas en algas marinas en Punta San José, Golfo de Morrosquillo, costa Caribe colombiana. Tesis profesional, Facultad De Ciencias. Universidad Nacional de Colombia.
- Montaña-Fernández, J.** 2006. Ensayo de cultivo en medio natural de la microalga *Hypnea musciformis* (Wulfen) Lamouroux en las áreas de Taganga y Puerto Luz (Santa Marta). Tesis profesional. Facultad de Biología Marina, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 75 p.
- Montilla-Escudero, E.A., Dulce-Rivadeneira, M.F., Quevedo-Hidalgo, B.E., Mercado-Reyes, M., Álvarez-León, R., Molina-Vargas, J.N., Trespalacios-Rangel, A.A.** 2011. Efecto del tratamiento alcalino sobre la productividad y las propiedades del agar-agar proveniente de *Gracilaria verrucosa*. *INVEMAR-Bol. Invest. Mar. y Cost.* **40** (1): 75-88.
- Peña-Salamanca, E.J., Álvarez-León, R.** 2006. Experiencias en el cultivo experimental de algas rojas en el Caribe y Pacífico de Colombia. UDC- Luna Azul. (*Rev. Cientif. - Versión en línea*), **23**: 1-5.
- Peña-Salamanca, E.J., Cárdenas, E., Bolívar, G.** 1996. Growth and distribution of two algae in a tropical estuary in the Pacific coast of Colombia, S. A. *UBJTL-Bol. Ecotrópica*. **39**: 177-188.
- Rincones-León, R.E. & H. Gallo-Peña.** 2004. Proyecto Jimoula: el cultivo de algas marinas como alternativa sustentable para las comunidades costeras de la Península de la Guajira, BIOTACOL Ltda.. Riohacha (Guajira), 11 p.
- Rincones-León, R.E., Moreno, D.A.** 2009. La maricultura de algas como alternativa de desarrollo sostenible de las comunidades

costeras de La Guajira, En: Álvarez-León, R. (ed.) Memorias Resúmenes del Congreso Internacional sobre las Experiencias de la Iniciativa ZERI en Colombia. Manizales (Caldas) Colombia, 19 a 20 de noviembre de 2009.

**Robledo-Ramírez, D.** 2000. Agronomía marina: una alternativa para el desarrollo de las comunidades pesqueras de Dzilam de Bravo. Proy. M151 INP-CIEA. Departamento de Recursos del Mar-Laboratorio de Ficología. Mérida (Yucatán) México. Informe final, 49 p.

**Rodríguez-Gómez, H., Polo-Romero, G., Mora-Lara, C.O.** (eds.). 1995. Fundamentos de acuicultura marina. Ministerio

de Agricultura y Desarrollo Rural / INPA. Santafé de Bogotá D.C. (Colombia), 225p.

**Villalobos-Rodríguez, A. P., Calderón-Carvajal, D.L., Figueroa, C., Fierro-Mora, J., Otálora-Pinzón, G., Álvarez-León, R., Quevedo-Hidalgo, B., Mercado-Reyes, M. M., Huertas-Valero, M. G., Trespalacios-Rangel, A. A.** 2007. Evaluación por el método ecométrico del agar obtenido de algas rojas colombianas. PUJ-Universitas Scientiarum. **12** (Edic. Esp. III): 57-65.

# Primer registro de *Munidopsis cubensis* Chace, 1942 (Crustacea: Anomura: Munidopsidae) para el mar Caribe sur, Colombia

Yeison Herrera-Medina, Adriana Bermúdez-Tobón, Gabriel R. Navas-Suárez\*

Programa de Biología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia

## Resumen

Se registra la especie *Munidopsis cubensis* para el mar Caribe sur, Colombia, a partir de un espécimen recolectado con red de arrastre en noviembre de 2009, costa afuera de Punta Canoa (Bolívar), a 776 m de profundidad. Se presentan los caracteres diagnósticos de la especie y se añade información sobre su distribución y ámbitos batimétrico y geográfico. Con este nuevo registro se aumenta a 24 el número de especies de *Munidopsis* registradas para Colombia.

**Palabras clave:** *Munidopsis cubensis*, Caribe, Colombia, Decapoda.

**First record of *Munidopsis cubensis* Chace, 1942 (Crustacea: Anomura: Munidopsidae) for the Southern Caribbean Sea, Colombia.**

## Abstract

*Munidopsis cubensis* is reported for the first time for the Southern Caribbean Sea, Colombia. The specimen was collected in November 2009, using a trawl, offshore of Punta Canoa (Bolívar) at a depth of 776 m. We present the species diagnostic characters, as well as its distribution and bathymetric and geographic information. This record increases to 24 the number of known species of *Munidopsis* in Colombia.

**Key words:** *Munidopsis cubensis*, Caribbean, Colombia, Decapoda.

## Introducción

En la última década la exploración de las plataformas y taludes ubicados en aguas colombianas ha cobrado gran interés debido al desconocimiento de la biota que allí habita y del impacto a que se verá sometida debido al incremento de actividades como la pesca de arrastre de profundidad y la prospección minera (Navas, *et al.*, 2010).

Entre los componentes megabentónicos de la plataforma y el talud del Caribe colombiano, los crustáceos decápodos de la superfamilia Galattheoidea Samouelle, 1819, son un grupo conspicuo por su riqueza y abundancia (Navas, *et al.*, 2003). Esta superfamilia incluye las familias Galatheiidae Samouelle, 1819, Porcellanidae Harwort, 1825, Munididae (Ahyong, *et al.*, 2010) y Munidopsidae Ortmann, 1898 (Macpherson & Baba, 2011). La ausencia del flagelo en el exópodo del primer maxilípodo es el principal carácter que diferencia a los Munidopsidae del resto de los Galattheoidea (Ahyong, *et al.*, 2010).

Munidopsidae es un grupo de Galattheoidea de taludes y mar profundo, en donde habita en una gran variedad de ambientes, incluidos respiraderos hidrotermales y

surgencias frías (Chevaldonne & Olu, 1996). A diferencia de muchas de las especies de *Munida*, presentes en gran abundancia en los fondos blandos de la plataforma y el talud superior, *Munidopsis* presenta menores densidades y una estrategia reproductiva que se diferencia de la de *Munida* por la menor cantidad de huevos de un tamaño mucho mayor (Wenner, 1982).

Los géneros que componen la familia Munidopsidae son: *Galacantha* A. Milne Edwards, 1880, *Leiogalatea* Baba, 1969, *Shinkaia* Baba y Williams, 1998 y *Munidopsis* Whiteaves, 1874 (Macpherson & Baba, 2011). Los especímenes pertenecientes al género *Munidopsis* se reconocen por tener el rostro triangular o en forma de espina, así como segmentos abdominales con surcos y estrías transversales, con o sin espinas; sexto segmento con lóbulos laterales frecuentemente bien pronunciados, margen medio transversal o convexo, ocasionalmente

### \*Correspondencia:

Gabriel R. Navas-Suárez, gnavass@unicartagena.edu.co

**Recibido:** 29 de enero de 2014

**Aceptado:** 27 de abril de 2014

pronunciado posteriormente y que sobrepasa los lóbulos laterales; subdivisiones del telson completas; flagelo antenal que usualmente sobrepasa el primer pereiópodo; ausencia de flagelo en el primer maxilípodo; epipoditos presentes en el segundo y tercer maxilípedos, algunas veces en el primer pereiópodo e, incluso, sobre el segundo y tercero; dáctilos de los pereiópodos segundo a cuarto con el margen flexor entero o con una línea de espinas fijas que disminuye de tamaño a partir de la parte proximal hacia el final de la articulación, casi nunca subquelado, con la parte distal del própodo y primer y segundo gonópodos presentes (Baba, *et al.*, 2009).

Las especies del género *Munidopsis* suelen habitar en fondos blandos de los taludes continentales, en las llanuras abisales y también se han encontrado en las fosas hidrotermales y manantiales fríos de profundidad de todo el mundo (Baba, 2005; Baba, *et al.*, 2008; Macpherson & Segonzac, 2005). En el océano Atlántico se han descrito más de 70 especies, 23 de ellas presentes en aguas colombianas, incluida la recientemente registrada *Munidopsis robusta* (Fierro, *et al.*, 2008; Ortega-Echeverría *et al.*, 2013).

Este registro de *M. cubensis* Chace, 1942, complementa el conocimiento morfológico de la especie, aporta nueva información sobre su ámbito geográfico, sobre las características específicas de su hábitat y sobre las relaciones faunísticas entre las plataformas y taludes de las ecorregiones del Gran Caribe, y nutre el Inventario Nacional de Biodiversidad.

## Materiales y métodos

El espécimen estudiado fue recolectado a bordo del buque B/I Ancón, costa afuera de Punta Canoa (10° 34' 43.9" N y 75° 39' 52.9" O) en el departamento de Bolívar, el 16 de noviembre de 2009 a 776 m de profundidad. La captura se realizó mediante arrastre de 20 minutos contados a partir del momento en que tocaba fondo y a una velocidad aproximada de 5,6 km/h. La recolecta se realizó con una red de arrastre (tipo semiglobo) diseñada para el muestreo a estas profundidades; dicha red contaba con una relinga superior de 7,70 m y una inferior de 9,50 m, un copo con ojo de malla de 30 mm y un sobrecopo de paño sin nudos y ojo de malla de 10 mm; la red estaba dotada de dos compuertas metálicas de 91 x 63 cm. Después de su captura, el organismo se enjuagó con agua de mar y se preservó en etanol al 70 %. Las características oceanográficas de la columna de agua se evaluaron con una sonda multiparamétrica CTDO (General Oceanics Ocean Seven 316 plus) y los sedimentos se recolectaron por medio de un nucleador de caja Gomex GM-2525-II (25 x 25 cm) y luego se analizó su composición granulométrica. El ejemplar se identificó por medio de estereoscopio empleando los trabajos de Chace, 1942 y Mayo, 1974, y se depositó en el Museo de Historia Natural Marina de Colombia en Santa Marta (MHNMC).

## Resultados y discusión

### *Munidopsis cubensis* Chace, 1942

La figura 1 ilustra el organismo en su vista dorsal y ventral.



Figura 1. *Munidopsis cubensis*. a. Vista dorsal, b. Vista ventral. La escala corresponde a 1 cm.

## Referencias

**Chace, 1942:** 78-80, figs. 27 y 28, 72 (clave); **Pequegnat & Pequegnat, 1970:** 138 (clave); **Pequegnat & Pequegnat, 1971:** 4 (clave); **Mayo, 1974,** 125-132, figs. 16 y 17, 34 (clave); **Fierro, et al., 2008:** 7 (lista); **Baba, et al., 2008,** 138.

## Material examinado

Ecorregión del Caribe Océánico (Colombia), costa afuera de Punta Canoa, departamento de Bolívar. Expedición Invemar-ANH II (estación 285, 10° 34' 43,9" N, 75° 39' 52,9" O), 776 m de profundidad, 16 de noviembre, 2009, 1♂ (MHNMC-8282), longitud del caparazón desde la base del rostro: 18,3 mm, ancho máximo del caparazón: 15,4 mm.

## Diagnosis

Rostro levantado, armado en el extremo con un par de espinas laterales. Región gástrica anterior del caparazón con un par de espinas epigástricas mediales. Margen frontal desarmado. Segundo y tercer segmentos abdominales armados cada uno con una espina media sobre la cresta anterior, cuarto segmento con tubérculo medial no espinoso (**Mayo, 1974**).

## Descripción

Esta se complementa con las dadas por **Chace, 1942** y **Mayo, 1974**. Caparazón más largo que ancho, abovedado transversalmente. Región gástrica levemente inflada, armada con un par de espinas anteriores distinguibles, superficie dorsal rugosa y granulada transversalmente, surco gástrico con un denticulo central pequeño. Surco cervical visible detrás de la región gástrica; la parte media del surco cervical es más profunda que sus ramas posteriores; bordes posteriores de los surcos aserrados pero sin espinas. Cerdas cortas y curvas, la mayoría sobre la superficie dorsal expuesta. Rostro carinado. Longitud del rostro de aproximadamente la mitad de la del caparazón; la parte distal doblada hacia arriba forma un ángulo de aproximadamente 45 ° desde la horizontal, armado con un par de espinas en el extremo; porción horizontal amplia. Abdomen armado con una espina media sobre la cresta transversal anterior del segundo y tercer segmento abdominal; una pequeña espina sobre el margen posterior del segundo somite abdominal; cuarto segmento abdominal con una pequeña espina media sobre el margen anterior; quinto y sexto segmentos relativamente lisos. Esternón desarmado y suave, pero con crestas entre segmentos altas y agudas. Ojos incoloros, desarmados y móviles; diámetro de las córneas ligeramente más ancho que los pedúnculos oculares. Segmento basal del pedúnculo antenular hinchado; dos espinas distolaterales, la más distal, ligeramente más ancha. Segmento basal de la antena ancho, con un diente triangular expandido de forma ventromedial; segundo

segmento con una espina distolateral puntiaguda; tercer y cuarto segmentos desarmados, aunque el cuarto presenta un lóbulo distal. Tercer maxilípodo con una espina distolateral sobre el mero y con dos espinas grandes ventromediales. Quelípedos de aproximadamente la mitad del caparazón; pereiópodos gruesos y rugosos, con espinas terminales sobre las articulaciones meral y carpal.

## Observaciones

Según la clave de **Mayo, 1974**, *M. cubensis* no presenta espinas sobre el margen del borde posterior del caparazón; sin embargo, en la descripción dada en este mismo trabajo se menciona la presencia de dos pequeñas espinas, las cuales fueron descritas por **Chace, 1942**, como diminutas e insignificantes, lo que sugiere el poco valor taxonómico de este carácter. El ejemplar recolectado en aguas colombianas no presenta espinas, espinulas, tubérculos ni protuberancias en el margen posterior del caparazón, así como tampoco el quelípedo derecho.

Para **Chace, 1942**, *M. cubensis* presenta el rostro armado lateralmente y curvado hacia arriba de forma semejante a los de *Munidopsis expansa* Benedict, 1902, y *Munidopsis gilli* Benedict, 1902, pero se diferencia de ambas por tener solamente un par de espinas gástricas bien desarrolladas sobre el caparazón. *M. gilli* tiene dos tubérculos conspicuos, línea espinosa lateral menos desarrollada, el caparazón menos ornamentado y un diente sobre la parte media del cuarto terguito abdominal. *M. expansa* presenta el caparazón más ornamentado, no tiene espinas gástricas ni abdominales, y tampoco epípodos sobre los terceros pereiópodos (**Mayo, 1974**). De las especies presentes en aguas colombianas, la más cercana morfológicamente es *Munidopsis bradleyi* Pequegnat & Pequegnat, 1971, la cual se diferencia de *M. cubensis* por tener el rostro menos curvado, epípodos solamente sobre los quelípedos, más espinas gástricas y espinas abdominales pareadas.

## Hábitat

Los especímenes se capturaron en la capa de agua intermedia antártica, la cual se ubica entre los 300 y 800 m de profundidad, con niveles mínimos de salinidad cercanos a 34,7 y temperatura de 6,5 °C (**Lozano-Duque, et al., 2010**). A la profundidad de captura se presentó una temperatura de 6,5 °C, salinidad de 34,8, saturación de O<sub>2</sub> de 56,9 % y pH de 8,2. El sedimento estaba conformado principalmente por limo fino y lodo, con un porcentaje de carbonato de 4,9 y 13,7 % de materia orgánica.

## Distribución y ámbito batimétrico

La especie fue descrita por **Chace, 1942**, a partir de un macho capturado en 1939 al noreste de Puerto Cayo Moa, provincia de Oriente, Cuba (20° 46' N, 74° 59' O),

a 1.144 m de profundidad, y su distribución se extendió hasta el Estrecho de La Florida con una hembra capturada allí (24° 02' N, 83° 02" O) a una profundidad entre 869 y 759 m (Mayo, 1974). En la base de datos del Museo de Historia Natural del Instituto Smithsonian (NMNH, <http://collections.mnh.si.edu/search/iz/>, 2014) se registra una hembra capturada por el *R/V Miguel Oliver* en 2011 frente a Nicaragua (11° 31' 54,3" N, 83° 8' 28,86" O), a una profundidad entre 791 y 861 m.

Teniendo en cuenta estos registros, y el ejemplar capturado en aguas colombianas, *M. cubensis* se puede considerar como una especie bentónica que habita sobre fondos blandos de la plataforma y el mar profundo a una profundidad conocida de 759 a 1.144 m. Su distribución abarca las ecorregiones de las Antillas Mayores, el sur del Golfo de México y el Caribe suroccidental (Figura 2), y es congruente con la de las seis especies colombianas con distribución restringida al mar Caribe: *Munidopsis brevimana*, *M. colombiana*, *M. ramahtaylorae*, *M. reynoldsi*, *M. riveroi* y *M. spinoculata*, las cuales se encuentran desde los 134 a los 4.151 m de profundidad (Navas, et al., 2013). Estas especies están restringidas a la provincia del Atlántico Noroeste Tropical (Spalding, et al., 2007), provincia con aguas someras cálidas aportadas por la corriente de las Antillas en la parte externa del Arco Antillano, por la Corriente del Caribe, que atraviesa el mar

Caribe hasta el Golfo de México, por la corriente de La Florida y por el giro Panamá-Colombia (Lozano-Duque, et al., 2010); este último podría transportar los organismos durante las fases larvales hacia el sur del Caribe colombiano (Bermúdez, et al., 2008).

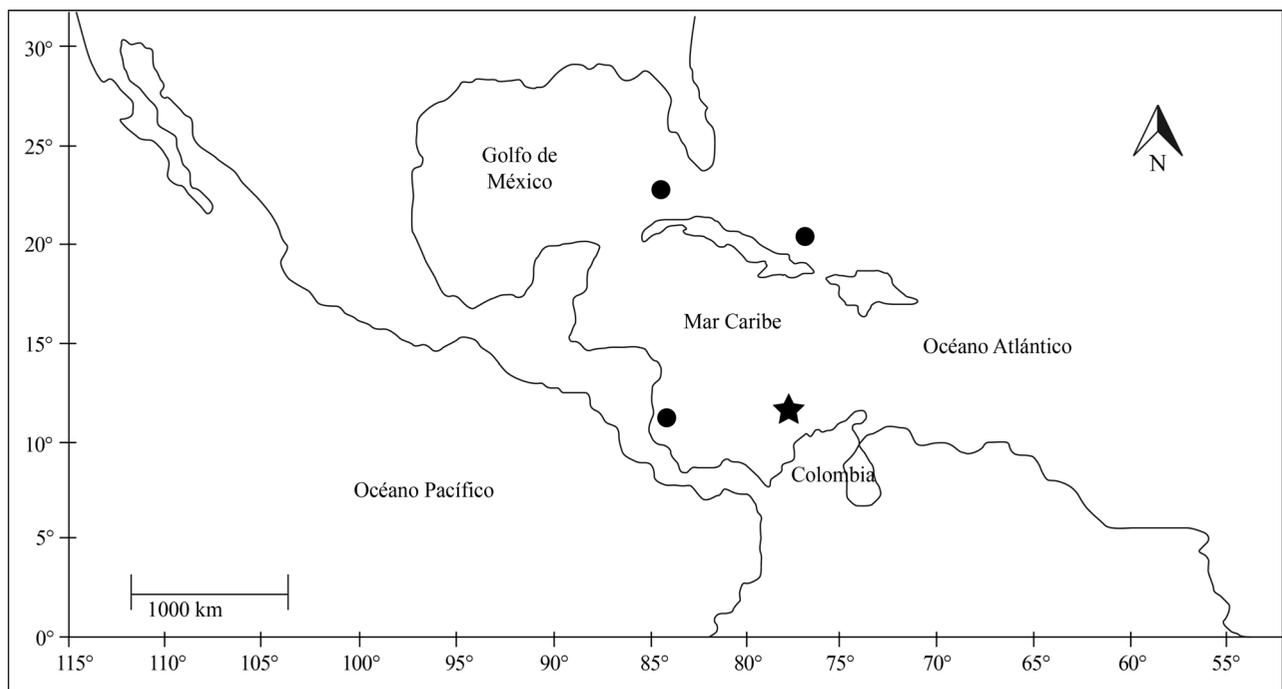
Los ejemplares de *M. cubensis* tienen poca representación en las capturas en el Caribe (Mayo, 1974); esta menor abundancia de las especies de *Munidopsis* comparada con la de las especies de la familia Munididae (Navas, et al., 2012) fue atribuida por Mayo, 1974, y por Creasey, et al., 2000, a una probable tendencia a vivir en hábitats más restringidos y a preferir las oquedades o, al menos, a vivir semienterradas en el sedimento. Wenner, 1982, determinó que las especies de *Munidopsis* tienden a enterrarse en el sustrato ante la presencia de las artes de muestreo.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la doctora Diana Marcela Bolaños Rodríguez, docente del programa de Biología de la Universidad de Cartagena, por la revisión del manuscrito; a la bióloga Natalia Rodríguez, por su apoyo en la recolección y separación del material biológico durante las expediciones de campo.

### Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.



**Figura 2.** Mapa de la distribución de *Munidopsis cubensis*. El nuevo registro en aguas colombianas está representado por una estrella negra; los registros previos se representan con círculos negros (Chace, 1942; Mayo, 1974; NMNH, 2014).

## Bibliografía

- Ahyong, S.T., Baba, K., Macpherson, E., Poore, G.** 2010. A new classification of the Galatheaidea (Crustacea: Decapoda: Anomura), *Zootaxa* 2676(1):57-68.
- Baba, K.** 2005. Deep-sea chirostylid and galatheid crustaceans (Decapoda: Anomura) from the Indo-West Pacific, with a list of species. *Galathea Reports* 20:1-317.
- Baba, K., Macpherson, E., Lin, C-W, Chan, T-Y.** 2009. Crustacean Fauna of Taiwan: Squat Lobsters (Chirostylidae and Galatheaidea). National Taiwan Ocean University, Keelung. 311 pp.
- Baba, K., Macpherson, E., Poore, G.C.B., Ahyong, S.T., Bermúdez, A., Cabezas, P., Lin, C.W., Nizinski, M., Rodrigues, C., Schnabel, K.E.** 2008. Catalogue of squat lobsters of the world (Crustacea: Decapoda: Anomura - families Chirostylidae, Galatheaidea and Kiwaidae), *Zootaxa* 1905:1-220.
- Bermúdez, A., Navas, G.R., Campos, N.H.** 2008. Populationsstruktur und genetische Isolierung von drei Springkrebs-Arten. Der Einfluss der ozeanographischen Merkmale und der geographischen Distanz zwischen den Populationen entlang der karibischen Küste von Kolumbien. VDM Verlag, Saarbrücken. 116 pp.
- Chace, F.A.** 1942. Reports on the scientific results of the Atlantis expeditions to the West Indies, under the joint auspices of the University of Havana and Harvard University, the Anomuran Crustacea. I Galatheaidea. *Torreia* 11:1-106.
- Chevaldoneé, P., Olu, K.** 1996. Occurrence of anomuran crabs (Crustacea: Decapoda) in hydro thermal vent and cold-seep communities: A review, *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 109(2):286-298.
- Creasey, S.A., Rogers, P.T., Gage, J., Jollivet, D.** 2000. Genetic and morphometric comparisons of squat lobster, *Munidopsis scobina* (Decapoda: Anomura: Galatheaidea) populations, with notes on the phylogeny of the genus *Munidopsis*. *Deep-Sea Research II* 47:87-118.
- Fierro, M., Navas, G.R., Bermúdez, A., Campos, N.H.** 2008. Lista de chequeo de las familias Galatheaidea y Chirostylidae (Crustacea: Decapoda: Anomura) del neotrópico. *Biota Colombiana*, 9(1):1-20.
- Macpherson, E., Baba K.** 2011. Taxonomy of squat lobsters. En: G.C.B. Poore, S.T. Ahyong, J. Taylor (editores), *The Biology of Squat Lobsters*. Csiro Publishing, Australia. 39-72 pp.
- Macpherson, E., Segonzac, M.** 2005. Species of the genus *Munidopsis* (Crustacea, Decapoda, Galatheaidea) from the deep Atlantic Ocean, including cold-seep and hydrothermal vent areas. *Zootaxa* 1095:1-60.
- Mayo, B.S.** 1974. The systematics and distribution of the deep-sea genus *Munidopsis* (Crustacea, Galatheaidea) in the Western Atlantic Ocean. Tesis de Doctorado, Universidad de Miami, Coral Gables, Florida, 433 pp.
- Lozano-Duque, Y., Medellín-Mora, J., Navas, G.R.** 2010. Contexto climatológico y oceanográfico del mar Caribe colombiano. En: G.R. Navas, C. Segura-Quintero, M. Garrido-Linares, M. Benavides-Serrato y D. Alonso (editores), *Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano*, Serie de publicaciones especiales, Invemar, Santa Marta, número 20, 53-84 pp.
- Navas, G.R., Bermúdez, A., Cruz, N., Campos, N.H.** 2003. Galatheaidea (Decapoda, Anomura, Galatheaidea) del Caribe colombiano, incluyendo doce primeros registros. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 32:181-214.
- Navas, G.R., Segura-Quintero, C., Garrido-Linares, M., Benavides-Serrato, M., Alonso, D.** 2010. Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano. Serie de publicaciones especiales, Invemar, Santa Marta, número 20, 458 pp.
- Navas, G.R., Bermúdez, A., Ángel-Yunda, C., Campos, N.H.** 2012. Composición y distribución de los ensamblajes de crustáceos galatheaideos (Decapoda: Anomura) presentes en aguas colombianas. *Caldasia* 34(2):367-384.
- Navas, G.R., Bermúdez, A., Campos N.H., Ángel-Yunda, C.** 2013. Afinidades biogeográficas de los galatheaideos (Decapoda: Anomura) del Caribe y Pacífico colombiano. *Revista MVZ Córdoba* 18(2):3501-3511
- NMNH.** 2014. *Munidopsis cubensis*. Smithsonian National Museum of Natural History. <http://collections.mnh.si.edu/search/iz/>, 28.01.2014.
- Ortega-Echeverría, C., Bermúdez, A., Navas, G.R.** 2013. Presencia de *Munidopsis robusta* en el Caribe colombiano (A. Milne Edwards, 1880) (Crustacea: Anomura: Munidopsidae), *Universitas Scientiarum* 19(1):43-49.
- Pequegnat, L.H., Pequegnat, W.E.** 1970. Deep-sea Anomurans of Superfamily Galatheaidea with Descriptions of Three New Species. En: W.E. Pequegnat, F.A. Chace (editores), *Contributions on the Biology of the Gulf of Mexico*, Texas A & M University, 125-170 pp.
- Pequegnat, W.E., Pequegnat, L.H.** 1971. New species and new records of *Munidopsis* (Decapoda: Galatheaidea) from the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. Supplement to Texas A & M University Oceanographic Studies, vol. 1, Gulf Publishing Co., Houston, 25 pp.
- Spalding, M.D., Fox, H.E., Allen, G.R., Davison, N., Ferdaña, Z.A., Finlayson, M., Halpern, B.S., Jorge, M.A., Lombana, A., Lourie, S.A., Martin, K.D., McManus, E., Molnar, J., Recchia, C.A., Robertson, J.** 2007. Marine Ecoregions of the World: A Bioregionalization of Coastal and Shelf Areas. *BioScience* 57(7):573-583.
- Wenner, E.L.** 1982. Notes on the distribution and biology of Galatheaidea and Chirostylidae (Decapoda: Anomura) from the Middle Atlantic Bight. *Journal of Crustacean Biology* 2(3):360-377.

# Óxidos mixtos del tipo $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ y su promoción con rutenio como catalizadores para la síntesis Fischer-Tropsch

Mónica López, Angélica Forgianny, Diana López, Andrés Moreno\*

Grupo de Química de Recursos Energéticos y Medio Ambiente, Instituto de Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

## Resumen

En este trabajo se evaluó el efecto del método de preparación (auto-combustión *Vs.* impregnación) del rutenio como promotor (0,3 % Ru) de catalizadores a base de cobalto (10 % Co) soportado sobre óxidos mixtos de  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$  en la síntesis de Fischer-Tropsch (SFT). Los catalizadores soportados sobre  $\text{MgO}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se utilizaron como materiales de referencia. En todos los casos, la actividad catalítica se evaluó en la SFT en un reactor de lecho fijo a 260 °C y presión atmosférica. De acuerdo a los resultados independientes del método de preparación empleado, los catalizadores soportados sobre óxidos mixtos favorecieron más los hidrocarburos más pesados (fracción  $\text{C}_{5+}$ ) que los materiales de referencia. En cuanto a los sistemas promovidos con Ru, se observó un incremento en la conversión de CO para los catalizadores preparados por autocombustión y una propensión hacia la formación de fracciones en el rango de la gasolina ( $\text{C}_5 - \text{C}_{11}$ ) y del diésel ( $\text{C}_{12} - \text{C}_{21}$ ). En general, los resultados obtenidos indican que los sistemas catalíticos del tipo  $\text{Ru-CoO}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  son promisorios para la síntesis F-T.

**Palabras clave:** síntesis F-T, óxidos mixtos, hidrotalcita.

## Mixed oxides of the type $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ and their promotion with ruthenium as catalysts for the Fischer Tropsch synthesis

### Abstract

In this work we evaluated the effect of the preparation method (auto-combustion vs impregnation), and of ruthenium as promoter (0.3 wt% Ru) for cobalt-based catalysts (10 wt% Co) supported on  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$  mixed oxides on the Fischer-Tropsch synthesis (FTS). Cobalt supported on  $\text{MgO}$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  were used as reference catalysts for the mixed oxides. The activity of the catalysts for the FTS was evaluated in a fixed-bed reactor at 260°C and atmospheric pressure. According to the results and independently from the preparation method, cobalt supported on  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$  mixed oxides were more selective to heavy hydrocarbons ( $\text{C}_{5+}$ ) than catalysts supported on single ( $\text{MgO}$  or  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oxides. Furthermore, all Ru-promoted catalysts were more active (i.e., had higher conversion) than non-promoted catalysts, and the selectivity to hydrocarbon fractions in the range of gasoline ( $\text{C}_5 - \text{C}_{11}$ ) and diesel ( $\text{C}_{12} - \text{C}_{21}$ ) increased. In general, the results suggest that Ru-promoted  $\text{Co/MgO-Al}_2\text{O}_3$  catalyst is a promising catalytic system for the FTS.

**Key words:** Fischer-Tropsch synthesis, mixed oxides, hydrotalcites.

## Introducción

La disminución de las reservas de petróleo alrededor del mundo en los últimos años, la variabilidad en su precio y su impacto ambiental ha suscitado la búsqueda de métodos alternativos para la obtención de combustibles líquidos más limpios y a precios competitivos. La síntesis de hidrocarburos a partir de gas de síntesis ( $\text{H}_2 - \text{CO}$ ), conocida como la síntesis Fischer - Tropsch (F-T), es una etapa clave para la obtención de combustibles líquidos producidos de fuentes diferentes del petróleo, tales como el carbón, la biomasa y el gas natural (Khodakov, Chu, *et al.*, 2007).

En la síntesis Fischer-Tropsch se usan comúnmente catalizadores a base de hierro (Fe), cobalto (Co) y rutenio (Ru). El rutenio es el metal más activo y presenta una gran selectividad hacia hidrocarburos de cadena larga ( $\text{C}_{5+}$ ) a bajas temperaturas, sin embargo, debido a su alto costo, comparado con el de los otros metales, en ocasiones se utiliza como promotor. Los metales empleados como catalizadores

### \*Correspondencia:

Andrés Moreno, amoreno.udea@gmail.com

Recibido: 17 de febrero de 2014

Aceptado: 28 de abril de 2014

a nivel industrial son el hierro y el cobalto, siendo los catalizadores a base de cobalto los más utilizados debido a su mayor actividad y selectividad de hidrocarburos de cadena más larga y su mayor resistencia a la desactivación con el tiempo (Van Der Laan & Beenackers, 1999).

Generalmente, los catalizadores de cobalto se emplean soportados sobre óxidos, específicamente sobre  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{TiO}_2$ . La selección del soporte es de gran relevancia porque desempeña diversas funciones, entre ellas, la de dispersar y estabilizar la fase activa para evitar la desactivación con el tiempo, lo cual está directamente relacionado con la pérdida de actividad y selectividad (Zhang, Kang, *et al.*, 2010).

El MgO ha sido poco empleado como soporte para catalizadores de cobalto, ya que en estudios previos se ha demostrado que estos sistemas son poco activos en la hidrogenación del cobalto (Reuel & Bartholomew, 1984; Bartholomew & Reuel, 1985; Putanov, Boskovic, *et al.*, 1992). La baja actividad de los catalizadores a base de cobalto se ha asociado al hecho de que el cobalto es poco reducible en estos sistemas debido a una fuerte interacción metal-soporte.

A pesar de la baja actividad observada en catalizadores de cobalto soportados sobre MgO, se ha reportado que la presencia de MgO en catalizadores de cobalto soportados sobre alúmina aumenta la estabilidad debido a la disminución de deposición de carbono en la superficie del catalizador, así como al grado de reducción del cobalto, favoreciendo la actividad catalítica hacia la hidrogenación de CO. Además, minimiza la formación de compuestos cobalto-soporte como aluminatos y silicatos de cobalto (Zhang, Xiong, *et al.*, 2005; Tsai, Mo, *et al.* 2011). En este mismo sentido, algunos estudios recientes en catalizadores a base de cobalto depositado sobre soportes de óxidos mixtos  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ , obtenidos a partir de precursores tipo hidrotalcita (HT), indican que este tipo de soporte permite obtener catalizadores con alta actividad y selectividad hacia hidrocarburos  $\text{C}_{5+}$ . Las mejoras en el comportamiento de los catalizadores soportados sobre óxidos mixtos  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$  con respecto a los soportados en alúmina, se ha atribuido a la mayor área superficial del soporte y la modificación de la capacidad de reducción del cobalto, lo cual permite obtener catalizadores con mayor dispersión de las partículas de cobalto metálico (Khassin, Yurieva, *et al.*, 2001; Krylova, Kulikov, *et al.*, 2008; Tsai, Mo, *et al.*, 2011).

Con el propósito de mejorar la comprensión sobre la función del MgO en los catalizadores del tipo  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ , en este trabajo se compararon dos catalizadores con igual composición química y carga de cobalto (10% Co), obtenidos por el método de autocombustión y por impregnación de  $\text{Co}^{2+}$  sobre un precursor de tipo hidrotalcita. Para facilitar la interpretación de los resultados, también se prepararon

catalizadores soportados sobre los óxidos independientes  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO}$  y  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Todos los catalizadores se caracterizaron mediante diversas técnicas de análisis y su reactividad se evaluó en la reacción de Fischer-Tropsch.

Por otro lado, teniendo en cuenta los reportes previos en torno al impacto negativo del MgO sobre la capacidad de reducción en catalizadores a base de cobalto, y el hecho de que el rutenio facilita la reducción de los precursores de Co (óxidos de cobalto) a partículas de cobalto metálicas mediante el efecto *spillover* (Ma, Jacobs, *et al.*, 2012), en este trabajo también se evaluó el efecto promotor del rutenio y su impacto sobre la capacidad de reducción de los catalizadores del tipo  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$  y su comportamiento catalítico en la reacción de Fischer-Tropsch.

## Materiales y métodos

### Preparación de los catalizadores

Los diferentes sistemas catalíticos a base de cobalto (10 % m/m Co) se sintetizaron por medio de los métodos de autocombustión e impregnación húmeda con un contenido nominal de 10% en masa de cobalto con respecto al soporte  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ .

Un catalizador del tipo  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$  se preparó por impregnación húmeda de una solución acuosa de nitrato de cobalto (II) sobre una hidrotalcita comercial (PURAL® MG 70) según la metodología descrita por Tsai, *et al.* (Tsai, Mo, *et al.*, 2011). La mezcla se dejó en agitación hasta la evaporación del solvente a temperatura ambiente, seguida por secado a 90 °C durante 24 horas. El precursor obtenido se calcinó en aire estático a 500 °C durante 10 horas (5 °C/min).

Un catalizador del tipo  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ , con la misma composición del catalizador obtenido por impregnación de la hidrotalcita comercial, se sintetizó mediante el método de autocombustión (Gallego, Mondragón, *et al.*, 2006). A una solución acuosa que contenía las sales de nitrato de los diferentes metales en la proporción deseada, se le añadió glicina (Merck, 99,7%) como agente de ignición en una relación  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_2 = 1$ . Como precursores de los diferentes metales se emplearon nitrato de cobalto (II) ( $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , Panreac, 98%), nitrato de aluminio (III) ( $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , Merck, 99%) y nitrato de magnesio (II) ( $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , Panreac, 98%). Durante la evaporación de la solución se obtuvo un líquido viscoso, el cual sufrió un proceso de autocombustión por calentamiento moderado. Durante la reacción se generaron gradientes de temperatura de llama que fluctuaron entre 1.100 °C y 1.450 °C, lo que, conjuntamente con la atmósfera de aire, permitió que se oxidaran los compuestos orgánicos, liberándose  $\text{N}_2$  y  $\text{CO}_2$  y dando lugar a la formación del óxido mixto y de un residuo carbonoso. Por último, este residuo carbonoso se eliminó por calcinación en aire estático a 500 °C durante 10 horas (5 °C/min). Este mismo procedimiento se empleó para

preparar los catalizadores de referencia soportados sobre óxido de magnesio ( $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO}$ ) y sobre óxido de aluminio ( $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

#### **Preparación de catalizadores promovidos con rutenio**

Los catalizadores calcinados se promovieron con rutenio, empleando como precursor cloruro de rutenio (III) (**Profeti, Ticianelli, et al.** 2009; **Cook, Poudyal, et al.**, 2012). El  $\text{Ru}^{3+}$  se añadió mediante el método de impregnación húmeda. Para tal fin, se preparó una solución de cloruro de rutenio (III) en una mezcla de agua y acetona (1:1) y se usaron 2 ml de la solución por gramo de catalizador previamente calcinado. Todos los sólidos se impregnaron con un contenido nominal de 0,3% en peso de rutenio. Después de la evaporación del solvente y de secarlo a 90 °C durante 24 horas, los sólidos se calcinaron en una mufla en aire estático a 300 °C durante 10 horas (5 °C/min).

#### **Caracterización de los catalizadores**

La morfología de los catalizadores sintetizados antes de la reacción se evaluó en un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6490. Se empleó un voltaje de aceleración de 20 kV y las micrografías se tomaron en el modo de electrones secundarios. Se realizó también un análisis composicional por espectrometría de energía dispersiva (*Energy Dispersive Spectrometry*, EDS) mediante un mapeo elemental a partir del análisis en cinco zonas diferentes para cada muestra. El área superficial de las muestras calcinadas se determinó siguiendo el modelo BET. Las medidas se tomaron en un equipo Micromeritics ASAP 2020 a -196 °C empleando nitrógeno molecular como adsorbato. Antes del análisis de fisiorción, las muestras se sometieron a un proceso de desgasificación durante 24 horas a 350 °C.

Las propiedades estructurales de los catalizadores se determinaron por análisis de difracción de rayos X en undifractómetro (PANalyticalX'Pert PRO MRD) equipado con ánodo de cobre ( $\text{Cu K}\alpha 1 = 1.5406 \text{ \AA}$ ) y operado a 45kV y 40mA. La recolección de datos se hizo en un ángulo  $2\theta$  entre 5 y 90°, con un paso de 0,024° y un tiempo de paso de 185 segundos.

