

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXXV

JUNIO DE 2011

NÚMERO 135

DIRECTORA DE LA REVISTA: MARGARITA PEREA DALLOS



## CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
<b>Botánica (Botany)</b>		<b>Zoología (Zoology)</b>	
Características histológicas de las fases reproductivas del alga roja <i>Gracilaria Blodgettii</i> (Gracilariaceae) [Histological features of the reproductive stages of the red algae <i>Gracilaria Blodgettii</i> (Gracilariaceae)] <i>Hernel Marín-Salgado, Enrique J. Peña-Salamanca</i> .....	125	Peces del departamento de Santander, Colombia [Fishes of the Santander department, Colombia] <i>César A. Castellanos-Morales, Laura L., Marino-Zamudio, Lernei Guerrero-V., Javier A. Maldonado-Ocampo</i> .....	189
<b>Fitopatología (Plant Pathology)</b>		Influencias de un relleno sanitario sobre la composición, abundancia y dispersión diurna de los peces en la Quebrada el Venado, corregimiento de Córdoba, Municipio de Buenaventura (Valle del Cauca, Colombia) [Influences of a sanitary landfill over the daytime composition, abundance and dispersal of fish in el Venado Stream, locality of Córdoba, Municipality of Buenaventura (Valle del Cauca, Colombia)] <i>Carlos E. Fernández M., Maicol Ramírez, Efraín A. Rubio R.</i> .....	213
Etiología de la necrosis de los brotes terminales de la higuera ( <i>Ricinus communis</i> L.) [Etiology of the necrosis of the terminal buds of castor ( <i>Ricinus communis</i> L.)] <i>Claudia Milena Quiroz-Ojeda, María José Botero-Ospina, Jairo Castaño-Zapata</i> .....	133	Tráfico de monos nocturnos <i>Aotus</i> spp. en la frontera entre Colombia, Perú y Brasil: Efectos sobre sus poblaciones silvestres y violación de las regulaciones internacionales de comercio de fauna estipuladas por CITES [Trade in night monkeys <i>Aotus</i> spp. in the Brazil-Colombia-Peru tri-border area: Effects on its wild populations and violation of CITES regulations for the international trade of wildlife] <i>Ángela M. Maldonado Rodríguez</i> .....	225
<b>Medio Ambiente (Environment)</b>		Herpetofauna de los humedales La Bolsa y Charco de Oro, Andalucía, Valle del Cauca, Colombia [Herpetofauna of the wetlands La Bolsa and Charco de Oro, Andalucía Valle del Cauca, Colombia] <i>Raúl Pedroza-Banda &amp; Teddy Angarita-Sierra</i> .....	243
El ruido vehicular urbano y su relación con medidas de restricción del flujo de automóviles [Urban traffic noise and its relationship with car flow constraint measures] <i>Alberto Ramírez González, Efraín Antonio Domínguez Calle, Isabel Borrero Marulanda</i> .....	143	<b>Constitución de la Academia</b> (Members of the Academy) .....	261
<b>Física (Physics)</b>		<b>Publicaciones de la Academia</b> (Publications of the Academy) .....	265
Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado a partir del precursor <i>guadua Angustifolia Kunth</i> [Optimal identification of variables for obtaining of activated carbon from precursor <i>guadua Angustifolia Kunth</i> ] <i>Jhon Jairo Prías Barragán, Carlos Andrés Rojas González, Narly Andrea Echeverry Montoya, Gerardo Fonthal, Hernando Ariza Calderón</i> .....	157		
Inflación vectorial [Vector Inflation] <i>Carlos A. Sierra, Yeinzon Rodríguez</i> .....	167		
Anisotropía estadística, no gaussianidad, y perturbaciones en campos vectoriales [Statistical Anisotropy, Non-Gaussianity, and Perturbations in Vector Fields] <i>César A. Valenzuela-Toledo, Yeinzon Rodríguez</i> .....	175		

# CARACTERÍSTICAS HISTOLÓGICAS DE LAS FASES REPRODUCTIVAS DEL ALGA ROJA *GRACILARIA BLODGETTII* (GRACILARIACEAE)

Hernel Marín-Salgado<sup>1,2</sup>, Enrique J. Peña-Salamanca<sup>1,3</sup>

## Resumen

**Marín-Salgado, H., E. J. Peña-Salamanca:** Características histológicas de las fases reproductivas del alga roja *Gracilaria blodgettii* (Gracilariaceae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (135): 125-132, 2011. ISSN 0370-3908.

Se describen las fases carposporofita y tetrasporofita de *Gracilaria blodgettii* a partir de estudios morfológicos e histológicos. Se colectaron talos vegetativos y reproductivos entre Mayo y Octubre de 2006, y Septiembre a Diciembre de 2008, en la Bahía de Santa Catalina en Isla Providencia, Caribe Colombiano. El carposporofito presenta cistocarpos a lo largo del talo, con morfología oblonga, conformada por un núcleo y rodeado por un pericarpio interno medular estructurando el tejido nutritivo hacia el carposporofito. El tetrasporofito corresponde a individuos diploides cuyo hábito es similar al carposporofito, y su morfología se caracteriza por la presencia de tetrasporangios cruciados de forma ovada a cúbicos.

**Palabras clave:** *Gracilaria blodgettii*, histología, carposporofito, tetrasporofito, ciclo de vida, rhodophyta.

## Abstract

The carposporophyte and tetrasporophyte phases of *Gracilaria blodgettii*, are based on morphological and histological descriptions. Vegetative and reproductive thalli were collected between May and October of 2006, and between September and December of 2008, in the Bay of Santa Catalina, Old Providence Island, Colombian Caribbean. The carposporophyte showed cystocarps throughout the thallus, with oblong structures, and a nucleus surrounded by an internal medullar pericarp. The tetrasporophytic stage corresponds to individual diploids, characterized by the presence of cruciate tetrasporangium, with cubical to ovate shape.

**Key words:** *Gracilaria blodgettii*, histology, carposporophyte, tetrasporophyte, life cycle, rhodophyta.

<sup>1</sup> Biólogo, Bs. C. Universidad del Valle. Facultad de Ciencias Naturales y Exactas. Cali, Colombia. Calle 13 N° 100 – 00. A.A. 25360. Ciudad Universitaria Meléndez. PBX +57 321 2100.