La información sobre el estado de coordinación del cobalto en los catalizadores calcinados se obtuvo mediante espectroscopia ultravioleta visible (UV-VIS) empleando un espectrofotómetro marca Thermo Scientific (modelo Evolution™ 600 UV/VIS) con un accesorio de reflectancia difusa DRA-EV-600 y lámparas de tungsteno (325-900 nm) y deuterio (220-325 nm). El rango de medición de las muestras se situó entre 200 y 600 nm con un ancho de banda de 4 nm y velocidad de barrido de 240 nm/min.

La identificación del tipo de especies de óxidos de cobalto presente en los catalizadores calcinados se realizó por espectroscopia Raman empleando un espectrómetro Raman

con foco marca Horiba Jobin-Y von (modelo Lab RAM HR) de alta resolución, y luz láser a 784,5 nm como fuente de excitación. Los espectros de las muestras se obtuvieron en el rango de 100 a 1.000  $\text{cm}^{-1}$  y un tiempo de exposición de 60 segundos. Para este análisis los sólidos se maceraron y se analizaron en forma de pastillas de 1 cm de diámetro.

La capacidad de reducción de todos los catalizadores, con promotor de rutenio y sin él, se evaluó mediante la reducción a la temperatura programada (*Temperature-programmed Reaction*, TPR) en un equipo Autochem II 2920 (Micromeritics) equipado con un detector de conductividad térmica. Los análisis se realizaron sobre 100 mg de sólido (106-250  $\mu\text{m}$ ) utilizando una atmósfera reductora (10%  $\text{H}_2$  - 90%Ar) con un flujo de 100 ml/min desde 50 hasta 1.000 °C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min.

#### **Actividad catalítica**

La evaluación de la actividad catalítica para los sólidos promovidos y sin promover se realizó en un reactor tubular de lecho fijo y flujo descendente (diámetro interno de 13 mm), como se observa en la figura 1.

Se emplearon 0,5 g de catalizador (300 - 500  $\mu\text{m}$ ) diluido con 1,0 g de carburo de silicio (SiC) para evitar los puntos calientes. Los catalizadores se redujeron inicialmente en hidrógeno puro a 600 °C durante 15 horas con un flujo de hidrógeno de 30 ml/min y a presión atmosférica. La reacción de Fischer-Tropsch se llevó a cabo bajo las siguientes condiciones:  $\text{H}_2/\text{CO} = 2$ , empleando un flujo total de gas de síntesis de 30 ml/min, una temperatura de reacción de 260°C ( $\pm 3^\circ\text{C}$ ), bajo presión atmosférica y por un período de 24 horas. Aunque es bien conocido que las altas presiones favorecen la síntesis Fischer-Tropsch, para facilitar el procedimiento experimental, la reacción se llevó a cabo bajo presión atmosférica con el único propósito de evaluar el efecto del método de preparación de los catalizadores sobre su reactividad frente a la reacción de Fischer-Tropsch. Los resultados reportados en la literatura indican que las tendencias de la actividad en catalizadores a base de cobalto no se ven afectadas por la presión total de la reacción, aunque pueden presentarse diferencias en términos de las concentraciones de reactivos en las fases gaseosa y líquida (**Girardon, Lermontov, et al.**, 2005; **Khodakov, Chu, et al.**, 2007). Los gases de reacción  $\text{H}_2$ , CO y los hidrocarburos en fase gaseosa ( $\text{C}_1$  -  $\text{C}_6$ ) se analizaron en línea mediante un espectrómetro de masas tipo cuadrupolo (QMS 200 Pfeiffer, OmniStar GSD 301 C) con detectores Faraday y SEM (*Secondary Electron Multiplier*).

Los productos condensados se analizaron en un cromatógrafo de gases equipado con un detector de masas (Shimadzu GCMS- QP2010 ultra). Se identificaron empleando una

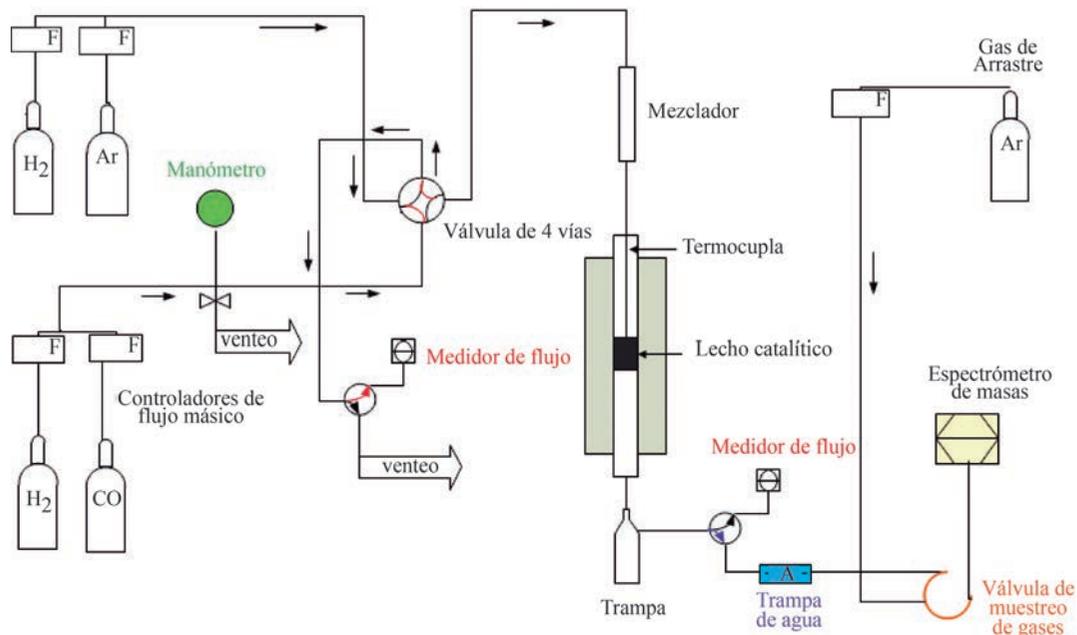


Figura 1. Montaje experimental para la evaluación de la actividad catalítica

columna SHRXI – 5MS (Shidmadzu) con un diámetro interno de 0,25 mm, longitud de 30 m y espesor de la fase estacionaria de 0,25  $\mu\text{m}$ . La identificación y calibración de los productos gaseosos se logró empleando mezclas estándar de gases: alcanos ( $\text{C}_1\text{-C}_6$ ), alquenos ( $\text{C}_2\text{-C}_6$ ),  $\text{CO}_2$ , (Scott Specialty Gases).

## Resultados y discusión

### Caracterización de los catalizadores

Los sólidos calcinados sin promover se caracterizaron mediante análisis composicional por EDS con microscopía electrónica de barrido (*Scanning Electron Microscopy*, SEM). Aunque esta no es una técnica de superficie debido a que la profundidad del análisis puede alcanzar hasta 2  $\mu\text{m}$ , permite obtener valores promedios

de composición en regiones próximas a la superficie. Esta técnica ha sido empleada por varios autores para el estudio composicional de catalizadores de cobalto (Jongsomjit, Wongsalee, *et al.*, 2005; Shen, Li, *et al.*, 2009; Tsai, Mo, *et al.*, 2011). En la tabla 1 se observan las diferentes relaciones molares de Co/Mg, Co/Al y Al/Mg. Las relaciones obtenidas experimentalmente concordaron con los valores calculados por este quiometría en lo referente a la cantidad de cobalto nominal adicionada (10 % Co). El resultado anterior indica que el método de autocombustión fue el adecuado para la preparación del óxido mixto MgO- $\text{Al}_2\text{O}_3$ . El mapeo elemental en la superficie de los sólidos sintetizados después de la calcinación mostró que el cobalto se encontraba ampliamente distribuido en todos los sólidos, lo cual era de esperarse debido al método de síntesis empleado, como se observa en la figura 2.

Tabla 1. Composición elemental por espectrometría de energía dispersiva (EDS) y áreas superficiales de los diferentes sistemas catalíticos según el modelo BET

Catalizador	Composición elemental por EDS de los diferentes sistemas catalíticos						Área superficial según el modelo BET ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
	Valores obtenidos mediante EDS			Valores calculados			
	Co/Mg	Co/Al	Mg/Al	Co/Mg	Co/Al	Mg/Al	
$\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO}$	0,19	---	---	0,19	---	---	233
$\text{Co}_x\text{O}_y/\text{Al}_2\text{O}_3$	---	0,17	---	---	0,10	---	26
$\text{Co}_x\text{O}_y/\text{HT}$	0,20	0,57	2,66	0,19	0,57	3,00	212
$\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$	0,23	0,62	2,72	0,19	0,57	3,00	154

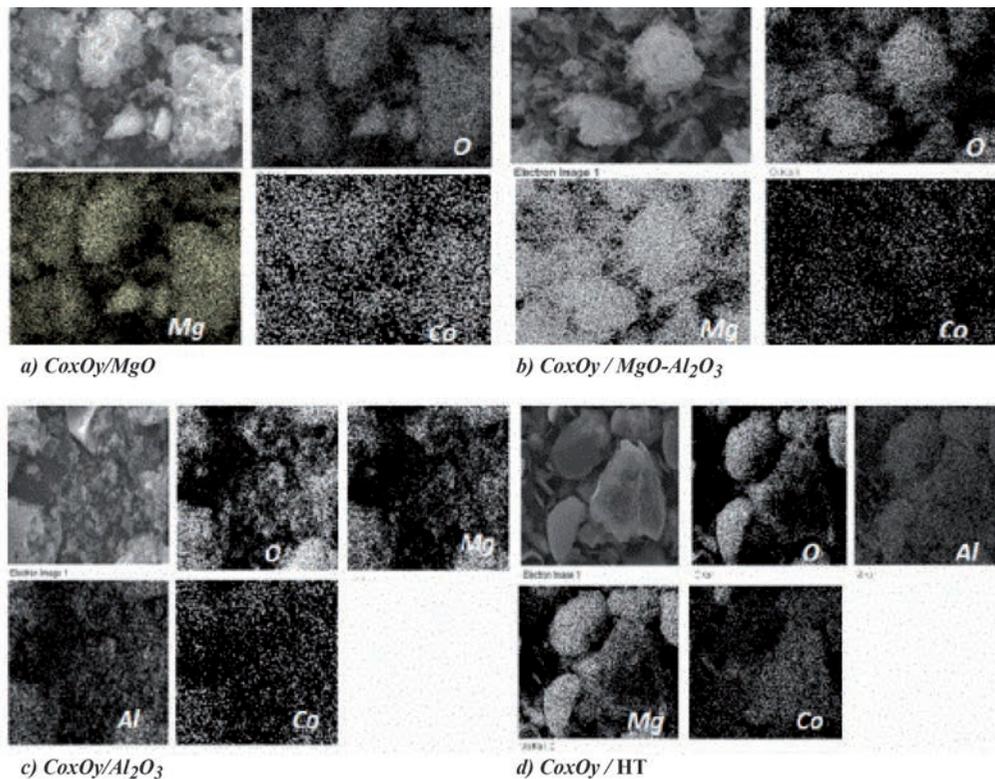


Figura 2. Mapeo elemental de los sistemas catalíticos sintetizados después de la calcinación

a)  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO}$ , b)  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ , c)  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{Al}_2\text{O}_3$  y d)  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{HT}$

Los resultados de la microscopía electrónica de barrido (SEM) de los diferentes sólidos mostraron que los materiales no tenían una morfología definida, excepto en el caso del catalizador  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{HT}$ , el cual presentó la típica morfología esférica de esta hidrotalcita comercial. Una morfología de tipo esponja se observó en los sólidos preparados por el método de autocombustión; este tipo de morfología es común en sólidos preparados con esta metodología, pues con ella la evolución de los gases formados durante la combustión en el proceso de autoignición genera una porosidad aparente en los sólidos (Figura 3).

a)  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO}$ , b)  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ , c)  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{Al}_2\text{O}_3$  y d)  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{HT}$

En general, la caracterización por medio de la difracción de rayos X (*x-ray diffraction*, XRD) mostró picos anchos y de menor intensidad para todos los sistemas catalíticos comparada con la obtenida en el difractograma de un  $\text{MgO}$ , la cual logró un alto grado de cristalinidad y se obtuvo con el mismo método de síntesis pero con calcinación a 800 °C. Esto podría sugerir que los materiales sintetizados son en gran medida amorfos (Figura 4). También se

observaron algunos picos pequeños a 36° y 59 °C para los sistemas  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO}$  y  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ , que pueden eventualmente asignarse a  $\text{Co}_3\text{O}_4$  (Zhang, Wei, *et al.*, 1999; Tavasoli, Malek Abbaslou, *et al.*, 2008; Tsai, Mo, *et al.* 2011).

a)  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO}$ , b)  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{Al}_2\text{O}_3$ , c)  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ , d)  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{HT}$ , e)  $\text{MgO}$ , (u)  $\text{MgO}$ , (o)  $\text{Co}_3\text{O}_4$ .

El área superficial BET para las muestras calcinadas se presenta en la tabla 1. Se puede ver que en el sólido  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$  sintetizado por autocombustión este método de preparación causa un detrimento en el área superficial comparado con el material sintetizado por impregnación sobre la hidrotalcita comercial. Esta disminución en el área superficial podría estar asociada con la incorporación de los cationes de cobalto a la estructura del óxido de aluminio provocando la formación progresiva de espinela estable (Bellotto, Rebours, *et al.*, 1996; Kanezaki, 2004). Probablemente, un efecto similar ocurrió en el caso del sólido  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{Al}_2\text{O}_3$ , pues el método de autocombustión favorece la migración de iones de cobalto en sitios tetraédricos del  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , formando aluminatos de cobalto, los cuales pudieron identificarse por UV-vis (van de Water, Bezemer, *et al.*, 2006; Backman, Rautiainen, *et al.*, 2009), y generando poca área superficial. En el

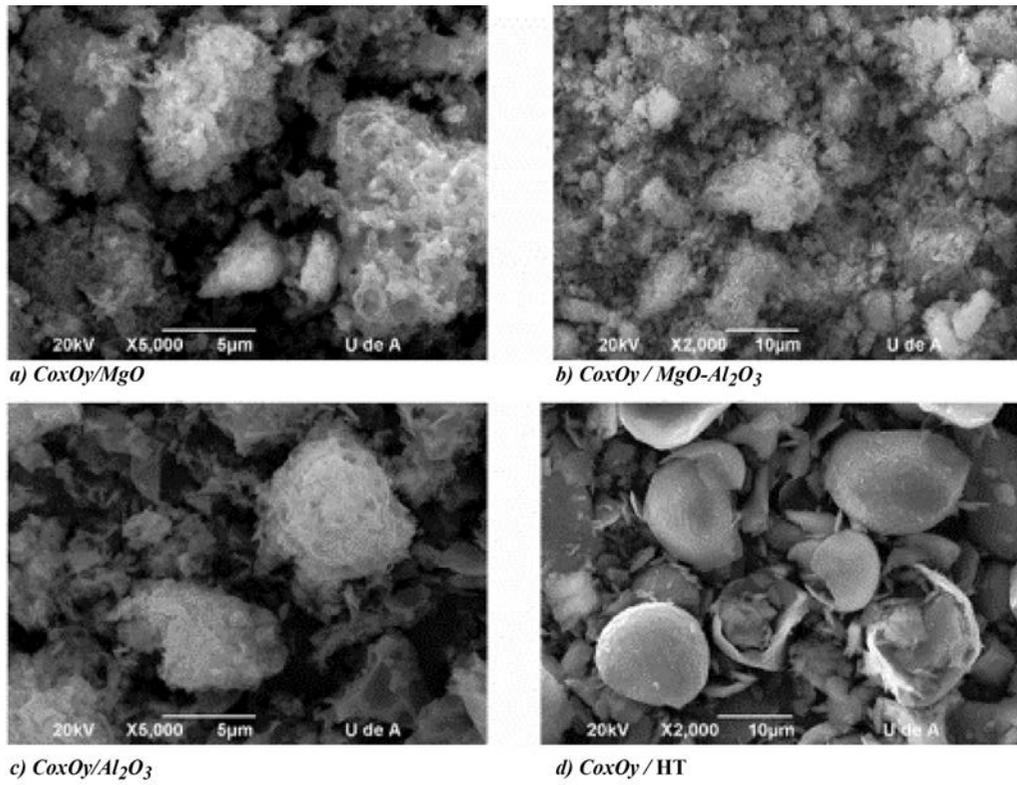


Figura 3. Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de los sistemas catalíticos sintetizados después de la calcinación

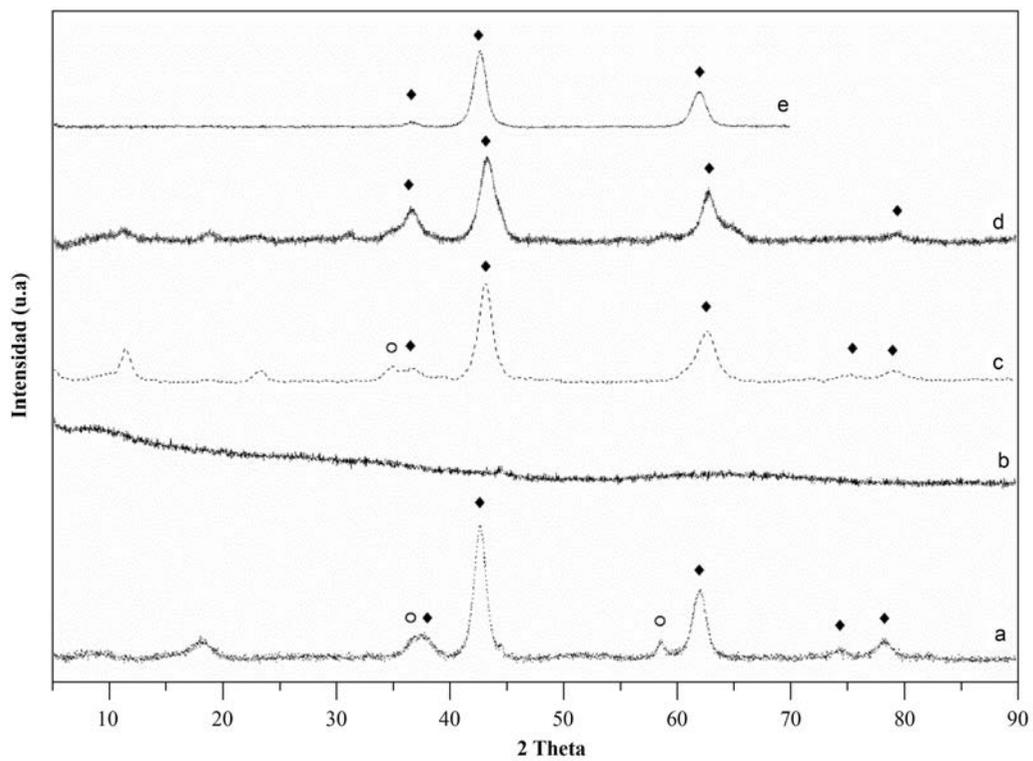


Figura 4. Difractogramas de los sistemas catalíticos sintetizados después de la calcinación

sólido  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO}$  se observó un área superficial mayor comparada con los valores reportados en la literatura para materiales con la misma composición nominal de cobalto, pero obtenidos por otros métodos de preparación:  $90 \text{ m}^2/\text{g}$  por impregnación (Tsai, Mo, et al., 2011) y  $179 \text{ m}^2/\text{g}$  por coprecipitación (Shen, Li, et al., 2009), lo que muestra que, en este caso, el método de autocombustión para los óxidos mixtos  $\text{MgO} - \text{CoO}_x$  favoreció una dispersión adecuada de la fase activa en el soporte.