<sup>2</sup> Universidad del Valle. Facultad de Ciencias Naturales y Exactas. Cali, Colombia. Correo electrónico: hnelmarin@gmail.com

<sup>3</sup> Biólogo, Ph. D. Correo electrónico: enrique.pena@correounivalle.edu.co

## Introducción

En las especies del género *Gracilaria* se observa un ciclo de vida haplo-diploide típico de las algas rojas, incluyendo dos estados de vida libre, el tetrasporofito (diploide) y el gametofito (haploide), y las unidades de dispersión, esporas y gametos respectivamente (Engel *et al.*, 2004). Varias especies han sido consideradas de importancia económica, dado que son fuentes importantes de agar, el principal ficololoide del mercado mundial (Zemke-Whyte y Ohno, 1999; Orduña y Robledo, 2002; Smit, 2004; Polifrone, *et al.*, 2006).

Recientemente, se ha revisado taxonómicamente el género *Gracilaria*, lo que ha permitido el registro de tres grandes clados para la familia Gracilariaceae, que corresponde a los géneros *Gracilaria*, *Gracilariopsis* e *Hydropuntia* (Gurgel *et al.*, 2004, Gurgel y Fredericq, 2004). *Gracilaria* presenta células nutritivas tubulares conectando el gonimoblasto con células internas del pericarpo, mientras que en *Gracilariopsis* hay ausencia de estos filamentos nutritivos, y en *Hydropuntia*, sí están presentes son escasos (Guiry, 2008). De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada por Byrne *et al.*, (2002), el género *Gracilaria* se caracteriza por la presencia de cistocarpos sésiles, presencia de células filamentosas nutritivas desde la base del cistocarpo creciendo hacia el pericarpio más interno, carpogonio piriforme a subsférico y tetrasporangio generalmente cruciado.

De acuerdo con Díaz y Díaz (2003), *G. blodgettii* se reporta para el Caribe colombiano en las costas de la Guajira, Magdalena, Parque Tayrona, Archipiélago Islas del Rosario y el Golfo del Darién, usualmente en ambiente submareal, sobre fondos limosos o arenosos, sobre valvas o ripio. Esta especie guarda sinonimia con *G. cylindrica* (Díaz y Díaz, 2003; Suárez, 2005).

La morfología de *G. blodgettii* se caracteriza por talos erectos, arbustivos y abundantemente ramificados, con ejes principales de 2 mm de diámetro, las ramillas de 0.5-1.0 mm de diámetro, todas las divisiones cilíndricas, las ramillas adelgazándose excepto en las puntas (Martínez, 1998). Los cistocarpos están dispersos en el talo, sobresaliendo de su superficie. Los espermacios se forman en receptáculos, cercanos a la superficie del talo, mientras que los tetrasporangios son cruciados y se encuentran dispersos en la corteza (Byrne *et al.*, 2002; Peña 1992). Teniendo en cuenta lo anterior, estudios histológicos permitan aclarar aspectos reproductivos de *G. blodgettii*, y son la base para esclarecer las controversias manifestadas a nivel taxonómico por otros investigadores con respecto al género *Gracilaria*.

El objetivo de este trabajo, consistió en describir las fases reproductivas del alga roja *G. blodgettii* (Gracilariaceae) a partir del análisis histológico y morfológico de talos reproductivos, provenientes del Caribe Colombiano. Estos resultados permiten contribuir al conocimiento del ciclo biológico de las especies del género *Gracilaria* en el Caribe Colombiano y aporta elementos morfológicos para la revisión del género en el Atlántico Occidental.

## Materiales y métodos

El material vegetal para el estudio proviene de poblaciones naturales de *G. blodgettii* ubicados en el sector de Playa Cocal, Bahía Santa Catalina en la isla Providencia, Caribe colombiano (13°20'N y 81°18'W), a 480 millas de la costa colombiana. Se extrajeron talos vegetativos, y ejemplares de las fases cistocárpicas y esporofítica, por medio de buceo autónomo, entre 12 y 20 m de profundidad, entre los meses de Mayo a Octubre de 2006 y Septiembre a Diciembre de 2008. El material fue lavado y transportado posteriormente al laboratorio de la Universidad del Valle para estudios morfológicos y clasificación sistemática, de acuerdo al protocolo propuesto por West y Calumpong (1988).

Para el mantenimiento y desarrollo de los talos en cultivo de laboratorio, se siguieron los procedimientos empleados por Collantes *et al.*, (1995), los cuales permitieron la obtención de explantes, procedentes de diferentes partes de la planta. Para el análisis histológico se trabajó con la técnica propuesta por Sass (1968) y Pérez-Cortéz *et al.*, (2003) siendo este un método sencillo para el estudio anatómico de macroalgas, que consiste en deshidratar la muestra en una serie ascendente de alcohol, Posteriormente se procedió a infiltrar el material vegetal en parafina, para luego procesar en micrótopo de rotación. Las láminas fueron rehidratadas en serie descendente de alcohol hasta una concentración final al 50%. Finalmente las láminas permanentes se colorearon con una mezcla de safranina 1% y azul de toluidina 1% en relación 3:1.

Se realizaron cortes semifinos con la técnica de Microscopía Óptica de Alta Resolución (MOAR). Para esto, porciones del talo fueron sumergidos en solución de Glutaraldehído 0,1 M y solución reguladora de fosfatos a pH 7,4. Posteriormente se sumergieron en solución fijadora de tetróxido de osmio 2%. La deshidratación se llevó a cabo en series ascendentes, empezando con etanol a 25% y terminando con etanol al 100% por periodos de 30 minutos cada uno. Los tejidos se sometieron a una pre-imbibición con resina y acetona, hasta la inclusión definitiva en resina Epoxica. Una vez obtenidos los bloques, se cortaron en Ultramicrotomo Ultracut Leica con cuchilla de vidrio en

grosos de 1 a 3.5  $\mu\text{m}$ , los cuales se tiñeron con azul de toluidina. Los análisis morfométricos se realizaron con un Sistema de Análisis de Imágenes NIS Elements Nikon versión 2.3. (Torres *et al.*, 2007)

## Resultados

### Plantas vegetativas

**Hábito:** Plantas colectadas sobre fondo arenoso entre 10 y 15 m de profundidad. Ramas filamentosas derivadas de una rama única inicial (Figura 1A).

**Características morfológicas:** Talos rojos oscuros a pardos y/o verdosos en algunos extremos apicales, 20-21 cm de altura, ramificación irregular alternada o pinnada, y generalmente con apariencia de serie de hilos, frondas cilíndricas de longitudes variables y diámetro constante, base no constreñida y ápice agudo. Eje principal aproximadamente entre 2 y 3 mm de diámetro cerca de la base, ramificación en múltiples niveles con algunos extremos apicales entrelazados y consistencia flácida, diámetros más reducidos que el eje principal. En la Tabla 1 se presenta el promedio de diámetros del talo de ramificación secundaria y terciaria, en varios niveles del mismo.

**Características histológicas:** El talo presenta tejido vegetativo con una pseudo-corteza de pequeñas células dispuestas radialmente y células medulares de mayor tamaño, las cuales albergan cuatro capas de células parenquimáticas con tamaño aproximado de 27,5  $\mu\text{m}$  de diámetro

**Tabla 1.** Valores promedios del diámetro tomado en varias secciones del talo de plantas vegetativas.

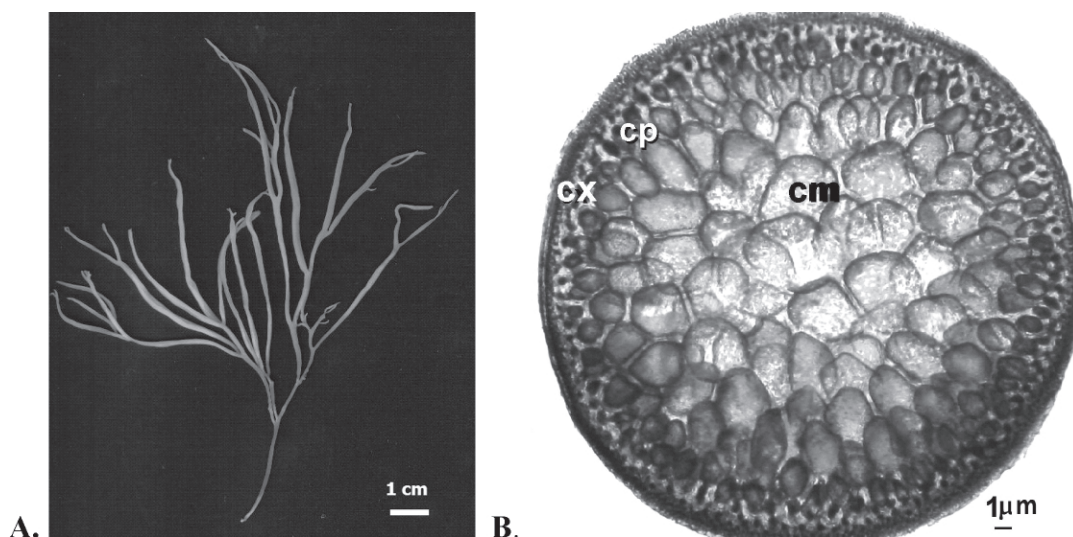
Sección del talo	Diámetro (mm)
Basal	1,18-1,70
Media	1,25-1,92
Distal	0,19-0,73
Promedio $\pm$ D. E.	1,06 $\pm$ 0,27 – 1,48 $\pm$ 0,58

(Figura 1B). Células corticales son más pequeñas, 2 -3 capas celulares, donde se observa una transición gradual con incremento de diámetro hacia las capas más internas dos a tres veces más densas.