Los patrones de difracción muestran que los sistemas catalíticos  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO}$ ,  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ , y  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{HT}$  presentaron características típicas del  $\text{MgO}$  (estructura de la periclasa) o de soluciones sólidas  $(\text{Co}, \text{Mg})\text{O}$  con picos a  $37^\circ$ ,  $42^\circ$  y  $61^\circ\text{C}$  (Shen, Li, et al., 2009). No fue posible observar señales significativas correspondientes a las fases de los óxidos de cobalto. Los resultados de algunos estudios sugieren que las fases que contienen cobalto están dispersas en el soporte y que las partículas tienen un tamaño muy pequeño (Tsai, Mo, et al., 2011), lo que concuerda con la distribución homogénea que se observó en los resultados del mapeo elemental mediante SEM. En cuanto al catalizador  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{Al}_2\text{O}_3$ , no fue posible observar señales asociadas a la alúmina ni a las fases de los óxidos de cobalto o de los óxidos binarios de aluminio y cobalto.

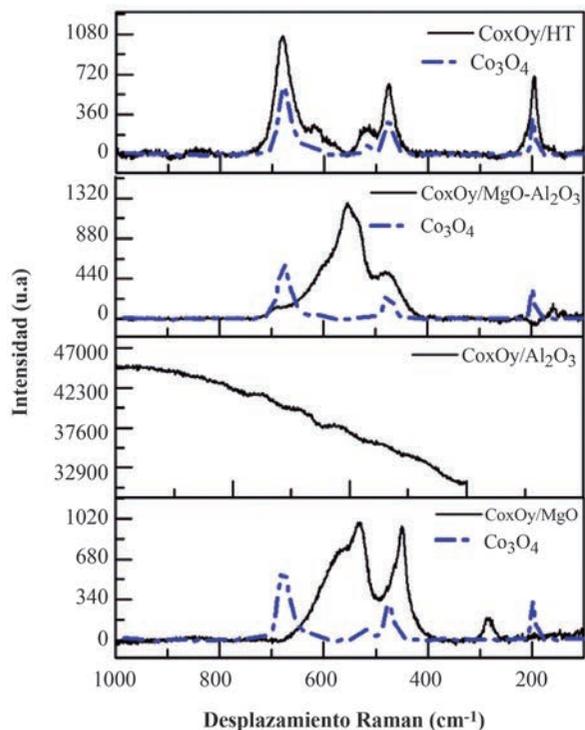


Figura 5. Espectros Raman de los sistemas catalíticos sintetizados después de la calcinación

En la figura 5 se presentan los espectros Raman para los cuatro sistemas catalíticos superpuestos al espectro Raman de la espinela  $\text{Co}_3\text{O}_4$  no soportada. Mediante espectroscopia Raman se evidenció la formación de una fase correspondiente a la espinela de cobalto ( $\text{Co}_3\text{O}_4$ ) en el sólido  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{HT}$ , cuyo espectro exhibió cinco señales intensas a  $194, 477, 513, 615$  y  $684 \text{ cm}^{-1}$ , correspondientes a los modos activos en Raman ( $A_{1g}, E_g, 3F_{2g}$ ) (Jongsomjit, Panpranot, et al., 2001) de este óxido de cobalto. Esto podría sugerir una interacción moderada entre el óxido de cobalto y el soporte, ya que no se observó la formación de fases mixtas soportadas en cobalto de mezclas de óxido, como en el caso de la espinela aluminio-cobalto  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  (Khodakov, Chu, et al., 2007), ni de óxidos mixtos del tipo  $\text{Co}_x\text{Mg}_{1-x}\text{O}$  (Richards, Mulukutla, et al., 2001). Además, se observaron fases mixtas soportadas en cobalto para los catalizadores  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO}$  y  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ . Estos resultados sugieren que en estos últimos sistemas hay presencia de sitios de naturaleza diferente. Con base en estos resultados, se propone el planteamiento de que en algunos sitios de la superficie habría una interacción fuerte entre el óxido de cobalto y el soporte, específicamente en sitios superficiales donde se hayan formado óxidos mixtos de cobalto y magnesio, mientras que en otros sitios superficiales se presentaría una interacción menor, permitiendo que el cobalto esté presente como  $\text{Co}_3\text{O}_4$  y no forme algún tipo de óxido mixto. La formación de este tipo de especies probablemente se vio favorecida por el método de síntesis empleado para obtener el precursor catalítico, ya que durante el proceso de autocombustión se alcanzaron altas temperaturas en la llama ( $1.100 - 1.450 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

En el caso del catalizador  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{Al}_2\text{O}_3$  no se observó ninguna señal correspondiente a la espinela de cobalto ( $\text{Co}_3\text{O}_4$ ) ni al aluminato de cobalto ( $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ ). En la literatura se han reportado las siguientes señales para sistemas  $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$  preparados por impregnación incipiente y que presentan las fases ya mencionadas:  $198, 480, 519, 619$  y  $690 \text{ cm}^{-1}$  y dos bandas débiles a  $412$  y  $753 \text{ cm}^{-1}$  (Jongsomjit & Goodwin Jr., 2002).

Para complementar la información obtenida por espectroscopia Raman sobre las fases de cobalto presentes en los sistemas catalíticos después de la calcinación, los catalizadores calcinados se caracterizaron por espectroscopia UV-vis. En la tabla 2 se observan las asignaciones espectrales para los diferentes sistemas catalíticos.

En el caso de los precursores catalíticos preparados sobre óxidos mixtos de tipo  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{HT}$ ), se observaron señales características de la espinela de cobalto  $\text{Co}_3\text{O}_4$  a  $380$  y  $700 \text{ nm}$ , lo que concuerda con los resultados obtenidos por espectroscopia Raman. Para el sistema catalítico  $\text{Co}_x\text{O}_y/\text{MgO}$  se observaron bandas en  $400 \text{ nm}$  y cerca de  $700 \text{ nm}$ , las cuales se han

**Tabla 2.** Asignaciones espectrales por UV-vis de las fases del cobalto (Co) para los diferentes sistemas catalíticos

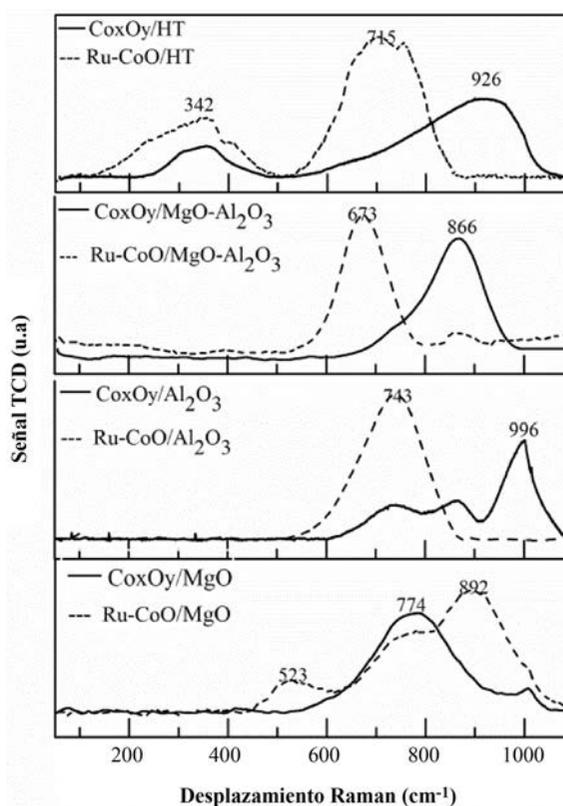
Catalizador	Fase de Co	Transición	(nm)
CoxOy/MgO	Co <sub>x</sub> Mg <sub>1-x</sub> O		400 y 700
CoxOy/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CoAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (T <sub>h</sub> )	<sup>4</sup> A <sub>2</sub> → <sup>4</sup> T <sub>1</sub> (P)	545
		<sup>4</sup> A <sub>2</sub> → <sup>4</sup> T <sub>1</sub> (P)	580
		<sup>4</sup> A <sub>2</sub> → <sup>4</sup> T <sub>1</sub> (P)	630
CoxOy/MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (Co <sup>3+</sup> (O <sub>h</sub> ))	<sup>1</sup> A <sub>1g</sub> → <sup>1</sup> T <sub>2g</sub>	380
		<sup>1</sup> A <sub>1g</sub> → <sup>1</sup> T <sub>1g</sub>	630
CoxOy/HT	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (Co <sup>3+</sup> (O <sub>h</sub> ))	<sup>1</sup> A <sub>1g</sub> → <sup>1</sup> T <sub>2g</sub>	380
		<sup>1</sup> A <sub>1g</sub> → <sup>1</sup> T <sub>1g</sub>	670

reportado previamente en óxidos mixtos de tipo Co<sub>x</sub>Mg<sub>1-x</sub>O y corresponden a cobalto con coordinación octaédrica Co (III) (Das & Deo, 2011; Das & Deo, 2012).

Un resultado importante fue la identificación de la formación de aluminato de cobalto en el sistema catalítico Co<sub>x</sub>O<sub>y</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, el cual no se evidenció por espectroscopia Raman. Para el sólido Co<sub>x</sub>O<sub>y</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se observaron en el espectro Raman bandas a 545, 580 y 630 nm, las cuales están asociadas a una fase del cobalto tipo espinela CoAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, en la que el cobalto posee una coordinación tetraédrica (van de Water, Bezemer, *et al.*, 2006; Das & Deo, 2011).

Los perfiles de reducción a temperatura programada (H<sub>2</sub>-TPR) para los sólidos calcinados promovidos y sin promover se muestran en la figura 6. En los perfiles de los sólidos sin promover se observaron señales asociadas a fases difícilmente reducibles, con temperaturas de reducción superiores a los 600 °C; el catalizador Co<sub>x</sub>O<sub>y</sub>/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mostró eventos de reducción a 744 y 868 °C. Estos resultados sugieren que se produjo una interacción marcada entre el Co<sub>x</sub>O<sub>y</sub> y el soporte en los catalizadores, debida, probablemente, al método de síntesis empleado y a la temperatura a la cual se realizó el tratamiento térmico de calcinación (Querini, Ulla, *et al.*, 1998; Jongsomjit, Panpranot, *et al.*, 2001; Khassin, Yurieva, *et al.*, 2001; Wang & Ruckenstein, 2001). De forma coherente con esta explicación, el perfil de TPR para el catalizador obtenido por impregnación de la hidrotalcita presentó eventos de reducción a temperaturas más bajas: 352 y 898 °C, lo que sugiere que, en este caso, la interacción entre las especies oxidadas del cobalto y el soporte MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fueron moderadas y de menor intensidad que en el caso del catalizador obtenido por autocombustión (Tsai, Mo, *et al.*, 2011).

En los perfiles de TPR para las muestras promovidas con rutenio se observó, en general, un desplazamiento de los eventos de reducción hacia una temperatura más baja, lo cual indica que la presencia del rutenio, el cual cambia

**Figura 6.** Perfiles de la reducción a temperatura programada (TPR) de los catalizadores promovidos con rutenio y sin promover

las propiedades estructurales de los materiales, modificó la estabilidad de las interacciones. Estos resultados son similares a los reportados por Khodakov, *et al.*, (Khodakov, Chu, *et al.*, 2007) para los catalizadores de Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; estos autores observaron que el rutenio inhibe la formación de óxidos de difícil reducción y de aluminatos de cobalto, disminuyendo las interacciones entre el cobalto y el soporte, lo que podría estar asociado a un efecto *spillover* del rutenio, y favoreciendo, de esta manera, la reducción de las partículas del óxido de cobalto cercanas (Khassin, Yurieva, *et al.* 2001; Diehl & Khodakov, 2009; Cook, Poudyal, *et al.*, 2012).

#### Actividad catalítica en la síntesis Fischer-Tropsch

En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de la actividad de los diferentes catalizadores después de 24 horas de reacción. Los valores reportados para las conversiones presentan una desviación estándar inferior a 5% y los reportados para las selectividades, inferior a 7%.

No se presentan los valores numéricos para los hidrocarburos C<sub>6+</sub>, ya que no se cuantificaron porque una parte de ellos se condensó en una trampa de agua ubicada a la entrada del sistema de análisis, lo que causó su pérdida masiva.

**Tabla 3.** Conversión de monóxido de carbono (CO) y selectividades de los sistemas catalíticos

Catalizadores	Conversión de CO (%)	Selectividades				
		CO <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	Parafinas C <sub>2</sub> -C <sub>6</sub>	Olefinas C <sub>2</sub> -C <sub>6</sub>	C <sub>6+</sub>
CoxOy/MgO	7,1	0,8	26,1	13,0	60,0	✓
CoxOy/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,2	100,0	0,0	0,0	0,0	
CoxOy/HT	23,9	0,4	80,2	4,1	15,5	✓
CoxOy/MgO- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,4	60,2	39,8	0,0	0,0	
Ru-CoO/MgO	13,5	1,3	84,3	5,4	9,4	
Ru-CoO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,6	0,4	81,0	4,1	14,4	✓
Ru-CoO/HT	9,0	1,0	48,9	9,5	40,6	✓
Ru-CoO/MgO- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,9	0,5	36,7	9,1	53,8	✓

Los sistemas catalíticos sobre óxidos mixtos (MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y HT) mostraron diferencias significativas en la actividad y la selectividad dependiendo del método de preparación. Para el sólido obtenido por autocombustión se presentó baja conversión y alta selectividad hacia metano, lo que sugiere la existencia de sitios difícilmente reducibles y pocos sitios activos, como se evidenció en la TPR. El sistema catalítico obtenido por impregnación mostró una alta conversión y selectividad hacia hidrocarburos en el rango de las gasolinas (C<sub>5</sub>-C<sub>11</sub>) sin necesidad de emplear un promotor de la reducción, lo que probablemente se debió a que la interacción entre el cobalto y el soporte no fue tan fuerte como en el caso de los catalizadores sintetizados por autocombustión. La mayor actividad sobre el catalizador obtenido por impregnación concuerda con los resultados relativos a la capacidad de reducción obtenidos por TPR, dando cuenta de interacciones moderadas entre Co<sub>x</sub>O<sub>y</sub> y el soporte, al igual que los resultados obtenidos por espectroscopia Raman y UV-vis. Además, la mayor área superficial del catalizador obtenido por impregnación probablemente facilitó una mejor dispersión de la fase activa.

En cuanto a los materiales de referencia, se pudo observar que el catalizador a base de cobalto soportado sobre alúmina (Co<sub>x</sub>O<sub>y</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) presentó la mayor conversión; sin embargo, este catalizador presentó alta selectividad hacia la formación de CO<sub>2</sub>. Este resultado sugiere que hay pocos sitios activos (Co metálico) para la hidrogenación del monóxido de carbono, posiblemente debido a la baja capacidad de reducción de las especies de cobalto presentes en el catalizador (es decir, formación de aluminato de cobalto), las cuales no se reducen durante el proceso de reducción de los catalizadores previo a la introducción de la mezcla de reacción. Esta hipótesis es coherente con los resultados de XRD, UV-vis y TPR. Algunos autores han reportado que en los sistemas de cobalto soportados sobre

alúmina se observa una tendencia al incremento de CO<sub>2</sub> (y otros hidrocarburos) a medida que aumenta el porcentaje de conversión, (Ma, Jacobs, *et al.*, 2011; Bukur, Pan, *et al.*, 2012). El análisis elemental del catalizador Co<sub>x</sub>O<sub>y</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> después de la reacción no mostró un contenido significativo de carbono, lo cual permite descartar la formación de residuos carbonosos y CO<sub>2</sub> a través de la reacción de Boudouard (CO → C + CO<sub>2</sub>). Se requiere un estudio más detallado de este sistema catalítico que permita explicar la elevada formación de CO<sub>2</sub> observada. El sistema catalítico Co<sub>x</sub>O<sub>y</sub>/MgO presentó una baja conversión, lo que coincide con lo reportado en la literatura para este tipo de sistemas. Como posibles razones para esta baja actividad se han propuesto la supresión de adsorción de H<sub>2</sub>, la formación de fases mixtas inactivas del tipo MgO-CoO<sub>x</sub> después del tratamiento a altas temperaturas (> 500 ° C) y la fuerte alcalinidad de MgO, la cual incrementa la densidad electrónica del cobalto soportado, creando una interacción fuerte entre el cobalto (Co) y el monóxido de carbono (CO), lo cual dificulta la posterior disociación del CO adsorbido sobre un sitio activo (Khodakov, Chu, *et al.*, 2007; Chen, Tian, *et al.*, 2012). En el presente trabajo, los resultados de TPR sugieren la existencia de interacciones fuertes entre el cobalto y el soporte, lo que supone la formación limitada de sitios activos a la temperatura de reducción adoptada.

Con respecto a los catalizadores promovidos con rutenio, los sistemas catalíticos sobre óxidos mixtos mostraron un incremento en la producción de hidrocarburos C<sub>1</sub>-C<sub>6</sub>, y en el caso del sistema Ru-CoO/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, también se observó la formación de hidrocarburos pesados hasta alcanzar el C<sub>27</sub>, los cuales no se formaron en ausencia del promotor. Por otro lado, se observó un incremento en la conversión de CO para el material obtenido por autocombustión, lo que podría estar relacionado con un cambio en las propiedades estructurales de los materiales, como el incremento en

la dispersión de la fase metálica y el mejoramiento en la capacidad de reducción de los sólidos, debido a un efecto *spillover* del rutenio (Morales & Weckhuysen, 2006).

Para los materiales de referencia se observó un incremento en la conversión de CO para el material Ru-CoO/MgO relacionado con cambios estructurales del material como se mencionó anteriormente; sin embargo, en la selectividad se observó una preferencia hacia la producción de metano, probablemente debida a la formación de aleaciones bimetálicas de rutenio y cobalto, las cuales no permiten una densidad alta de sitios de cobalto ni una buena dispersión (Morales & Weckhuysen, 2006). Además, el sistema catalítico Ru-CoO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presentó una disminución en la conversión y un incremento en la producción de hidrocarburos C<sub>1</sub>-C<sub>6</sub> debidos al aumento de sitios activos, lo que se evidenció en la disminución de la temperatura de los eventos de reducción, fenómeno que también podría responder a la formación de aleaciones bimetálicas entre el rutenio y el cobalto que modifican las propiedades electrónicas de los materiales (Morales & Weckhuysen, 2006).

## Conclusiones

El método de autocombustión permitió obtener sistemas catalíticos del tipo Co<sub>x</sub>O<sub>y</sub>/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> altamente dispersos (resultados con XRD y SEM-EDS) y estables, probablemente por la existencia de interacciones fuertes entre el cobalto y el soporte. Por otro lado, el método de impregnación permitió la obtención de sistemas catalíticos de tipo Co<sub>x</sub>O<sub>y</sub>/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> altamente dispersos y con mejores propiedades de reducción debido a la interacción más débil entre el cobalto y el soporte.

La actividad catalítica mostró que el material obtenido por impregnación presentó una mayor conversión que el obtenido por autocombustión, sin embargo, presentó una alta selectividad hacia CH<sub>4</sub>.

El efecto del rutenio como promotor fue favorable en el caso de los materiales sintetizados por autocombustión, con un aumento de la conversión y la selectividad hacia los hidrocarburos C<sub>6+</sub>. En el caso del método de impregnación, la conversión disminuyó, pero mejoró la selectividad hacia hidrocarburos de cadena más larga.

El método de autocombustión es promisorio para la obtención de materiales del tipo Ru-CoO/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en la síntesis F-T con preferencia hacia la formación de fracciones de interés en el rango de la gasolina (C<sub>5</sub> - C<sub>11</sub>) y del diésel (C<sub>12</sub> - C<sub>21</sub>).

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias por la financiación del proyecto 1115-521-28804, y al Programa de Sostenibilidad (2013-2014) de la Universidad de Antioquia. M. López agradece a Colciencias por la financiación recibida.

## Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

## Bibliografía

- Backman, L. B., Rautiainen, A., et al.** (2009). The interaction of cobalt species with alumina on Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts prepared by atomic layer deposition. *Applied Catalysis A: General*. **360**(2): 183-191.
- Bartholomew, C. H., Reuel, R. C.** (1985). Cobalt-support interactions: Their effects on adsorption and carbon monoxide hydrogenation activity and selectivity properties. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*. **24**(1): 56-61.
- Bellotto, M., Rebours, B., et al.** (1996). Hydrotalcite decomposition mechanism: A clue to the structure and reactivity of spinel-like mixed oxides. *Journal of Physical Chemistry*. **100**(20): 8535-8542.
- Bukur, D., Pan, Z., et al.** (2012). Effect of CO Conversion on the Product Distribution of a Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Fischer-Tropsch Synthesis Catalyst Using a Fixed Bed Reactor. *Catalysis Letters*. **142**(11): 1382-1387.
- Cook, K. M., Poudyal, S., et al.** (2012). Reducibility of alumina-supported cobalt Fischer-Tropsch catalysts: Effects of noble metal type, distribution, retention, chemical state, bonding, and influence on cobalt crystallite size. *Applied Catalysis A: General*. **449**(0): 69-80.
- Chen, L., Tian, X., et al.** (2012). The effect of surface acidic and basic properties of highly loaded Co catalysts on the Fischer-Tropsch synthesis. *Catalysis Communications*. **28**(0): 155-158.
- Das, T., Deo, G.** (2011). Synthesis, characterization and *in situ* DRIFTS during the CO<sub>2</sub> hydrogenation reaction over supported cobalt catalysts. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. **350**(1-2): 75-82.
- Das, T., Deo, G.** (2012). Effects of metal loading and support for supported cobalt catalyst. *Catalysis Today*. **198**(1): 116-124.
- Diehl, F., Khodakov, A. Y.** (2009). Promotion par les métaux nobles de catalyseurs Fischer-Tropsch à base de cobalt : une revue. *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP*. **64**(1): 11-24.
- Gallego, G. S., Mondragón, F., et al.** (2006). CO<sub>2</sub> reforming of CH<sub>4</sub> over La-Ni based perovskite precursors. *Applied Catalysis A: General*. **311**: 164-171.
- Girardon, J.S., Lermontov, A.S., et al.** (2005). Effect of cobalt precursor and pretreatment conditions on the structure and catalytic performance of cobalt silica-supported Fischer-Tropsch catalysts. *Journal of Catalysis*. **230**(2): 339-352.
- Jongsomjit, B., Goodwin, J. G., Jr.** (2002). Co-support compound formation in Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts: Effect of reduction gas containing CO. *Catalysis Today*. **77**(3): 191-204.

- Jongsomjit, B., Panpranot, J., et al.** (2001). Co-Support Compound Formation in Alumina-Supported Cobalt Catalysts. *Journal of Catalysis*. **204**(1): 98-109.
- Jongsomjit, B., Wongsalee, T., et al.** (2005). Characteristics and catalytic properties of Co/TiO<sub>2</sub> for various rutile: Anatase ratios. *Catalysis Communications*. **6**(11): 705-710.
- Kanezaki, E.** (2004). Preparation of layered double hydroxides. *Interface Science and Technology*. W. Fernando and S. Kestur Gundappa, Elsevier. **Volume 1**: 345-373.
- Khassin, A. A., Yurieva, T.M., et al.** (2001). Cobalt-aluminum co-precipitated catalysts and their performance in the Fischer-Tropsch synthesis. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. **168**(1-2): 193-207.
- Khodakov, A. Y., Chu, W., et al.** (2007). Advances in the Development of Novel Cobalt Fischer-Tropsch Catalysts for Synthesis of Long-Chain Hydrocarbons and Clean Fuels. *Chemical Reviews*. **107**(5): 1692-1744.
- Krylova, M. V., Kulikov, A.B., et al.** (2008). Cobalt-containing catalysts made from layered double hydroxides for synthesis of hydrocarbons from carbon monoxide and hydrogen. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* **44**(5): 339-343.
- Ma, W., Jacobs, G., et al.** (2011). Fischer-Tropsch Synthesis: Influence of CO Conversion on Selectivities, H<sub>2</sub>/CO Usage Ratios, and Catalyst Stability for a Ru Promoted Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst Using a Slurry Phase Reactor. *Topics in Catalysis* **54**(13-15): 757-767.
- Ma, W., Jacobs, G., et al.** (2012). Fischer-Tropsch synthesis: Effect of Pd, Pt, Re, and Ru noble metal promoters on the activity and selectivity of a 25%Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst. *Applied Catalysis A: General* **437-438**(0): 1-9.
- Morales, F., Weckhuysen, B.M.** (2006). Promotion Effects in Co-based Fischer-Tropsch Catalysis. *Catalysis* **19**: 1-40.
- Profeti, L. P. R., Ticianelli, E.A., et al.** (2009). Ethanol steam reforming for production of hydrogen on magnesium aluminate-supported cobalt catalysts promoted by noble metals. *Applied Catalysis A: General* **360**(1): 17-25.
- Putanov, P., Boskovic, G., et al.** (1992). Promoter effect of Cu, Co and K on Fe/MgO in CO hydrogenation. *Journal of Molecular Catalysis* **71**(1): 81-92.
- Querini, C. A., Ulla, M.A., et al.** (1998). Catalytic combustion of diesel soot particles. Activity and characterization of Co/MgO and Co,K/MgO catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental* **15**(1-2): 5-19.
- Reuel, R. C., Bartholomew, C.H.** (1984). Effects of support and dispersion on the CO hydrogenation activity/selectivity properties of cobalt. *Journal of Catalysis* **85**(1): 78-88.
- Richards, R., Mulukutla, R.S., et al.** (2001). Nanocrystalline ultra high surface area magnesium oxide as a selective base catalyst. *Scripta Materialia* **44**(8-9): 1663-1666.
- Shen, Q., Li, L., et al.** (2009). A study on N<sub>2</sub>O catalytic decomposition over Co/MgO catalysts. *Journal of Hazardous Materials* **163**(2-3): 1332-1337.
- Tavasoli, A., Malek Abbaslou, R.M., et al.** (2008). Deactivation behavior of ruthenium promoted Co/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts in Fischer-Tropsch synthesis. *Applied Catalysis A: General* **346**(1-2): 58-64.
- Tsai, Y.T., Mo, X., et al.** (2011). Hydrotalcite supported Co catalysts for CO hydrogenation. *Applied Catalysis A: General* **396**(1-2): 91-100.
- van de Water, L. G. A., Bezemer, G.L., et al.** (2006). Spatially resolved UV-vis microspectroscopy on the preparation of alumina-supported Co Fischer-Tropsch catalysts: Linking activity to Co distribution and speciation. *Journal of Catalysis* **242**(2): 287-298.
- Van Der Laan, G. P., Beenackers, A.A. C. M.** (1999). Kinetics and Selectivity of the Fischer-Tropsch Synthesis: A Literature Review. *Catalysis Reviews: Science and Engineering* **41**(3): 255 - 318.
- Wang, H. Y., Ruckenstein, E.** (2001). Partial Oxidation of Methane to Synthesis Gas over Alkaline Earth Metal Oxide Supported Cobalt Catalysts. *Journal of Catalysis* **199**(2): 309-317.
- Zhang, Q., Kang, J., et al.** (2010). Development of Novel Catalysts for Fischer-Tropsch Synthesis: Tuning the Product Selectivity. *ChemCatChem* **2**(9): 1030-1058.
- Zhang, Y., Wei, D., et al.** (1999). Effect of water vapor on the reduction of Ru-promoted Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Journal of Catalysis* **188**(2): 281-290.
- Zhang, Y., Xiong, H., et al.** (2005). Effect of magnesia on alumina-supported cobalt Fischer-Tropsch synthesis catalysts. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* **237**(1-2): 172-181.

# Preferential solvation of some sulfonamides in 1,4-dioxane + water co-solvent mixtures at 298.15 K according to the inverse Kirkwood-Buff integrals method

Daniel Ricardo Delgado<sup>1</sup>, María Ángeles Peña<sup>2</sup>, Fleming Martínez<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigaciones Farmacéutico Físicoquímicas, Departamento de Farmacia, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias Biomédicas, Facultad de Farmacia, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, Madrid, España

## Abstract

The preferential solvation parameters, that is, the difference between the local and bulk mole fractions of the solvents in solutions of some structurally related sulfonamides in 1,4-dioxane + water binary mixtures are derived from their thermodynamic properties by means of the inverse Kirkwood-Buff integrals method. From solvent effect studies, it was found that all the sulfonamides considered were very sensitive to solvation effects, so the preferential solvation parameter,  $\delta x_{D,S}$ , was negative in water-rich and 1,4-dioxane-rich mixtures but positive in intermediate co-solvent compositions. It may be possible that in water-rich mixtures the hydrophobic hydration around the non-polar groups plays a relevant role in the solvation. The greater solvation by 1,4-dioxane in mixtures of similar co-solvent compositions could be due mainly to polarity effects. Finally, the preference of these drugs for water in 1,4-dioxane-rich mixtures could be explained in terms of the acidic behavior of water interacting with the hydrogen-acceptor groups in the sulfonamides.

**Key words:** Sulfonamides, solubility, inverse Kirkwood-Buff integrals, preferential solvation.

## Solvatación preferencial de algunas sulfonamidas en mezclas cosolventes 1,4-dioxano + agua a 298,15 K según el método de las integrales inversas de Kirkwood-Buff

## Resumen

A partir de algunas propiedades termodinámicas clásicas, en este trabajo se calcularon en mezclas binarias 1,4-dioxano + agua, y mediante el método de las integrales inversas de Kirkwood-Buff, los parámetros de solvatación preferencial, esto es, las diferencias entre las fracciones molares locales alrededor de los solutos y en el grueso de la solución, de algunas sulfonamidas estructuralmente relacionadas. Con base en los valores obtenidos, se infirió que las sulfonamidas estudiadas fueron altamente sensibles a los efectos de la solvatación según la composición de las mezclas. Así, el parámetro de solvatación preferencial por 1,4-dioxano,  $\delta x_{D,S}$ , fue negativo en mezclas ricas en agua y en mezclas ricas en 1,4-dioxano, pero positivo en mezclas de composición intermedia. Se podría plantear que en mezclas ricas en agua la hidratación hidrofóbica alrededor de los grupos no polares de las sulfonamidas juega un papel relevante en la solvatación. La mayor solvatación de las sulfonamidas por el 1,4-dioxano en mezclas de composición cosolvente intermedia podría deberse principalmente a efectos de polaridad. Finalmente, la preferencia de estos fármacos por el agua en mezclas ricas en 1,4-dioxano podría explicarse en términos del comportamiento ácido del agua que estaría interactuando con grupos aceptores de protones en las sulfonamidas.

**Palabras clave:** sulfonamidas, solubilidad, integrales inversas de Kirkwood-Buff, solvatación preferencial.

## Introduction

Solubility of drugs in co-solvent mixtures is a very important topic for pharmaceutical scientists involved in several development stages such as drug purification and design of liquid medicines (Jouyban, A. 2010). Although co-solvency has been employed in pharmacy for several decades, it is recently that the mechanisms

involved to increase or decrease drugs solubility have been approached from a physicochemical point of view (Rubino, J.T. 1988).

### \* Corresponding author:

Fleming Martínez, fmartinezr@unal.edu.co.

Recibido: 2 de agosto de 2013

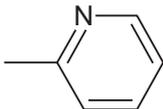
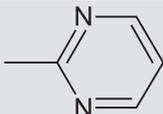
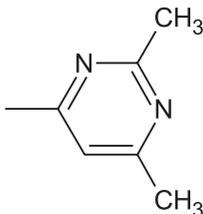
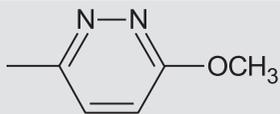
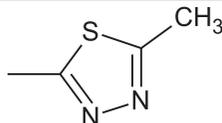
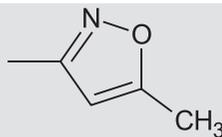
Aceptado: 16 de abril de 2014

Sulfonamides are drugs extensively used for the treatment of certain infections caused by gram-positive and gram-negative microorganisms, some fungi, and certain protozoa. Although the advent of the antibiotics has diminished the usefulness of sulfonamides, these drugs still occupy an important place in the therapeutic resources of physicians and veterinarians (Korolkovas, A. 1988; Gelone, S. & O'Donnell, J.A. 2005).

Several thermodynamic works have been published based on the enthalpic and entropic contributions to the Gibbs energy of solution of sulfonamides (Delgado, D.R., *et al.*, 2011a, 2012, 2013; Delgado, D.R. & Martínez, F. 2013). Nevertheless, the drug preferential solvation, *i.e.* the co-solvent specific composition around the drug molecules, has not been studied

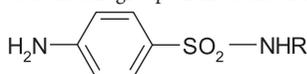
for sulfonamides. Therefore, the main goal of this paper was to evaluate the preferential solvation of some structurally related sulfonamides in 1,4-dioxane + water co-solvent mixtures, based on thermodynamic definitions. Sulfonamides under study were sulfanilamide, sulfapyridine, sulfadiazine, sulfisomidine, sulfamethoxypyridazine, sulfamethizole, and sulfamethoxazole (Table 1). Thus, this work is similar to the ones presented previously in the literature for some analgesic drugs in co-solvent mixtures (Ruidiaz, M.A., *et al.*, 2010; Delgado, D.R., *et al.*, 2011b; Holguín, A.R., *et al.*, 2011). The availability of these data is very important for understanding the intermolecular interactions involved in the solubility of therapeutically useful solutes in co-solvent mixtures. As has been indicated earlier, this knowledge is relevant in almost all the areas of the pharmaceutical sciences.

**Table 1.** Molecular structure and CAS number of the sulfonamides

Sulfonamide	Abbreviation	CAS RN <sup>a</sup>	R substituent <sup>b</sup>
Sulfanilamide	SA	63-74-1	-H
Sulfapyridine	SP	144-83-2	
Sulfadiazine	SD	68-35-9	
Sulfisomidine	SSM	515-64-0	
Sulfamethoxypyridazine	SMP	80-35-3	
Sulfamethizole	SMZ	144-82-1	
Sulfamethoxazole	SMX	723-46-6	

<sup>a</sup> Chemical Abstracts Service Registry Number

<sup>b</sup> Substituent group on the basic structure of sulfanilamide:



The inverse Kirkwood-Buff integral (IKBI) is a powerful tool for evaluating the preferential solvation of nonelectrolytes in solvent mixtures, describing the local compositions around a solute with respect to the different components present in the solvent mixture (**Ben-Naim, A.** 1988, 1990; **Marcus, Y.** 1990).

In the present case, this treatment depends on the values of the standard molar Gibbs energies of transfer of the sulfonamides from neat water to the 1,4-dioxane + water solvent mixtures and the excess molar Gibbs energy of mixing for the co-solvent binary mixtures. As mentioned before, this treatment is very important in pharmaceutical sciences to understand the molecular interactions solute-solvent because most of the solubility studies developed have been directed towards correlating or modeling the solubilities and possibly predicting them from the solubilities in the neat solvents, but not to analyzing the local environment around the drug molecules describing the local fraction of the solvent components (D or W) in the surrounding of the solute (S) (Marcus, Y. 2002, 2008).

In this paper the IKBI approach was applied to evaluate the preferential solvation of some structurally related sulfonamides in the binary mixtures conformed by 1,4-dioxane (D) and water (W). The results are expressed in terms of the preferential solvation parameter  $\delta x_{D,S}$  of the solute by the co-solvent 1,4-dioxane.

### Theoretical background

The Kirkwood-Buff integrals,  $G_{i,S}$  (KBI) are given by the expression,

$$G_{i,S} = \int_{r_{\text{cor}}}^0 (g_{i,S} - 1) 4\pi r^2 dr, \quad (1)$$

where  $g_{i,S}$  is the pair correlation function for the molecules of the solvent  $i$  in the 1,4-dioxane + water mixtures around the sulfonamides,  $r$ , the distance between the centers of the molecules of sulfonamide and 1,4-dioxane or water, and  $r_{\text{cor}}$  is a correlation distance for which  $g_{i,S}(r > r_{\text{cor}}) \approx 1$ . Thus, for all distances  $r > r_{\text{cor}}$  up to infinite, the value of the integral is essentially zero. Therefore, the results are expressed in terms of the preferential solvation parameter  $\delta x_{i,S}$  for the solute in solution by the component solvents 1,4-dioxane and water (**Newman, K.E.** 1994). For 1,4-dioxane (D) this parameter is defined as

$$\delta x_{D,S} = x_{D,S}^L - x_D = -\delta x_{W,S}, \quad (2)$$

where  $x_D$  is the mole fraction of 1,4-dioxane in the bulk co-solvent mixture and  $x_{D,S}^L$  is the local mole fraction of 1,4-dioxane in the environment near to the drug. If  $\delta x_{D,S} > 0$ , then the sulfonamide is preferentially solvated by

1,4-dioxane; on the contrary, if it is  $< 0$ , the drug is preferentially solvated by water within the correlation volume,  $V_{\text{cor}} = (4\pi/3) r_{\text{cor}}^3$ , and the bulk mole fraction of 1,4-dioxane,  $x_D$ . Values of  $\delta x_{D,S}$  are obtainable from those of  $G_{D,S}$ , and these, in turn, from thermodynamic data of the co-solvent mixtures with the solute dissolved on them, as shown below (**Marcus, Y.** 2002).

Algebraic manipulation of the basic expressions presented by **Newman, K.E.** (1994) leads to expressions for the Kirkwood-Buff integrals (in  $\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$ ) for the individual solvent components in terms of some thermodynamic quantities as shown in equations (3) and (4) (**Ben-Naim, A.** 1988; **Marcus, Y.** 2002, 2008):

$$G_{D,S} = RT\kappa_T - V_S + x_W V_W D / Q, \quad (3)$$

$$G_{W,S} = RT\kappa_T - V_S + x_D V_D D / Q, \quad (4)$$

where  $\kappa_T$  is the isothermal compressibility of the 1,4-dioxane + water co-solvent mixtures free of drug (in  $\text{GPa}^{-1}$ ),  $V_D$  and  $V_W$  are the partial molar volumes of the solvents in the mixtures (in  $\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$ ); similarly,  $V_S$  is the partial molar volume of solute in these mixtures (in  $\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$ ). Function  $D$  is the derivative of the standard molar Gibbs energies of transfer of the drug (from neat water to 1,4-dioxane + water mixtures) with respect to the solvent composition (in  $\text{kJ mol}^{-1}$ , as  $RT$  also is), and function  $Q$  involves the second derivative of the excess molar Gibbs energy of mixing of the two solvents ( $G_{D+W}^{\text{Exc}}$ ) with respect to the water proportion in the mixtures (also in  $\text{kJ mol}^{-1}$ ) (**Marcus, Y.** 2002, 2008; **Cortez-Nunez, N.G.** 2010):

$$D = \left( \frac{\partial \Delta_{tr} G_{(S,W \rightarrow D+W)}^0}{\partial x_D} \right)_{T,p}, \quad (5)$$

$$Q = RT + x_D x_W \left( \frac{\partial^2 G_{D,W}^{\text{Exc}}}{\partial x_W^2} \right)_{T,p}. \quad (6)$$

Because the dependence of  $\kappa_T$  on composition is not known for a lot of the systems investigated and given the small contribution of  $RT\kappa_T$  to the IKBI calculations, the dependence of  $\kappa_T$  on composition could be approximated by additive contributions as described by equation (7) (**Marcus, Y.** 1998):

$$\kappa_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n x_i \kappa_i^0, \quad (7)$$

where  $x_i$  is the mole fraction of component  $i$  in the mixture and  $\kappa_i^0$  is the isothermal compressibility of the pure component  $i$ .

**Ben-Naim, A.** (1988) showed that the preferential solvation parameter can be calculated from the Kirkwood-Buff integrals as follows:

$$\delta x_{D,S} = \frac{x_D x_W (G_{D,S} - G_{W,S})}{x_D G_{D,S} + x_W G_{W,S} + V_{cor}} \quad (8)$$

The correlation volume,  $V_{cor}$ , is obtained by means of the following expression proposed by **Marcus, Y.** (2008, 2009):

$$V_{cor} = 2522.5 \left( r_D + 0.1363 (x_{D,S}^L V_D + x_{W,S}^L V_W) - 0.085 \right)^3 \quad (9)$$

where  $r_s$  is the radius of the solute (in nm), calculated as:

$$r_s = \left( \frac{3 \cdot 10^{21} V_s}{4\pi N_{Av}} \right)^{1/3} \quad (10)$$

where  $N_{Av}$  is the Avogadro number. However, the definitive correlation volume requires iteration, because it depends

on the local mole fractions. This iteration is achieved by replacing  $\delta x_{D,S}$  in the equation (2) to calculate  $x_{D,S}^L$  until a non-variant value of  $V_{cor}$  is obtained.

### Results and discussion

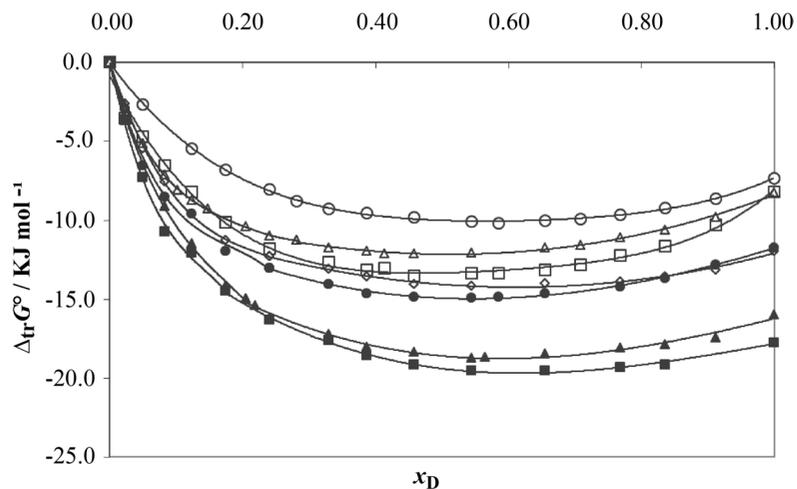
Sulfonamides under study are shown in Table 1. The solubility of these compounds in 1,4-dioxane + water mixtures (Table 2) was taken from the literature (**Martin, A., et al.**, 1985; **Bustamante, P., et al.**, 1993; **Reillo, A., et al.**, 1993, 1995a, 1995b). Standard molar Gibbs energy of transfer of these sulfonamides from neat water to 1,4-dioxane + water mixtures is calculated and correlated to specific polynomials from the drug solubility data by using equation (11). Figure 1 and Table 3 show the Gibbs energy of transfer for all the sulfonamides studied. Polynomial coefficients are shown in Table 4.

$$\Delta_{tr} G_{S,W \rightarrow D+W}^0 = RT \ln \left( \frac{x_{S,W}}{x_{S,D+W}} \right) = a + bx_D + cx_D^{1.5} + dx_D^2 + ex_D^3 \quad (11)$$

**Table 2.** Mole fraction solubility ( $x_s$ ) of the sulfonamides in 1,4-dioxane + water co-solvent mixtures at 298.15 K

$f_D$	$x_D$	SA <sup>a</sup>	SP <sup>b</sup>	SD <sup>c</sup>	SSM <sup>d</sup>	SMP <sup>c</sup>	SMZ <sup>e</sup>	SMX <sup>e</sup>
0.00	0.000	6.45E-4	1.77E-5	4.40E-6	8.95E-5	3.73E-5	3.55E-5	2.32E-5
0.10	0.023	1.83E-3	-	1.45E-5	2.74E-4	1.66E-4	1.46E-4	1.01E-4
0.20	0.050	5.80E-3	5.21E-5	6.08E-5	7.13E-4	-	2.35E-4	4.42E-4
0.30	0.083	1.36E-2	-	1.37E-4	1.58E-3	1.47E-3	4.92E-4	1.75E-3
0.35	0.102	-	-	-	2.35E-3	-	-	-
0.40	0.123	3.11E-2	1.60E-4	2.10E-4	3.03E-3	3.80E-3	9.59E-4	3.04E-3
0.45	0.147	-	-	-	3.79E-3	-	-	-
0.50	0.174	6.05E-2	2.75E-4	5.52E-4	-	1.13E-2	2.12E-3	8.01E-3
0.55	0.205	-	-	-	5.98E-3	1.57E-2	-	-
0.57	0.218	-	-	-	-	1.85E-2	-	-
0.60	0.240	9.18E-2	4.53E-4	8.41E-4	7.48E-3	2.55E-2	4.11E-3	1.66E-2
0.65	0.281	-	6.10E-4	-	8.39E-3	-	-	-
0.70	0.330	0.127	7.46E-4	1.26E-3	1.03E-2	3.86E-2	5.87E-3	2.80E-2
0.75	0.387	0.154	8.28E-4	1.62E-3	1.12E-2	5.39E-2	7.17E-3	4.18E-2
0.77	0.414	-	-	-	1.18E-2	-	6.87E-3	-
0.80	0.457	0.188	9.30E-4	1.76E-3	1.19E-2	6.11E-2	8.19E-3	5.30E-2
0.85	0.544	0.195	1.03E-3	1.81E-3	1.16E-2	7.09E-2	7.70E-3	6.13E-2
0.86	0.564	-	-	-	-	7.00E-2	-	-
0.87	0.585	-	1.07E-3	1.77E-3	-	-	7.73E-3	-
0.90	0.655	0.181	9.98E-4	1.62E-3	1.01E-2	6.42E-2	7.06E-3	6.08E-2
0.92	0.708	-	9.62E-4	-	9.56E-3	-	6.23E-3	-
0.94	0.767	0.175	8.63E-4	1.36E-3	7.93E-3	5.50E-2	4.95E-3	5.56E-2
0.96	0.835	0.155	7.22E-4	1.09E-3	6.43E-3	5.07E-2	3.90E-3	5.21E-2
0.98	0.912	0.130	5.79E-4	7.73E-4	4.71E-3	4.19E-2	2.26E-3	-
1.00	1.000	8.03E-2	3.39E-4	4.97E-4	2.51E-3	2.37E-2	9.64E-4	3.00E-2

<sup>a</sup> Data from **Reillo, A., et al.**, (1993); <sup>b</sup> Data from **Reillo, A., et al.**, (1995a); <sup>c</sup> Data from **Bustamante, P., et al.**, (1993); <sup>d</sup> Data from **Martín, A., et al.**, (1985); <sup>e</sup> Data from **Reillo, A., et al.**, (1995b).



**Figure 1.** Gibbs energy of transfer of the sulfonamides under study from neat water to 1,4-dioxane + water binary co-solvent mixtures at 298.15 K. (◊): SA; (○): SP; (●): SD; (Δ): SSM; (▲): SMP; (◻): SMZ; (■): SMX.

**Table 3.** Gibbs energy of transfer (kJ mol<sup>-1</sup>) of the sulfonamides from neat water to 1,4-dioxane + water co-solvent mixtures at 298.15 K

$f_D$	$x_D$	SA	SP	SD	SSM	SMP	SMZ	SMX
0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	0.023	-2.59	-	-2.95	-2.77	-3.70	-3.51	-3.64
0.20	0.050	-5.45	-2.68	-6.51	-5.14	-	-4.68	-7.31
0.30	0.083	-7.56	-	-8.52	-7.11	-9.11	-6.52	-10.72
0.35	0.102	-	-	-	-8.10	-	-	-
0.40	0.123	-9.61	-5.46	-9.58	-8.73	-11.47	-8.18	-12.08
0.45	0.147	-	-	-	-9.28	-	-	-
0.50	0.174	-11.26	-6.80	-11.98	-	-14.17	-10.14	-14.49
0.55	0.205	-	-	-	-10.42	-14.98	-	-
0.57	0.218	-	-	-	-	-15.39	-	-
0.60	0.240	-12.29	-8.04	-13.02	-10.97	-16.18	-11.78	-16.29
0.65	0.281	-	-8.78	-	-11.26	-	-	-
0.70	0.330	-13.10	-9.28	-14.03	-11.75	-17.21	-12.67	-17.59
0.75	0.387	-13.57	-9.53	-14.64	-11.97	-18.04	-13.16	-18.58
0.77	0.414	-	-	-	-12.10	-	-13.06	-
0.80	0.457	-14.06	-9.82	-14.85	-12.12	-18.35	-13.49	-19.17
0.85	0.544	-14.16	-10.08	-14.92	-12.06	-18.72	-13.34	-19.53
0.86	0.564	-	-	-	-	-18.69	-	-
0.87	0.585	-	-10.18	-14.86	-	-	-13.35	-
0.90	0.655	-13.98	-10.00	-14.65	-11.72	-18.47	-13.12	-19.52
0.92	0.708	-	-9.91	-	-11.58	-	-12.81	-
0.94	0.767	-13.89	-9.64	-14.22	-11.12	-18.09	-12.24	-19.29
0.96	0.835	-13.59	-9.20	-13.65	-10.60	-17.88	-11.65	-19.13
0.98	0.912	-13.15	-8.65	-12.81	-9.83	-17.41	-10.29	-
1.00	1.000	-11.96	-7.32	-11.72	-8.26	-16.00	-8.19	-17.76

**Table 4.** Coefficients of equation (11) ( $\text{kJ mol}^{-1}$ ) applied to the Gibbs energy of transfer of the sulfonamides from neat water to 1,4-dioxane + water co-solvent mixtures at 298.15 K

Coefficient	SA	SP	SD	SSM	SMP	SMZ	SMX
<i>a</i>	0.17	0.10	-0.10	-0.05	-0.03	-0.32	-0.06
<i>b</i>	-193.79	-88.95	-199.58	-178.04	-213.86	-149.20	-240.63
<i>c</i>	439.49	154.39	447.26	414.10	439.25	309.87	529.58
<i>d</i>	-323.23	-89.44	-325.07	-310.59	-293.66	-216.09	-381.26
<i>e</i>	65.36	16.45	65.92	66.34	52.16	47.48	74.71

**Table 5.** *D* values ( $\text{kJ mol}^{-1}$ ) for the sulfonamides in 1,4-dioxane + water co-solvent mixtures at 298.15 K

$x_D$	SA	SP	SD	SSM	SMP	SMZ	SMX
0.00	-193.79	-88.95	-199.58	-178.04	-213.86	-149.20	-240.63
0.10	-48.01	-33.11	-50.47	-41.74	-62.67	-44.01	-63.44
0.20	-20.42	-19.18	-21.67	-16.52	-30.40	-22.07	-28.92
0.30	-9.01	-11.33	-9.37	-6.26	-15.09	-11.45	-14.12
0.40	-4.07	-6.14	-3.69	-1.81	-7.04	-5.32	-7.38
0.50	-1.85	-2.30	-0.83	0.35	-2.50	-1.02	-4.16
0.60	-0.44	0.87	1.19	2.04	0.45	2.80	-2.15
0.70	1.32	3.77	3.52	4.35	2.95	6.95	0.04
0.80	4.17	6.66	6.93	7.96	5.75	11.95	3.29
0.90	8.63	9.73	11.94	13.38	9.37	18.16	8.24
1.00	15.07	13.10	18.92	20.95	14.18	25.86	15.33

Thus, *D* values were calculated from the first derivative of polynomial models (equation 12) solved according to the co-solvent mixtures composition. This procedure was done varying by 0.05 in mole fraction of 1,4-dioxane, but in the following tables the respective values are reported varying only by 0.10. *D* values are reported in Table 5.

$$D = b + 1.5cx_D^{0.5} + 2dx_D + 3ex_D^2 \quad (12)$$

In order to calculate the *Q* values, the excess molar Gibbs energies of mixing  $G_{D,W}^{Exc}$  at 298.15 K are required. In this way,  $G_{D,W}^{Exc}$  values were calculated at 298.15 K by using equation (13) as reported by **Marcus, Y.** (2002):

$$G_{D,W}^{Exc} = x_D x_W (3835 - 973(1 - 2x_D) - 421(1 - 2x_D)^2). \quad (13)$$

It is important to note that a quartic regular polynomial of  $G_{D,W}^{Exc}$  as a function of the mole fraction of water was obtained. *Q* values are shown in Table 6. On the other hand, Table 6 also shows the  $RT \kappa_T$  values calculated by assuming additive behavior of  $\kappa_T$  (equation 7) with the values 0.738 and 0.457  $\text{GPa}^{-1}$  for 1,4-dioxane and water, respectively (**Marcus, Y.** 1998).

The partial molar volumes of 1,4-dioxane and water (Table 6) were calculated by means of equations (14) and (15) from the density ( $\rho$ ) values of 1,4-dioxane + water mixtures

**Table 6.** Physicochemical properties of the 1,4-dioxane + water co-solvent mixtures at 298.15 K

$x_D$	<i>Q</i> / $\text{kJ mol}^{-1}$	$RT \kappa_T / \text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$	$\bar{V}_D^0 / \text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$	$\bar{V}_W^0 / \text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$
0.00	2.479	1.133	81.01	18.06
0.10	2.424	1.202	82.66	17.97
0.20	1.968	1.272	83.90	17.75
0.30	1.351	1.342	84.79	17.46
0.40	0.765	1.411	85.39	17.15
0.50	0.351	1.481	85.74	16.86
0.60	0.204	1.551	85.90	16.67
0.70	0.371	1.620	85.93	16.62
0.80	0.847	1.690	85.88	16.77
0.90	1.583	1.760	85.82	17.17
1.00	2.479	1.829	85.78	17.88

reported by **Ruidíaz, M.A. & Martínez, F.** (2009) at 298.15 K. *V* is the molar volume of the mixtures and it is calculated as  $V = (x_D M_D + x_W M_W) / \rho$ . Here  $M_D$  and  $M_W$  are 88.11 and 18.02  $\text{g mol}^{-1}$ , respectively:

$$\bar{V}_D = V + x_W \frac{dV}{dx_D}, \quad (14)$$

$$\bar{V}_w = V + x_D \frac{dV}{dx_D} \quad (15)$$

Partial molar volumes of non-electrolyte drugs are not frequently reported in the literature, which is explained by the big uncertainty surrounding its determination due to the low solubilities exhibited, particularly in aqueous media. For this reason, in a first approach, the molar volume of these sulfonamides was considered here as independent of co-solvent composition, and calculated according to the groups contribution method proposed by **Fedors, R.F.** (1974) and exemplified by **Barton, A.F.M.** (1991). Table 7 shows the number of functional groups present in all the sulfonamides, as well as the respective individual contribution to internal energy ( $U / \text{kJ mol}^{-1}$ ) and molar volume ( $V / \text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$ ). Table 8 shows the  $U$  and  $V$  values for every sulfonamide calculated as additive properties.

From volume values, the radiuses of the drug molecules (required for equation 9) were calculated by using equation (10), values which are also shown in Table 8.

Tables 9 and 10 show that the  $G_{D,S}$  values were negative in all cases, whereas  $G_{w,S}$  was negative in water-rich mixtures but positive in 1,4-dioxane-rich mixtures.

In order to use the IKBI method, the correlation volumes were iterated three times by using the equations (2), (8) and (9) to obtain the values reported in Table 11.

The values of  $\delta x_{D,S}$  varied non-linearly with the 1,4-dioxane concentration in the aqueous mixtures at 298.15 K (Fig 2). The addition of 1,4-dioxane to water tends to make negative the  $\delta x_{D,S}$  values of all these sulfonamides from the pure water up to the mixture 0.18 in mole fraction of 1,4-dioxane reaching minimum values in  $x_D = 0.05$ . Possibly the structuring of water molecules around the non-polar groups

**Table 7.** Contribution to internal energy and molar volume by every functional group and number of groups present in the sulfonamides according to the Fedors method (**Fedors, R.F.** 1974; **Barton, A.F.M.** 1991)

Group	$U / \text{kJ mol}^{-1}$	$V / \text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$	SA	SP	SD	SSM	SMP	SMZ	SMX
–O–	3.4	3.8	–	–	–	–	1	–	1
–NH <sub>2</sub>	12.6	19.2	2	1	1	1	1	1	1
–NH–	8.4	4.5	–	1	1	1	1	1	1
=N–	11.7	5.0	–	1	2	2	2	2	1
–S–	14.2	12.0	–	–	–	–	–	1	–
–SO <sub>2</sub> –	25.6	19.5	1	1	1	1	1	1	1
>C=	4.3	–5.5	–	1	1	3	2	2	2
–CH=	4.3	13.5	–	4	3	1	2	–	1
–CH <sub>3</sub>	4.7	33.5	–	–	–	2	1	1	1
Phenylene	31.9	52.4	1	1	1	1	1	1	1
Ring closure	1.1	16.0	–	1	1	1	1	1	1
Conj. bond	1.7	–2.2	–	3	3	3	3	2	2

**Table 8.** Some physicochemical properties of the sulfonamides

Property	SA	SP	SD	SSM	SMP	SMZ	SMX
$V_s^a / \text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$	110.3	158.5	150.0	179.0	168.3	151.7	152.0
$U^a / \text{kJ mol}^{-1}$	82.7	117.8	125.2	134.6	133.2	133.8	115.6
$\delta_s^b / \text{MPa}^{1/2}$	27.4	27.3	28.9	27.4	28.1	29.7	27.6
$r_s^c / \text{nm}$	0.352	0.398	0.390	0.414	0.406	0.392	0.392
Acidic sites <sup>d</sup>	4	3	3	3	3	3	3
Basic sites <sup>e</sup>	5	6	7	7	9	9	8

<sup>a</sup>  $V_s$  and  $U$  correspond to total molar volume and internal energy calculated according to **Fedors, R.F.** (1974) and **Barton, A.F.M.** (1991).

<sup>b</sup>  $\delta_s$  is the Hildebrand solubility parameter calculated as  $(1000U / V_s)^{1/2}$ .

<sup>c</sup>  $r_s$  is the molecular radius calculated with equation (10).

<sup>d</sup> Acidic sites were assigned as: two for H<sub>2</sub>N– and one for –NH–.

<sup>e</sup> Basic sites were assigned as: one for H<sub>2</sub>N–, four for –SO<sub>2</sub>–, one for =N–, two for –O–, and two for –S–.