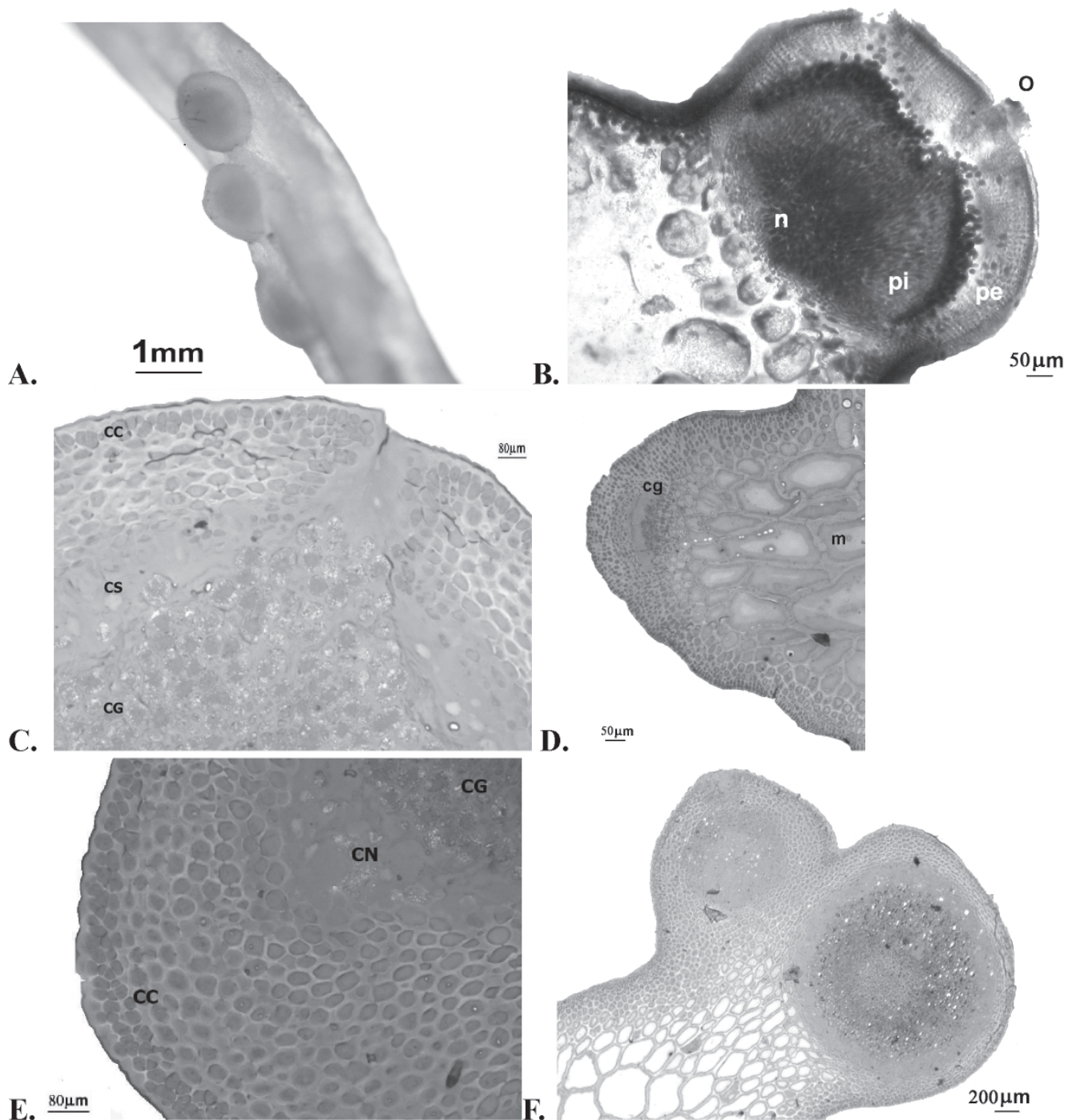
### Fase carposporofítica

Esta fase es caracterizada por talos con crecimiento filamentososo, ramificación irregular, derivados de una rama principal, altura aproximada de 15 cm, con presencia de cistocarpos distribuidos sin distinción del nivel de ramificación, excepto en la base del talo. Morfológicamente, el cistocarpo es una estructura oblonga, con presencia de células nutritivas transversales o filamentosas que descienden hacia la base del mismo. En la figura 2-A, se observa el lado adaxial de un grupo de cistocarpos maduros, cuyas dimensiones para la base oscilan de 1,12-1,23 mm de diámetro, 0,44-0,51 mm en el ápice, y 0,60-0,64 mm de altura.

A nivel histológico, el cistocarpo está conformado por pericarpo interno medular, células de soporte y del gonimoblasto en el área central; hacia la periferia se en-



**Figura 1.** A. Hábito general de *G. blodgettii*. B. Corte transversal en sección media del talo vegetativo, donde se destaca células medulares (cm), rodeadas por células parenquimáticas (cp) y el cortex (cx) en la zona más distal (100X). Escala: 1  $\mu\text{m}$ . Tinción en safranina – azul de toluidina.



**Figura 2.** A. Vista superficial de porción media y distal de la ramificación secundaria con distribución de cistocarpos maduros. B. Corte en micrótomos de rotación de cistocarpo maduro con ostiolo (o) en área distal para salida de carposporas (100x). Se destaca el núcleo del cistocarpo (n), seguido por el pericarpio interno no fotosintético (pi), y el pericarpio externo pigmentado (pe). Inclusión en parafina y tinción con safranina 1% y azul de toluidina 1%. C - F. Secciones semifinas de cistocarpo en resina epoxi. C. Detalle de células del gonimoblasto (cg) y de soporte (cs). Azul de toluidina. D. Presencia de células del gonimoblasto en formación (cg). Hacia el centro del corte se observan células de la medula (m) (40x). Azul de toluidina. E. Células de gonimoblasto en la zona superior, seguido por células nutritivas y del cortex. Azul de toluidina. F. Corte longitudinal donde se aprecia cistocarpo maduro (de mayor tamaño) y cistocarpo en etapas intermedias de formación (parte superior) (40x). Azul de toluidina.

cuentran células nutritivas y de fusión, presencia de células transversales o filamentosas que surgen desde la base del cistocarpo, entre 8 y 10 capas (Figuras 2B-C). En la figura 2-D y 2-E se observa detalle del cistocarpo en etapas iniciales del desarrollo, correspondiente a una rama carpogonial, células del gonimoblasto en formación y células de soporte, contrastando con la figura 2-F, donde es notable la presencia de un par de cistocarpos en diferentes etapas de desarrollo.

### Fase tetrasporofítica

Talos de vida libre, con ramificación filamentosas irregular. Corresponde a la generación diploide que presenta tetrasporangios productores de tetrasporas haploides. Talos entre 18 y 20 cm de altura aproximadamente. Morfología basada en el desarrollo de tetrasporangios comúnmente de tipo cruciado, células reproductoras que originan 4 esporas por meiosis (Figura 3). Los tetrasporangios cruciados, son de forma ovalada u ocasionalmente cúbicos, distribuidos en la zona cortical del talo, con una división media a lo largo de un eje corto (Figura 3A). En corte de la rama tetrasporangial se destacan células madre de las tetrasporas antes de iniciar división por meiosis, contrastando con la finalización de la telofase I (figuras 3B-3D). Cortes longitudinales de esporangios en anafase II y telofase II (figuras 3E-3F).

### Discusión

De acuerdo a las observaciones fenológicas en el área de estudio, la fase reproductiva predominante en los bancos naturales de *Gracilaria*, corresponde a la fase tetrasporofítica, lo cual permitió profundizar en la descripción morfológica e histológica de esta fase. Igual evento es reportado por **Thornber** (2006) en *G. dominguensis* y *G. gracilis*, así como para otras especies de rhodophytas. Los

resultados encontrados a partir del estudio morfo-histológico, son consistentes con las observaciones expuestas por otros autores para las especies del género *Gracilaria* (**Bellorin et al.**, 2002; **Gurgel et al.**, 2004b; **Martínez-Lozano**, 1998; **Guzmán et al.**, 2002; **Ye et al.**, 2006). **Byrne et al.** (2002) en su estudio anatómico y morfológico de tres especies de *Gracilaria*, encontraron que *G. chilensis* de Tasmania y Victoria (sureste Australiano) es morfológicamente similar a *G. chilensis* de Nueva Zelanda y Chile, cuyas características morfo-histológicas de los cistocarpos, son contrastantes con los expuestos en el presente estudio.

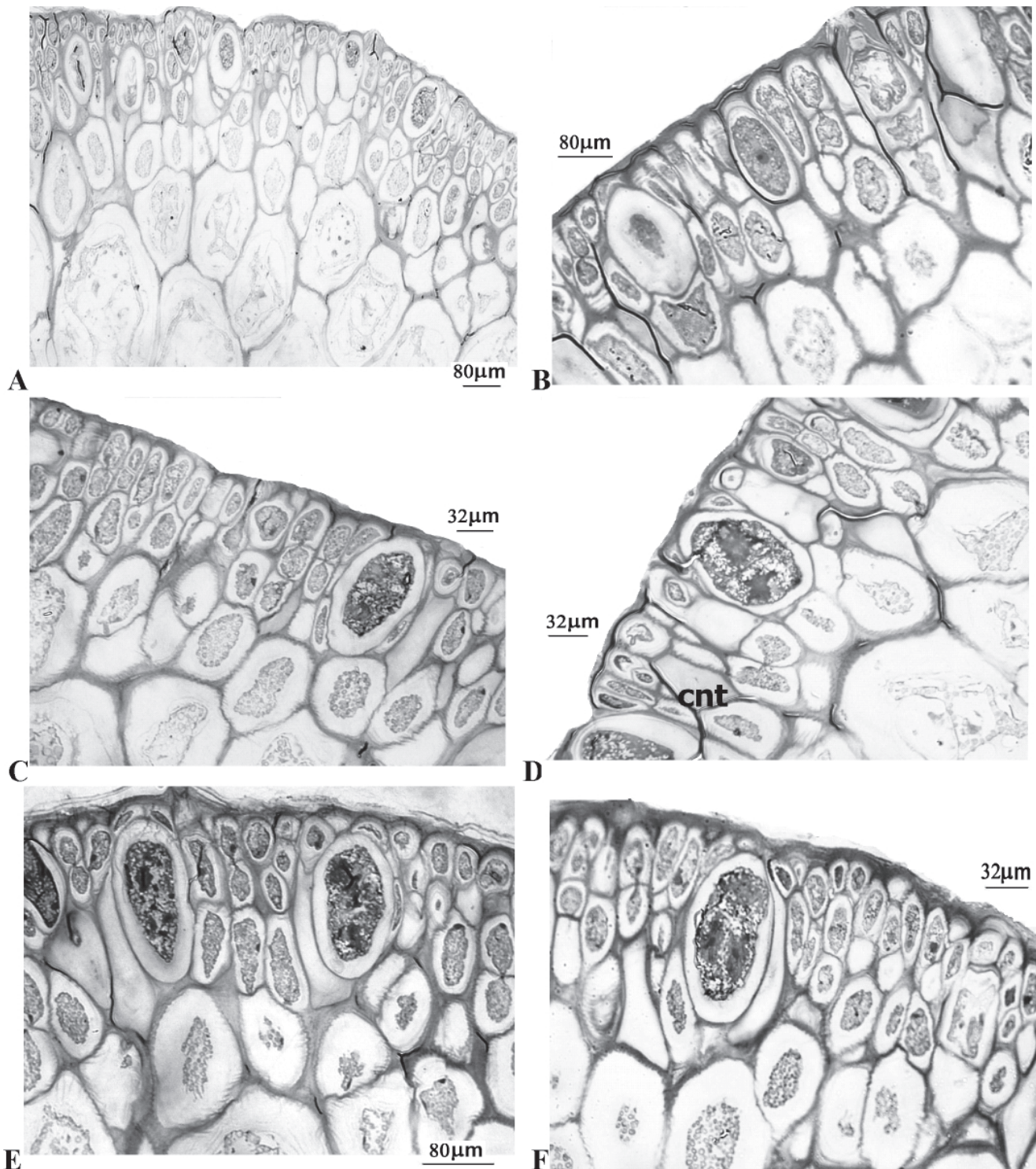
Desde los estudios de **Abbott** (1983) sobre el género *Gracilaria* se reporta una controversia desde el punto de vista taxonómico, en gran parte por los caracteres morfológicos, la aplicación incorrecta de epítetos y la falta de referencia a los especímenes tipo. **Abbott et al.**, (1991) y **Bellorin et al.**, (2004), sugirieron el traslado del género *Hydropuntia* al clado *Gracilaria* dada la conformación espermatangial y disposición de células nutritivas en la base del cistocarpo, en cuanto a criterios morfológicos y moleculares similares para ambos grupos.

*Gracilaria* se diferencia de los otros grupos por la presencia de células nutritivas tubulares conectando el gonimoblasto con células internas del pericarpo, de origen gametofítico en la base del cistocarpo, las cuales fueron encontradas en los cortes histológicos realizados al material carposporofítico colectado, presencia de tetrasporangios basales y carposporangios en cadena (Tabla 2). **Abbott et al.**, (1991) plantea los mismos parámetros de diagnóstico para diferenciar los géneros *Gracilaria*, *Gracilariopsis* e *Hydropuntia*. Por su parte en *Gracilariopsis* se observan carposporangios en agrupaciones y los tetrasporangios en células terminales.

Según **Bellorin et al.**, (2002), las características morfológicas y moleculares del género *Hydropuntia*, así

**Tabla 2.** Características diagnósticas de los géneros *Gracilaria*, *Gracilariopsis* e *Hydropuntia*. Adaptado de **Abbott et al.**, (1991).

Taxon	Células nutritivas tubulares	Espermatangio	Tetrasporangio	Carposporangio
<i>Gracilaria</i>	Presentes, sin transformación de células gametofíticas en la base del cistocarpo. Células corticales intercaladas	Solo en la base	En cadena	
<i>Gracilariopsis</i>	Ausente; células en la base del cistocarpo transformadas citológicamente en células nutritivas.	Superficial	Células terminales	Grupos o cadenas
<i>Hydropuntia</i>	Presente / Ausente; fusión secundaria de células nutritivas tubulares en la base del cistocarpo.	Subcortical (intercalado)	Lateral o basal	Filas o cadenas



**Figura 3 A-F.** Secciones semifinas de tetrasporangio en resina epoxi. **A.** Corte transversal del esporofito, destacando esporangios en la zona cortical (es). Azul de toluidina. **B.** Células madre de las tetrasporas al final de telofase I. Azul de toluidina. **C.** Esporangio en telofase I. Azul de toluidina. **D.** Tetrasporangio en formación al final de telofase I) y presencia de células nutritivas tubulares (cnt). Azul de toluidina. **E.** Esporangio en anafase II. Azul de toluidina. **F.** Detalle de rama tetrasporangial con esporangio finalizando división en telofase II. Azul de toluidina.

como la disposición espermatangial (del tipo *henriquesiana*) y la producción de células nutritivas tubulares en la base del cistocarpo (Abbott *et al.*, 1991), son argumentos para transferir las especies de este género a *Gracilaria*, donde se propone además una sinonimia entre ambos géneros. A partir del análisis molecular en las secuencias *rDNA* de *Gracilaria* y *Gracilariopsis*, corroboran la teoría de linajes evolutivos divergentes, aunque se encuentran características morfológicas a nivel de cistocarpo y espermatangio similares (Fredericq y Hommersand, 1989).