**Table 9.**  $G_{D,S}$  values ( $\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$ ) for the sulfonamides in 1,4-dioxane + water co-solvent mixtures at 298.15 K

$x_D$	SA	SP	SD	SSM	SMP	SMZ	SMX
0.00	-1521	-805	-1603	-1475	-1725	-1237	-1904
0.10	-429	-378	-486	-456	-585	-444	-574
0.20	-256	-296	-305	-297	-386	-310	-359
0.30	-190	-260	-233	-234	-303	-254	-278
0.40	-164	-240	-198	-202	-262	-222	-250
0.50	-153	-212	-168	-169	-227	-175	-250
0.60	-123	-129	-110	-111	-152	-59	-220
0.70	-91	-106	-101	-119	-127	-57	-150
0.80	-92	-130	-121	-146	-144	-103	-137
0.90	-99	-146	-135	-163	-156	-130	-141
1.00	-108	-157	-148	-177	-166	-150	-150

**Table 10.**  $G_{W,S}$  values ( $\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$ ) for the sulfonamides in 1,4-dioxane + water co-solvent mixtures at 298.15 K

$x_D$	SA	SP	SD	SSM	SMP	SMZ	SMX
0.00	-109	-157	-149	-178	-167	-151	-151
0.10	-273	-270	-321	-320	-381	-301	-367
0.20	-283	-321	-333	-319	-426	-339	-397
0.30	-278	-370	-325	-295	-451	-366	-416
0.40	-291	-431	-314	-259	-481	-388	-480
0.50	-335	-438	-249	-135	-472	-274	-659
0.60	-219	63	152	339	-54	557	-692
0.70	106	455	424	528	312	978	-144
0.80	229	383	414	468	300	819	117
0.90	312	318	434	475	290	736	252
1.00	413	297	507	548	324	745	380

**Table 11.** Correlation volume ( $\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$ ) of the sulfonamides in 1,4-dioxane + water co-solvent mixtures at 298.15 K

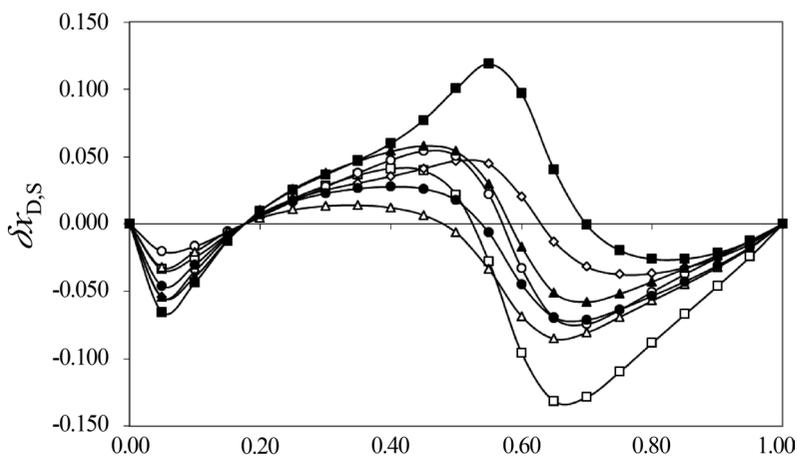
$x_D$	SA	SP	SD	SSM	SMP	SMZ	SMX
0.00	615	759	735	816	787	740	741
0.10	694	874	829	931	873	842	817
0.20	856	1032	1003	1101	1071	1010	1014
0.30	985	1182	1144	1241	1232	1157	1168
0.40	1102	1325	1267	1364	1372	1289	1312
0.50	1216	1443	1369	1463	1490	1381	1470
0.60	1290	1463	1411	1509	1524	1362	1576
0.70	1338	1528	1493	1612	1591	1437	1578
0.80	1431	1664	1620	1753	1719	1591	1658
0.90	1537	1797	1747	1890	1847	1740	1767
1.00	1652	1924	1879	2030	1975	1888	1889

of these drugs (aromatic rings and/or methyl groups), *i.e.* hydrophobic hydration, contributed to lowering the net  $\delta x_{D,S}$  to negative values in these water-rich mixtures (Table 12).

Sulfonamides act in solution as a Lewis acid due to the hydrogen atoms in its  $-\text{NH}_2$  and  $-\text{NH}-$  groups (Table 1) in order to establish hydrogen bonds with proton-acceptor functional groups in the solvents (oxygen atoms in  $-\text{OH}$  and  $-\text{O}-$  groups). In addition, these drugs could act as a Lewis base due to free electron pairs in either, i) oxygen atoms of  $-\text{SO}_2-$  and  $-\text{O}-$  groups, ii) nitrogen atoms of  $-\text{NH}_2$ , and  $=\text{N}-$  groups, or iii) sulfur atom of  $-\text{S}-$  groups, to interact with hydrogen atoms in water. Table 8 shows the respective numbers of acidic and basic sites in the sulfonamides considered.

In the mixtures with composition varying from  $0.18 < x_D < 0.47$  for sulfisomidine and  $0.18 < x_D < 0.70$  for sulfamethoxazole, the local mole fractions of 1,4-dioxane were greater than those for water. In this way, the co-solvent action may be related to the breaking of the ordered structure of water (hydrogen bonds) around the non-polar moieties of the drugs, which increases the solvation of these sulfonamides having maximum values in different co-solvent compositions according to each sulfonamide. Ultimately, from these 1,4-dioxane proportions up to neat 1,4-dioxane, the local mole fractions of co-solvent decreased, being the  $\delta x_{D,S}$  values negative, as they are in water-rich mixtures.

According to the preferential solvation results, it is possible that in intermediate composition mixtures, the sulfonamides could have acted as a Lewis acid with 1,4-dioxane molecules to some extent because this co-solvent has a basicity near to the one for water, *i.e.*, the Kamlet-Taft hydrogen bond acceptor parameters are  $\beta = 0.37$  for 1,4-dioxane and 0.47 for water (Kamlet, M.J. & Taft, R.W. 1976). Otherwise, non-specific interactions such as London forces could have



**Figure 2.**  $\delta x_{D,S}$  values for the sulfonamides under study in 1,4-dioxane + water co-solvent mixtures at 298.15 K. ( $\diamond$ ): SA; ( $\circ$ ): SP; ( $\bullet$ ): SD; ( $\Delta$ ): SSM; ( $\blacktriangle$ ): SMP; ( $\square$ ): SMZ; ( $\blacksquare$ ): SMX.

**Table 12.**  $\delta x_{D,S}$  values for the sulfonamides in 1,4-dioxane + water co-solvent mixtures at 298.15 K

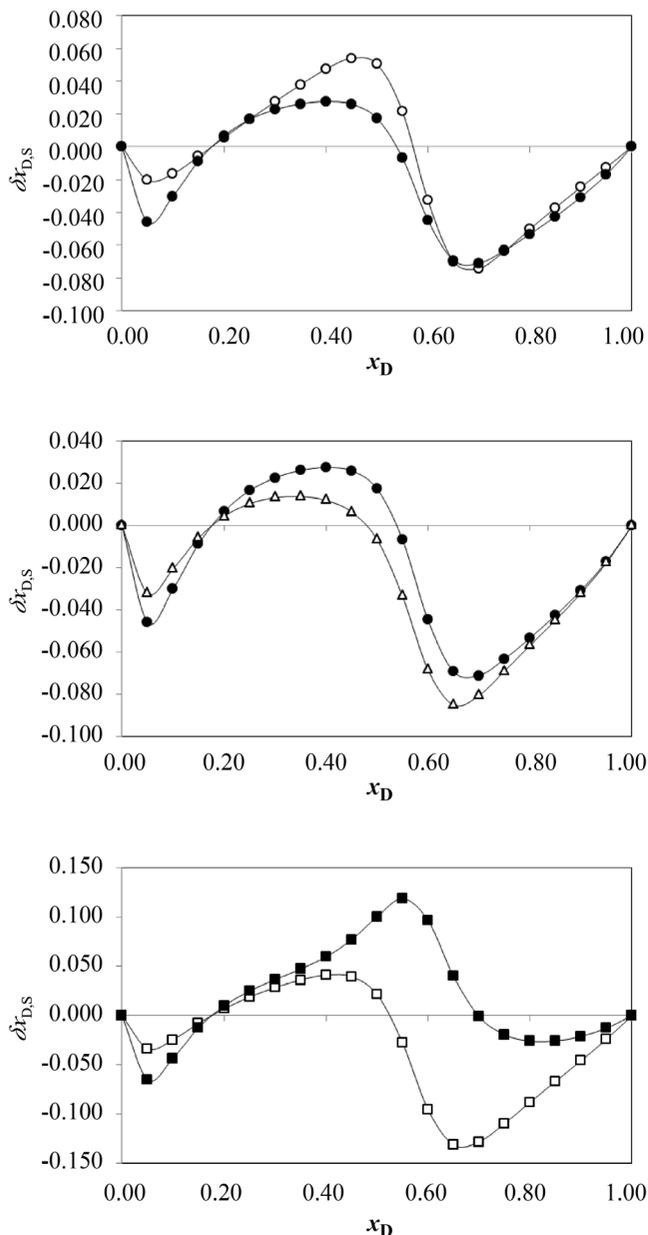
$x_D$	SA	SP	SD	SSM	SMP	SMZ	SMX
0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.10	-0.0348	-0.0164	-0.0301	-0.0205	-0.0390	-0.0245	-0.0434
0.20	0.0074	0.0056	0.0067	0.0044	0.0098	0.0068	0.0097
0.30	0.0252	0.0275	0.0227	0.0133	0.0376	0.0285	0.0366
0.40	0.0353	0.0474	0.0277	0.0120	0.0538	0.0411	0.0598
0.50	0.0468	0.0505	0.0175	-0.0065	0.0538	0.0216	0.1004
0.60	0.0204	-0.0326	-0.0447	-0.0683	-0.0167	-0.0954	0.0970
0.70	-0.0316	-0.0741	-0.0711	-0.0806	-0.0578	-0.1285	-0.0009
0.80	-0.0367	-0.0503	-0.0533	-0.0568	-0.0427	-0.0882	-0.0258
0.90	-0.0250	-0.0246	-0.0307	-0.0321	-0.0232	-0.0460	-0.0212
1.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

been also involved here. On the other hand, in 1,4-dioxane-rich mixtures, where the drugs are preferentially solvated by water, they could have acted mainly as a Lewis base in the presence of water because the Kamlet-Taft hydrogen bond donor parameters are  $\alpha = 1.17$  for water and 0.00 for 1,4-dioxane, respectively (Taft, R.W. & Kamlet, M.J. 1976). In this way, the specific and nonspecific interactions between sulfonamides and this co-solvent decreased in these final mixtures (Ruidiaz, M.A., et al., 2010; Ruckenstein, E. & Shulgin, I. 2001).

Finally, it is interesting to make some comparisons according to the molecular similarities among the sulfonamides. Figure 3 shows the comparison between: i) sulfapyridine and sulfadiazine (difference in one nitrogen atom in the heterocyclic moiety), ii) sulfadiazine and sulfisomidine (difference in two methyl groups and in the position of the two nitrogen atoms in the heterocyclic moiety), and iii) sulfamethizole and sulfamethoxazole (difference in one nitrogen atom and the change of a sulfur atom by oxygen atom in the heterocyclic moiety).

In the first case (SP vs. SD), sulfadiazine exhibited more affinity for water than sulfapyridine, *i.e.*, in water-rich mixtures because  $\delta x_{D,S}$  minimum values are  $-0.046$  and  $-0.020$  for SD and SP, respectively. The 1,4-dioxane preferred region was greater for SP than for SD and the maximum  $\delta x_{D,S}$  values were 0.054 and 0.028 for SP and SD, respectively. Finally, in the 1,4-dioxane-rich region the behaviors were almost similar. If this behavior were to be considered as a criterion of drug polarity, then sulfadiazine would be a more polar compound than sulfapyridine. This is in agreement with other polarity parameters as the Hildebrand solubility parameter  $\delta_s$  values reported in Table 8 (27.7 vs. 28.9 MPa<sup>1/2</sup> for SP and SD, respectively), and the reported molar octanol-water partition coefficients (0.995 and 0.826 at 298.15 K for SP and SD, respectively) (Martínez, F. & Gómez, A. 2002).

In the second case (SD vs. SSM), sulfadiazine exhibited more affinity for water than sulfisomidine only in water-rich mixtures because  $\delta x_{D,S}$  minimum values were  $-0.046$  and  $-0.020$  for SD and SSM, respectively. Otherwise, the 1,4-dioxane-preferred region was greater for SD than for



**Figure 3.** Comparison of preferential solvation between similar sulfonamides in 1,4-dioxane + water co-solvent mixtures at 298.15 K. Top graph: (○): SP vs. (●): SD; Middle graph: (●): SD vs. (Δ): SSM; Bottom graph: (□): SMZ vs. (■): SMX.

SSM and the maximum  $\delta x_{D,S}$  values were 0.028 and 0.014 for SD and SSM, respectively. Finally, in the 1,4-dioxane-rich region sulfisomidine was preferentially solvated by water more than sulfadiazine because the  $\delta x_{D,S}$  minimum values were  $-0.071$  and  $-0.085$  for SD and SSM, respectively. In this case, there was no agreement with solubility parameters because the  $\delta_s$  value for SSM was  $27.4 \text{ MPa}^{1/2}$ , which was lower than the one for SD (Table 8).

Finally, in the third case (SMZ vs. SMX), in water-rich mixtures, sulfamethizole was preferentially solvated by water less than sulfamethoxazole ( $\delta x_{D,S}$  values were  $-0.034$  and  $-0.065$ , for SMZ and SMX, respectively). Otherwise, the 1,4-dioxane-preferred region was far greater for SMX than for SMZ and the maximum  $\delta x_{D,S}$  values were 0.119 and 0.041 for SMX and SMZ, respectively. Finally, in the 1,4-dioxane-rich region, sulfamethizole was preferentially solvated by water much more than sulfamethoxazole because the  $\delta x_{D,S}$  minimum values were  $-0.131$  and  $-0.026$  for SMZ and SMX, respectively. In this case, there was good agreement with solubility parameters because the respective  $\delta_s$  values for SMZ and SMX were  $29.7$  and  $27.6 \text{ MPa}^{1/2}$  (Table 8). It is important to note that sulfamethoxazole exhibits a molar octanol-water partition coefficient of 8.222 compared to 1.101 (both at 298.15 K) exhibited by sulfathiazole, a sulfonamide structurally related to sulfamethizole (Martínez, F. & Gómez, A. 2002).

**Conclusions**

Explicit expressions for local mole fractions of 1,4-dioxane and water around the selected sulfonamides were derived on the basis of the IKBI method applied to equilibrium solubility values of these drugs in 1,4-dioxane + water mixtures. Thus, all these drugs were preferentially solvated by water in water-rich and 1,4-dioxane-rich mixtures, but preferentially solvated by 1,4-dioxane in mixtures with intermediate composition at 298.15 K. Nevertheless, the molecular reasons for these results are not clear given the complexity of these compounds with several acidic and basic sites, and, therefore, it is not easy to propose the respective molecular interactions involved.

**Disclosure**

Authors report no conflicts of interest in this work.

**References**

Barton, A.F.M. 1991. Handbook of Solubility Parameters and Other Cohesion Parameters, 2nd ed., CRC Press, New York.

Ben-Naim, A. 1988. Theory of preferential solvation of nonelectrolytes. Cell Biophysics 12: 255-269.

Ben-Naim, A. 1990. Preferential solvation in two- and in three-component systems. Pure Appl. Chem. 62: 25-34.

Bustamante, P., Escalera, B., Martín, A., Selles, E. 1993. A modification of the extended Hildebrand approach to predict the solubility of structurally related drugs in solvent mixtures. J. Pharm. Pharmacol. 45: 253-257.

Cortez-Nunez, N.G. 2010. Caracterização das Interações Soluto (Ou Substrato)-Solvente-Solvente em Misturas Ternárias, Ph.D. thesis, Departamento de Química e Bioquímica, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Delgado, D.R., Romdhani, A., Martínez, F. 2011a. Thermodynamics of sulfanilamide solubility in propylene glycol + water mixtures. Lat. Am. J. Pharm. 30: 2024-2030.

- Delgado, D.R., Holguín, A.R., Almanza, O.A., Martínez, F., Marcus, Y.** 2011b. Solubility and preferential solvation of meloxicam in ethanol + water mixtures. *Fluid Phase Equilib.* 305: 88-95.
- Delgado, D.R., Romdhani, A., Martínez, F.** 2012. Solubility of sulfamethizole in some propylene glycol + water mixtures at several temperatures. *Fluid Phase Equilib.* 322-323: 113-119.
- Delgado, D.R., Rodríguez, G.A., Martínez, F.** 2013. Thermodynamic study of the solubility of sulfapyridine in some ethanol + water mixtures. *J. Mol. Liq.* 177: 156-161.
- Delgado, D.R., Rodríguez, G.A., Holguín, A.R., Martínez, F., Jouyban, A.** 2013. Solubility of sulfapyridine in propylene glycol + water mixtures and correlation with the Jouyban-Acree model. *Fluid Phase Equilib.* 341:86-95.
- Delgado, D.R., Martínez, F.** 2013. Solution thermodynamics of sulfadiazine in ethanol + water mixtures. *J. Mol. Liq.* 187: 99-105.
- Fedors, R.F.** 1974. A method for estimating both the solubility parameters and molar volumes of liquids. *Polym. Eng. Sci.* 14: 147-154.
- Gelone, S., O'Donnell, J.A.** 2005. Anti-infectives, in: Remington: The Science and Practice of Pharmacy, 21st ed., Edited by A. Gennaro, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, pp. 1630-163.
- Holguín, A.R., Delgado, D.R., Martínez, F., Marcus, Y.** 2011. Solution thermodynamics and preferential solvation of meloxicam in propylene glycol + water mixtures. *J. Solution Chem.* 40: 1987-1999.
- Jouyban, A.** 2010. Handbook of Solubility Data for Pharmaceuticals, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Kamlet, M.J., Taft, R.W.** 1976. The solvatochromic comparison method. I. The beta-scale of solvent hydrogen-bond acceptor (HBA) basicities. *J. Am. Chem. Soc.* 98: 377-383.
- Korolkovas, A.** 1988. Essentials of Medicinal Chemistry, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Marcus, Y.** 1998. The Properties of Solvents, John Wiley & Sons, Chichester.
- Marcus, Y.** 1990. Solubility and solvation in mixed solvent systems. *Pure Appl. Chem.* 62: 2069-2076.
- Marcus, Y.** 2002. Solvent Mixtures: Properties and Selective Solvation, Marcel Dekker, Inc., New York.
- Marcus, Y.** 2008. On the preferential solvation of drugs and PAHs in binary solvent mixtures. *J. Mol. Liq.* 140: 61-67.
- Marcus, Y.** 2009. Preferential solvation of ibuprofen and naproxen in aqueous 1,2-propanediol. *Acta Chim. Slov.* 56: 40-44.
- Martín, A., Wu, P.L., Velásquez, T.** 1985. Extended Hildebrand solubility approach. Sulfonamides in binary and ternary solvents. *J. Pharm. Sci.* 74: 277-282.
- Martínez, F., Gómez, A.** 2002. Thermodynamics of partitioning of some sulfonamides in 1-octanol/buffer and liposome systems. *J. Phys. Org. Chem.* 15: 874-880.
- Newman, K.E.** 1994. Kirkwood-Buff solution theory: Derivation and applications. *Chem. Soc. Rev.* 23: 31-40.
- Reillo, A., Escalera, B., Selles, E.** 1993. Prediction of sulfanilamide solubility in dioxane-water mixtures. *Die Pharmazie* 48: 904-907.
- Reillo, A., Bustamante, P., Escalera, B., Jiménez, M.M., Selles, E.** 1995a. Solubility parameter-based methods for predicting the solubility of sulfapyridine in solvent mixtures. *Drug Dev. Ind. Pharm.* 21: 2073-2084.
- Reillo, A., Córdoba, M., Escalera, B., Selles, E., Córdoba, Jr., M.** 1995b. Prediction of sulfamethiazole solubility in dioxane-water mixtures. *Die Pharmazie* 50: 472-475.
- Rubino, J.T.** 1988. Cosolvents and cosolvency, in: Encyclopedia of Pharmaceutical Technology, vol 3, edited by J. Swarbrick, J.C. Boylan, Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 375-398.
- Ruckenstein, E., Shulgin, I.** 2001. Effect of a third component on the interactions in a binary mixture determined from the fluctuation theory of solutions. *Fluid Phase Equilib.* 180: 281-297.
- Ruidíaz, M.A., Martínez, F.** 2009. Volumetric properties of the pharmaceutical model cosolvent system 1,4-dioxane + water at several temperatures. *Vitae, Rev. Fac. Quím. Farm.* 16: 327-337.
- Ruidíaz, M.A., Delgado, D.R., Martínez, F., Marcus, Y.** 2010. Solubility and preferential solvation of indomethacin in 1,4-dioxane + water solvent mixtures. *Fluid Phase Equilib.* 299: 259-265.
- Taft, R.W., Kamlet, M.J.,** 1976. The solvatochromic comparison method. II. The alpha-scale of solvent hydrogen-bond donor (HBD) acidities. *J. Am. Chem. Soc.* 98: 2886-2894.