Martínez-Lozano (1998) propone que *G. blodgettii* Harvey 1853, se diferencia de *G. cylindrica* por el tipo de ramificación y el diámetro del talo reducido, siendo en la primera una ramificación radial, alternada, abierta o ascendente, repetida hasta el 2°-4° nivel y diámetro del talo entre 0,5-2 mm; mientras que *G. cylindrica* es escasamente ramificada, ramas no significativamente diferentes en tamaño de los ejes principales, arqueadas en su mayor parte, agudamente constrictas a pediceladas en sus puntos de fijación. Sin embargo, el material colectado en la isla de Providencia, reúne características de *G. blodgettii*, principalmente en las observaciones de las células medulares y de la corteza del talo, así como en la descripción de cistocarpos y tetrasporangios. Zertuche (1993) y Suárez (2005), mencionan que *G. cylindrica* guarda sinonimia con *G. blodgettii*, lo cual, sugiere que los reportes de *G. blodgettii* de Díaz-Pulido & Díaz-Ruiz (2003) para las regiones del Caribe oriental colombiano, eventualmente se pueden extrapolar hacia el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

De acuerdo con los resultados obtenidos, estos coinciden con las características citológicas e histológicas de la subclase Florideophycidae, donde los tetrasporangios son usualmente encontrados en talos diploides de vida libre. Es importante resaltar que la literatura reporta para la familia Gracilariaceae, la presencia de tetrasporangios con división cruciada, los cuales son ovados u ocasionalmente de forma cúbica, y normalmente tienen una división media reconocida en el eje más corto (Critchley, 1993; Yamamoto y Noro, 1993; Martínez-Lozano, 1998). La orientación de las dos divisiones restantes, típicamente encontradas en un eje longitudinal es más irregular. Los resultados expuestos por otros investigadores son consistentes con los obtenidos en esta investigación, donde la presencia de tetrasporangios con una marcada tendencia a la división cruciada es reiterativa en el análisis histológico realizado. Los datos presentados están respaldados por los propuestos por Yamamoto y Noro (1993) sobre el ciclo de vida de *G. euchemoides*, donde reportan el hallazgo de tetrasporangios de este tipo.

El presente estudio constituye una contribución para el conocimiento del ciclo biológico de *G. blodgettii*, y establece la primera descripción sobre estructuras reproductivas de la misma, a partir de análisis morfo-histológicos en el Caribe Colombiano. Se recomienda continuar con el monitoreo de la fenología reproductiva de la especie, e iniciar estudios moleculares que permita complementar la historia natural de la especie y esclarecer los aspectos taxonómicos del clado *Gracilaria*.

### Agradecimientos

El estudio se realizó en el marco del proyecto “Evaluación, Restauración y Recuperación Ambiental de los sistemas de producción de las Islas de Old Providence y Santa Catalina, después de los impactos causados por el paso del Huracán Beta”, cofinanciado por la Corporación para el Desarrollo sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina – Coralina — con la participación de la Cooperativa de Pescadores de Providencia y Catalina Fish and Farming. Los autores agradecen de manera particular a Martha Prada y Nicasio Howard, de la Fundación Árboles y Arrecifes de Providencia, por su valioso apoyo en el desarrollo del proyecto y logística durante los periodos de recolección de las muestras. Un especial reconocimiento a Gerardo Andrés Torres, Director de la Unidad de Microscopia Electrónica de la Universidad del Cauca. Igualmente a Edgar Rincón por su apoyo en la preparación y observación de las placas histológicas.

### Bibliografía

- Abbott, I. 1983. Some species of *Gracilaria* (Rhodophyta) from California. *Taxon*, **32**(4):561-564.
- . Junfu, Z., Bangmei, X. 1991. *Gracilaria mixta*, sp. nov. and other western pacific species of the (Rhodophyta: Gracilariaceae). *Pac. Sci.* **45**(1):12-27.
- Bellorin, A. M., Oliveira, M.C., Oliveira, E.C. 2002. Phylogeny and systematic of the marine algal family Gracilariaceae (Gracilariales, Rhodophyta) based on small subunit *rDNA* and ITS sequences of Atlantic and Pacific species. *J. Phycol.* **38**:551-563.
- , Oliveira, M.C., Oliveira, E.C. 2004. *Gracilaria vermiculophylla*: A western Pacific species of Gracilariaceae (Rhodophyta) first recorded from the eastern Pacific. *Phycol. Res.* **52**:69-79.
- Byrne, K., Zuccarello, G.C., West, J., Liao, M.L., Kraft, G.T. 2002. *Gracilaria* species (Gracilariaceae, Rhodophyta) from southeastern Australia, including a new species, *Gracilaria perplexa* sp. nov.; Morphology, molecular relationships and agar content. *Phycol. Res.* **50**:295-311.



- Collantes, G. & Melo, C.** 1995. Cultivo de tejidos y células de algas marinas. En: Alveal, K. Ferrario, M.E., Oliveira, E.C., Sar, E. (ed.). 1995. Manual de Métodos Ficológicos. Universidad de Concepción. Concepción, Chile. pp. 457-477.
- Critchley, A.** 1993. *Gracilaria* (Gracilariales, Rhodophyta): An economically important agarophyte. En: Ohno, M.; Critchley, A. (Eds). 1993. Seaweed cultivation and marine ranching. Kanagawa International Fisheries Training Center. Japan International Cooperation Agency (JICA). Chapter 9. pp. 89-112.
- Díaz-Pulido, G. Díaz-Ruiz, M.** 2003. Diversity of benthic marine algae of the Colombian Atlantic. *Biota Colombiana* **4**(2):203-246.
- Engel, C., Destombe, C., Valero, M.** 2004. Mating system and gene flow in the red seaweed *Gracilaria gracilis*: effect of haploid-diploid life history and intertidal rocky shore landscape on finescale genetic structure. *Heredity* **92**:289-298.
- Fredericq, S. & Hommersand, M. H.** 1989. Comparative morphology and taxonomic status of *Gracilariopsis* (Gracilariales, Rhodophyta). *J. Phycol.* **25**:228-241.
- Guiry, M.D.** 2008. AlgaeBase versión 2.1. World-wide electronic publication. Universidad Nacional de Irlanda, Irlanda (Consultada: Septiembre de 2010; <http://www.algaebase.org>)
- Gurgel, C.F.D., Fredericq, S.** 2004. Systematics of the Gracilariaceae (Gracilariales, Rhodophyta): A critical assessment on *rbcL* sequence analyses. *J. Phycol.* **40**:138-159.
- , **Fredericq, S., Norris, J. N.** 2004a. Molecular systematics and taxonomy of flattened species of *Gracilaria* Greville (Gracilariaceae, Gracilariales, Rhodophyta) from the Western Atlantic. En: Abbott, I. A. & McDermid, K. [Eds.] *Taxonomy of Economic Seaweeds*. With reference to the Pacific and other locations. Vol. IX. California Sea Grant College Program, La Jolla, CA.
- , **Fredericq, S., Norris, J.N.** 2004b. Systematics of *Hydropuntia* Montagne (Gracilariaceae, Gracilariales, Rhodophyta) based on comparative morphology and *rbcL* sequence analysis. [Summary] *J. Phycol.* **39**(1):20-20.
- Guzmán-U, A., García-J., P., Marián., F., Robledom, D., Robaina, R.** 2002. Polyamines influence maturation in reproductive structures of *Gracilaria cornea* (Gracilariales, Rhodophyta). *J. Phycol.* **38**:1169-1175.
- Martínez, S.** 1998. Flora Ficológica Marina del Estado de Tamaulipas. Universidad Autónoma de Nuevo León. Informe final del Proyecto H040.
- Orduña, J., Robledo, D.** 2002. Studies on the Tropical Agarophyta *Gracilaria cornea* J. Agardh (Rhodophyta, Gracilariales) from Yucatán, México. II. Biomass Assessment and Reproductive Phenology. *Bot. Mar* **45**:459-464.
- Peña, E.J.** 1992. Reproducción y Fenología de algas epífitas a raíces de mangle en estuarios tropicales. *Memorias, Sem. Nal. y Tec. del Mar, Colciencias-CCO.* pp. 182-188.
- Pérez-Cortéz, S.; Vera, B., Sánchez, C.** 2003. Técnica de coloración útil en la interpretación anatómica de *Gracilariopsis tenuifrons* y *Gracilaria chilensis* (Rhodophyta). *Acta Bot. Venez.* **26**(2):237-244.
- Polifrone, M., De Masi, F., Gargiulo, G.M.** 2006. Alternative pathways in the life history of *Gracilaria gracilis* (Gracilariales, Rhodophyta) from north-eastern Sicily (Italy). *Aquaculture* **261**:1003-1013.
- Sass, J. E.** Botanical microtechnique. 1968. 3ª ed. The Iowa State University Press. pp. 228.
- Smith, K.E., Hunter, C.L., Conklin, E.J., Most, R., Sauvage, T., Squair, C., Smith, C.M.** 2004. Ecology of the invasive red algae *Gracilaria salicornia* (Rhodophyta) on O'ahu, Hawaii. *Pac. Sci* **58**(2):325-353.
- Suarez, A. M.** 2005. Lista de macroalgas marinas cubanas. *Rev. Inv. Mar* **26**(2):93-148.
- Thorner, C.S.** 2006. Functional properties of the isomorphic biphasic algal life cycle. From the symposium "Integrating Function over Marine Life Cycles" presented at the annual meeting of the Society for Integrative and Comparative Biology, January 4-8. p. 605-614.
- Torres-R, G. A., González, S., Peña, E.** 2007. Microscopía óptica de alta resolución y electrónica de transmisión del riñón de rana toro (*Rana catesbeiana*) de la Laguna de Sonso. Valle del Cauca. Colombia. (Resumen) *Acta Microscópica*, 2007;16(1-2) Supp 2:184-185.
- West, J.A., Calumpong, H.P.** 1988. Mixed-phase reproduction of *Bostrychia* (Ceramiales, Rhodophyta) in culture. I. *B. tenella* (Lamouroux) J. Agardh. *Jpn. J. Phycol.* **36**:292-310.
- Yamamoto, H., Noro, T.** 1993. *In vitro* life history and spermatangial type of *Gracilaria eucheumoides* (Gracilariaceae, Rhodophyta). *Jpn. J. Phycol.* **41**:131-135.
- Ye, N., Wang, H., Wang, G.** 2006. Formation and early development of tetraspores of *Gracilaria lemaneiformis* (Gracilariaceae) under laboratory conditions. *Aquaculture*. **254**:219-226.
- Zemke-Whyte, W.L., Ohno, M.** 1999 World seaweed utilization: an end of-century summary. *J. App. Phycol.* **11**:369-376.
- Zertuche, J.A., (ed.)** 1993. Situación actual del cultivo de algas agarofitas en América latina y el Caribe. En: ZERTUCHE, J.A. 1993. Situación actual de la industria de macroalgas productoras de ficocoloides en América Latina y el Caribe. Programa cooperativo gubernamental FAO-ITALIA GCP/RLA/102/ITA Proyecto AQUILA II Documento de Campo núm.13. [www.fao.org/docrep/field/003/AB483S/AB483S01.htm](http://www.fao.org/docrep/field/003/AB483S/AB483S01.htm)

Recibido: noviembre 26 de 2010.

Aceptado para su publicación: mayo 2 de 2011.