## Enfoque y alcance

---

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN) 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 físicas (física, fisico-química, materiales y matemáticas); ciencias naturales (biología, botánica, zoología, ecología, bioquímica, química); ciencias de la tierra (geología, medio ambiente); ciencias humanas (filosofía, psicología, antropología, sociología); ciencias biomédicas y ciencias químicas, 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, Online Computer Library Center – OCLC, Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record, RLG. Nacionalmente se encuentra reseñada en la base de datos Publindex de Colciencias.

La página web de la Revista ([www.raccefyn.co](http://www.raccefyn.co)) permite el acceso libre y abierto a los artículos con el fin de contribuir a la visibilidad, al acceso y a la difusión de la producción científica.

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 37 volúmenes.

## Criterios para publicar

---

### Indicaciones a los autores

Los autores deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Los trabajos presentados deberán ser originales en inglés o español y de alto nivel sobre aspectos relacionadas con las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos los trabajos aceptados quedan como propiedad permanente de la Academia Colombiana Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de manera que la misma podrá publicarlos en formato físico y electrónico, incluyendo internet (Ver transferencia de derechos de autor).
2. El autor de la correspondencia debe aceptar mediante comunicación escrita firmada que el manuscrito es un trabajo original y no ha sido publicado por ningún medio, ni está siendo evaluado por otra publicación impresa o

electrónica y que ha sido aceptado por todos los autores para su publicación en la Revista y que los derechos de autor no han sido cedidos a nadie con anterioridad (Ver formato declaración originalidad, conflicto de intereses y sesión de derechos de autor en la página web de la Revista: <http://www.raccefyn.co>).

3. La participación de los autores en el trabajo debe ser suficiente como para aceptar públicamente la responsabilidad de los aportes de cada uno. El orden de los autores en la publicación deberá ser una decisión compartida de los coautores, que deben ser capaces de explicar el orden en el que aparecen sus nombres.
4. De acuerdo con el ICMJE, todos los colaboradores que no cumplen los criterios de autoría o hayan realizado contribuciones menores deben aparecer en la sección de agradecimientos, pero no ser citados como autores. Las ayudas económicas y materiales deben aparecer en los agradecimientos.
5. La terminología física, química y bioquímica, debe seguir las normas del Comité de Nomenclatura de la Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada (IUPAC). Deben usarse las abreviaturas internacionales convencionales y las unidades del Sistema Internacional (SI). Los nombres científicos se deben escribir con la forma recomendada por “International Code of Botanical Nomenclature”

## Envío y presentación del manuscrito

---

Los artículos deben enviarse a través de <http://www.raccefyn.co>

El manuscrito, incluyendo además de la página del título, el resúmenes, las referencias, las tablas y sus títulos, las leyendas de figuras, deben estar escritos en procesador de palabras Word a doble espacio, usando la fuente Arial de tamaño 12, sin justificar el texto. No olvide usar la numeración en todo el manuscrito.

Los manuscritos deben incluir la siguiente información:

1. Una página en Word con los nombres y apellidos (nombre completo y apellido, 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.
2. Título completo del manuscrito en español e inglés.
3. Título corto

4. Resumen en español y en inglés que no supere 250 palabras.
5. Palabras clave en español y en inglés que no superen en número a seis.
6. Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico y dirección electrónica.
7. Direcciones electrónicas de todos los coautores.
8. Texto, referencias y tablas en un mismo archivo junto con las leyendas de las figuras.
9. Figuras en formato jpg o tiff.

### 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 la metodología empleada en el estudio.

**Análisis estadístico:** señalar los métodos estadísticos utilizados y cómo se han analizado los datos.

**Resultados:** deben presentarse en secuencia lógica, con las tablas y 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 la 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:** Resumen de la investigación y su estado actual. Aquí se pueden plantear objetivos futuros a seguir en la línea de investigación.

**Citación:** todas las referencias bibliográficas se insertarán en el texto y deberán llevar siempre el apellido del autor o autores y el año de publicación entre paréntesis. 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 son tres, cuatro o cinco autores se pondrán los apellidos de todos los autores la primera vez que se referencian en el texto, y después

sólo se pondrá el apellido del primer autor seguido de *et al.* Si son seis o más autores sólo se pondrá el apellido del primero añadiendo “*et al.*”, desde la primera vez que se referencian. Si existieran varias referencias de un autor en un mismo año se consignarán con las letras a, b, c, etc., después del año.

### Cita directa o textual

Si la cita textual tiene menos de 40 palabras se presenta entre comillas dentro del texto y al final se incluye entre paréntesis el apellido, año de publicación y la página de donde se extrajo.

Ejemplo:

El objetivo de los estudios explicativos es “responder a las causas de los eventos físicos o sociales” (Hernández, Fernández y Baptista, 1991, p.66).

Si la cita comprende más de 40 palabras se ubica en un bloque independiente del texto, sin comillas y dejando una sangría al lado izquierdo.

Ejemplo:

Las revistas científicas son sistemas contextuales de comunicación, de difusión académico investigativa y fortalecimiento de competencias científicas (escritura, investigación, evaluación, edición), en los cuales la comunidad académica comparte creencias, orientaciones y el compromiso de contribuir, utilizar y hacer avanzar el conocimiento de forma colaborativa y cooperativa. (Mesa & Sánchez, 2010, p.4).

### Parfraseo o resumen

Se debe mencionar al autor y la fecha.

Ejemplo:

Según Sánchez (1991), el cemento es uno de los materiales más populares e indispensables en la construcción actual.

Existen dos tipos de aprendizaje: la recepción pasiva de conocimientos y el redescubrimiento de la realidad (Piaget, 1980).

Si se cita un documento escrito entre tres y cinco autores, deben escribirse los apellidos de todos la primera vez que se citen y después incluir el apellido del primer autor seguido de “*et al.*” (sin cursiva y con punto después del “*al.*”).

Si se cita un documento escrito por seis o más autores, se presenta la primera cita con el apellido del primer autor seguido de “*et al.*”. En la lista de referencias escriba las iniciales y apellidos de los primeros seis autores y para los restantes utilice “*et al.*”

### Lista de referencia

Es el listado alfabético (según el primer apellido de los autores citados en negrilla) de las fuentes consultadas y citadas

durante la redacción de un trabajo. La lista de referencias es obligatoria. Se deben citar de la siguiente manera:

### **Libros**

Autor. Año. Título completo. Edición. Editorial, lugar de publicación, página

Ejemplo:

**Ramírez J. E., S.J.** 1975. Historia de los terremotos en Colombia. Segunda edición. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, 250 pp.

### **Revista seriada**

Autor, A.A., B.B. Año. Título del artículo. Título de la revista publicación seriada, volumen (número entre paréntesis), páginas del artículo.

Ejemplo:

**Ríos, L., Riva, F., Canaquire, L.** 2008. Reporte situacional del tráfico ilegal de fauna silvestre en la Rev. Acad. Colomb. Cienc. 38(147):218-22.

### **Artículo de revista electrónica**

Ejemplo:

**Sarabia A., Cifuentes H., Dimate M.** 2006. Estudio macrosísmico del sismo ocurrido el 12 de julio de 1785. Ingeominas. Bogotá. Fecha de consulta. Disponible en: <http://aplicaciones1.ingeominas.gov.co/sicat/html/Metadato.aspx?CID=239714>

### **Artículo de periódico impreso:**

Ejemplo:

**Duque, J. G.** 7 de junio de 2012. Antioquia reasume competencia para decidir futuro del túnel. El Colombiano, pp. 10.

### **Tesis**

Ejemplo:

**Gómez Capera A.A.** 1998. *Atenuación de la intensidad sísmica para el territorio colombiano*. Tesis de grado en Física, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

### **Congresos y simposios**

Ejemplo:

**Sánchez Upegui, A. A.** Octubre 2010. *Aplicación de la lingüística textual en los criterios de evaluación de artículos académicos e investigativos*. En Simposio Nacional de Pedagogía y Currículo. Red Colombiana de Pedagogía, Medellín

### **Trabajos inéditos o publicaciones informales**

Si el trabajo está disponible en un sitio web institucional o personal agregue el nombre de la institución y URL.

Ejemplo:

**Jaramillo, G.** 2012. El patrimonio arquitectónico. Manuscrito inédito. Departamento de Artes, Universidad Latinoamericana. Disponible en: <http://...>

### **Materiales legales**

En cuanto a las citas en el texto se proporcionan los mismos datos de cualquier referencia, autor, año y en lo posible número de página, si no hay un autor identificado, se anotan las primeras palabras del título y la fecha.

Ejemplo:

Colombia. Ministerio de Educación Nacional. Ley 23 de 1982 sobre derechos de autor.

### **Tablas y figuras**

Las tablas y cuadros se denominan tablas y llevan numeración arábiga de acuerdo con el orden de aparición. El título correspondiente se coloca en la parte superior de la tabla y las notas en la inferior. Los símbolos para unidades deben aparecer en el encabezamiento de las columnas. Si es necesario exponer alguna información, utilice 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 figuras, se enumeran según el orden de aparición y sus leyendas se escriben 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 de lo contrario 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 a 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 apoya económicamente.

### **Proceso de revisión por pares**

Se recibirán solo los artículos que cumplan con todos los requisitos que se mencionan en las indicaciones a los autores. Los artículos serán evaluados en primera instancia por el Editor y el Comité Editorial de la Revista.

Cada manuscrito será enviado a dos especialistas en el tema, que evaluarán y enviarán sus recomendaciones. Este proceso de revisión tendrá una duración de 20 días.

El editor informará a cada uno de los autores el avance de su trabajo en el proceso de evaluación.

Los pares académicos adoptan 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 una tercera evaluación.

En cualquiera de las opciones, el autor será informado y deberá realizar las modificaciones correspondientes en el manuscrito y enviarlo en las cuatro semanas siguientes. Además deberá enviar un documento en el que responda a todas las observaciones hechas por los evaluadores.

Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, el artículo no será considerado para publicación en el siguiente número de la revista. En caso de sobrepasar dicho plazo, se entenderá que los autores retiran el trabajo en su forma actual y, si se remite de nuevo, el Comité Editorial de la Revista podrá considerar que se trata de un nuevo trabajo.

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**

---

Aceptados los artículos estos se enviarán a corrección ortotipográfica. Se usará la herramienta de control de cambios de Word, en la cual quedará registro de cada una de las sugerencias realizadas y los comentarios o dudas para que el autor o autores aprueben y contesten.

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 y el número del volumen en que 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 ortotipográficos, de manejo visual de la información o imprecisiones involuntarias, el (los) autor(es) podrán comunicarse al correo de la Revista para que puedan realizarse en las versiones electrónicas de la Revista.

### **Falsificaciones 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 interés que pueda de alguna manera influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación, éste 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, etc.

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, etc.

### **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 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 y/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 a revisión junto con los manuscritos.

e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN).

## To our readers and authors

### Criteria for publication

---

#### Information for Authors

The authors must adhere to the following requirements:

1. The works submitted must be original, in English or Spanish, and of high quality 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 author submitting the work must confirm via written and signed communication that the manuscript represents original work and that it has not been published in any form, and that it is not under review by any other publisher for publication in hard copy or in electronic format and that publication in the Revista has been agreed by all authors, and the the authors' rights have not been previously granted to a third party. ( See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
3. The participation of the authors in the submitted work must be materially sufficient so as to share in the public responsibility of its contents. The order of appearance of the each of the authors of the publication must reflect a decision shared by all the co-authors, each of whom must be prepared to justify the order in which his name appears.
4. In accordance with the ICMJE ( www.raccefyn.co), all collaborators who do not comply with the criteria for authorship, or who have realized minor contributions must be included in the Acknowledgement Section, and must not be cited as authors. The Acknowledgement Section must also include reference to any financial and economic assistance.
5. The terminology must adhere to the International Code for Botanical Nomenclature. The physical, chemical or biochemical terminology norms of the Nomenclature Committee of International Union for Pure and Applied Chemistry (IUPAC). The abbreviations must follow the international conventions as well as the units must conform to the International System (SI). The scientific names must be written in the format recommended by the "International Code of Botanical Nomenclature".

### Submission and Presentation of manuscript

---

The manuscripts should be submitted using the website of the Academy: <http://www.accefyn.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 Areal font size 12 without justification. Do not forget to number the entire manuscript.

The manuscripts must contain the following information:

1. A page in Microsoft Word with the names and surnames (complete name , first and second family name separated by a hyphen) of all the authors ( without positions , and without academic degrees), academic affiliations and email addresses.
2. Complete manuscript title in Spanish and English.
3. Short Title
4. Abstract in Spanish and English using 250 or less words
5. Key words in Spanish and English not containing more than 6 words.
6. Name of the author responsible for all correspondence, including his complete address, telephone number and email address.
7. Electronic addresses of all the co-authors.
8. Text, bibliographical references and tables in the same file together with the legends for all the figures.
9. Figures must be in jpg or tiff format.

### Manuscript Structure

---

**Introduction:** there must be a clear description of the theoretical framework of the theme of the investigation, purpose of the article and justification of the study, indicating the limitation of the problem question.

**Materials and methods:** a description of the object of observation or experimentation, instruments or devices and the methodology employed in the study.

**Statistical analysis:** indicate the statistical methods used and the data analysis employed.

**Results:** these must be presented in a logical sequence, with the accompanying tables and figures with their respective explanations and analysis.

**Discussion:** emphasis must be given to those aspects of the study which are new and important, contrasting the results with the relevant information available in the recent literature and relate the conclusions with the proposed objectives. Mention must be made of the implications and limitations of the results found and a comparison of the relevant observations with that of other studies.

The results and the discussion may also be presented in a combined form.

**Conclusion:** an up to date survey of the investigation. Mention can be made here of future objectives of the same line of investigation.

**Bibliography:** these citations must be verifiable, enumerated and referred to in the body of the article enclosing each number with square brackets. When a citation is made, indicate in the text the author, the year and page in the following way:

#### **Direct or textual quotation**

If the textual citation has under 40 words it should be given in between quotation marks within the text and at the end it should include in parenthesis the surname, the year of publication and the page from which it was extracted.

Example:

The objective of the explicative studies is “ to respond to the causes of the physical or social events” (Hernández, Fernández and Baptista, 1991, p.66)

If the citation goes over 40 or more words it must be placed in a separate block independent of the text, without quotation marks allowing for bleeding on the left margin.

Example:

The scientific journals are contextual system of communication, of academic or investigative diffusion and strengthening of scientific competence (writing, investigation, evaluation, editing), in which the academic community shares beliefs, orientation and the commitment to contribute, use and advance the formal knowledge of collaboration and cooperation. (Mesa & Sánchez, 2010, p.4)

#### **Paraphrase or summary**

Mention must be made of the author and the date.

Example:

According to Sánchez (1991), cement is one of the most popular and indispensable materials in today’s construction.

There exist two types of learning: the passive reception of knowledge and the rediscovery of reality (Piaget, 1980)

If a cited document has between three or five authors, the surnames of all the authors must be given the first time they

are cited and afterwards include the surname of the first author followed by “ et al.” (not in italics and with a period after the “al.”).

If a cited document has six or more authors, place the first citation with the surname of the first author followed by “et al.” In the bibliographical list write the initials and surnames of the first six authors and for the rest use “ et al.”

#### **Bibliographical list**

It is the list, in alphabetical order (according to the first surname of the cited authors, which should be in bold) of the sources consulted and cited in the text of the article. It is mandatory to include the bibliographical list. It should be cited in the following way:

##### **Books**

Author. Year of publication. Title of the book. Edition. Publisher, place of publication, page(s).

Example:

**Ramírez J. E., S.J.** 1975. Historia de los terremotos en Colombia. Segunda edición. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, 250 pp.

##### **Article from periodical journal**

Author, A.A., Author, B.B. Year. Title of the article. Title of the journal, volume (number in parenthesis), pages.

Example:

**Ríos, L., Riva, F., Canaquire, L.** 2008. Reporte situacional del tráfico ilegal de fauna silvestre en la en la región nororiental del Perú . Rev. Acad. Colomb. Cienc. 38(147):218-22.

##### **On line periodical article**

Example:

**Sarabia A., Cifuentes H., Dimate M.** 2006. Estudio macrosísmico del sismo ocurrido el 12 de julio de 1785. Ingeominas. Bogotá. Date of query: (day, month, year). Available at: <http://aplicaciones1.ingeominas.gov.co/sicat/html/Metadato.aspx?CID=239714>

##### **Newspaper article**

Example:

**Duque, J. G.** 7 de junio de 2012. Antioquia reasume competencia para decidir futuro del túnel. El Colombiano, pp. 10.

##### **Thesis**

Example:

**Gómez Capera A.A.** 1998. *Atenuación de la intensidad sísmica para el territorio colombiano*. Tesis de grado en Física, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

### ***Congresses and symposia***

Example:

**Sánchez Upegui, A. A.** Octubre 2010. *Aplicación de la lingüística textual en los criterios de evaluación de artículos académicos e investigativos*. In: Simposio Nacional de Pedagogía y Currículo. Red Colombiana de Pedagogía, Medellín

### ***Unpublished manuscript or informal publications***

If the work is available at an institutional or personal web site, please add the name and URL of the institution.

Example:

Jaramillo, G. 2012. El patrimonio arquitectónico. Manuscrito inédito. Departamento de Artes, Universidad Latinoamericana. Recuperado de <http://...>

### ***Legal documents***

Regarding the citations in the text, the same data included in all other references should be provided (author, year, and if available, the same page number). If there is no identifiable author, the first words of the title should be noted, as well as the date.

Example:

Colombia. Ministerio de Educación Nacional. Ley 23 de 1982 sobre derechos de autor.

### **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.

### **The peer-review process**

---

Only articles which comply with the requirements mentioned in the information for authors will be accepted. The articles will be given their first evaluation by the Editor and the Editorial Committee of the Revista.

Each manuscript will be sent to two experts on the topic who will provide recommendations after review and evaluation. This process of revision will have a duration of 30 days.

The editor will inform each of the authors of the status of the process of evaluation of their work.

The academic peers will adopt one of three options: a) acceptance without modifications; b) acceptance with corrections; c) Deny acceptance. In case of disagreement among the peers, the original manuscript will be sent out for a third evaluation.

Under any of the three options, the author will be informed and must follow the corresponding modifications of the manuscript and return it within the following four weeks. In addition, the author(s) must provide a written document with answers to all the peers observations.

If the author takes more than 30 days to respond to the suggestions from the reviewers, the article will not be considered for publication in the next issue of the Revista. In case the response from the author takes longer than the allocated time, it is understood that the authors will retrieve the work in its present form and, if a new submission is made, the Editorial Committee of the Revista may treat it as a new work.

The works accepted for publication become property of the Revista ACCEFYN and may be reproduced in their entirety or partially by the Revista.

The Revista does not assume responsibility for the scientific content, nor for the legal implications of any of the published articles.

### **Publication of the manuscript**

---

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.

### **Conflicts of interest**

---

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).

### **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 (ACCEFYN), except in the following cases:

- a) 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, as long as the corresponding credit is given to the Revista of ACCEFYN. 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 of ACCEFYN.
- b) 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.
- c) If the Revista of ACCEFYN were approached for permission by a third party for using, printing or publishing specifically articles already published, the Revista of ACCEFYN must obtain the express permission of the author and co-authors of the work and/or of the employer with the exception of use in classrooms, libraries, or reprinted in a collective work.
- d) The Revista of ACCEFYN reserves the possible use in its front cover of figures submitted with the manuscripts.
- e) No other right, other than the author's right, can be claimed by the Revista of ACCEFYN.



**MinEducación**  
Ministerio de Educación Nacional

**PROSPERIDAD  
PARA TODOS**