# ETIOLOGÍA DE LA NECROSIS DE LOS BROTES TERMINALES DE LA HIGUERILLA (*RICINUS COMMUNIS* L.)

Claudia Milena Quiroz-Ojeda<sup>1</sup>, María José Botero-Ospina<sup>2</sup>, Jairo Castaño-Zapata<sup>3</sup>

## Resumen

**Quiroz-Ojeda C. M., M. J. Botero-Ospina, J. Castaño Zapata:** Etiología de la necrosis de los brotes terminales de la higuierilla (*Ricinus communis* L.). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (135): 133-142, 2011. ISSN 0370-3908.

La higuierilla (*Ricinus communis* L.) tiene gran importancia a nivel industrial, porque es una alternativa para la obtención de biocombustible, además de los múltiples usos del aceite de ricino. Pero, al incrementarse las áreas de cultivo, se han detectado enfermedades no registradas previamente. Esta investigación se realizó con el fin de identificar el agente causante de la Necrosis de los brotes terminales de la higuierilla o Muerte apical, en las variedades Nordesteña y Energía. Al microorganismo aislado, se le realizó pruebas de patogenicidad para cumplir con los postulados de Koch y una vez demostrada su patogenicidad, se determinó sus características culturales, morfológicas y bioquímicas. Los resultados demostraron que la enfermedad es causada por *Xanthomonas campestris*, la cual se manifiesta por la presencia de manchas de apariencia aceitosa y de color negro o café, en los brotes terminales y hojas jóvenes; además de exudado bacterial. La bacteria fue encontrada en semilla de las dos variedades en estudio, contaminando la testa y el embrión, constituyéndose en la fuente primaria de inóculo de la enfermedad.

**Palabras clave:** higuierilla, necrosis, brote, patogenicidad, bacteria, *Xanthomonas*.

## Abstract

Castor (*Ricinus communis* L.) has become a very important crop for the industry, because it is an alternative for the production of biofuel, besides of its multiple uses like the castor-oil. But, as the planting area increases, several new diseases have been detected. This research was conducted in order to identify the causal agent of the necrosis of the terminal buds or apical death, on the varieties Nordesteña and Energía. To the microorganism isolated, was conducted pathogenicity tests to demonstrate the Koch's postulates and once demonstrated its pathogenicity, was determined

<sup>1</sup> Magíster en Fitopatología. Correo electrónico: cmqo@hotmail.com

<sup>2</sup> Magíster en Fitopatología. Correo electrónico: mjbotero24@hotmail.com

<sup>3</sup> Ph.D. Profesor Titular. Universidad de Caldas- Correo electrónico: jairo.castano\_z@udecaldas.edu.co

its cultural, morphological and biochemical characteristics. The results showed that the Necrosis of the terminal shoots of castor is caused by *Xanthomonas campestris*, which is manifested by the presence of oily-looking patches of brown or black color in the terminal buds and young leaves, in addition to bacterial exudates. The bacterium was found in the seeds of both varieties tested, contaminating the seed coat and embryo, concluding that the seed is the primary source of inoculum of this disease.

**Key words:** castor, necrosis, bud, pathogenicity, bacterium, *Xanthomonas*.

## Introducción

La elevada demanda energética mundial ha hecho necesario buscar nuevas fuentes de energía, especialmente renovables y menos perjudiciales para el medio ambiente. El cultivo de higuierilla (*Ricinus communis* L.) se constituye en una alternativa válida para la obtención de biocombustible, además de tener un alto potencial para contribuir al desarrollo de la economía campesina, a corto, mediano y largo plazo. Es por esto, que su cultivo de manera comercial, en países como Colombia, puede constituirse en un medio rentable para los pequeños y medianos productores, además es un sistema productivo que puede convertirse en un gran generador de empleo y dinamizador de la economía nacional (CORPOICA, 2008; Da Silva Cunha, 2008).

Como esta especie ha sido considerada por mucho tiempo maleza y en Colombia hasta recientemente no se había cultivado de forma comercial, los resultados preliminares muestran la necesidad de profundizar en estudios sobre la viabilidad económica del cultivo y ampliar el conocimiento en cuanto al manejo fitosanitario de la higuierilla (CORPOICA, 2008).

Con respecto a la sanidad del cultivo, al incrementarse las siembras de higuierilla, se han detectado enfermedades ocasionadas por microorganismos que afectan los diferentes órganos de la planta, haciendo que esta no tenga un desarrollo normal y que los rendimientos sean alterados. Estas enfermedades y los microorganismos asociados, aún son objeto de estudio. Actualmente se adelantan estudios etiológicos en algunas enfermedades tales como: lesiones y pudriciones en cuello y raíces relacionadas con los hongos *Fusarium* sp., *Rhizoctonia* sp. y *Pythium* sp.; lesiones en tallo y defoliación de las ramas principales relacionadas con *Colletotrichum* sp. y *Botryodiplodia* sp.; lesiones foliares relacionadas con *Cercospora* sp., *Alternaria* sp. y *Cladosporium* sp. y lesiones y pudriciones en fruto ocasionadas por *Botrytis* sp. (CORPOICA, 2008).

Esta investigación se enfocó en una patología que afecta a los brotes terminales de la higuierilla y de la cual se desconocía el agente causante, impidiendo la imple-

mentación de un plan de manejo de la enfermedad. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue identificar y caracterizar el agente causante del Necrosamiento de los brotes terminales o Muerte apical de la higuierilla.

## Materiales y métodos

La investigación se realizó en la granja Montelindo, de la Universidad de Caldas, situada en Palestina (Caldas), vereda Santágueda, con altitud de 1.010 m, temperatura media de 23°C, humedad relativa de 80% y precipitación promedio anual de 1.800 mm; y en el laboratorio de Fitopatología, ubicado en el Departamento de Fitotecnia de la Universidad de Caldas, con altitud de 2.088 m, temperatura media de 17,5°C y humedad relativa de 73%.

La recolección de muestras se hizo en dos cultivos de higuierilla, establecidos con las variedades Nordestina y Energía, ubicados en la granja Montelindo. Para la identificación y caracterización de los microorganismos fitopatógenos asociados a la patología estudiada, se tomaron muestras de brotes, hojas tiernas y semilla de las dos variedades. Se realizó un solo muestreo, en el cual se evaluaron 80 plantas para la variedad Nordestina y 43 para la variedad Energía, correspondiente al 10% de la población. El muestreo de las plantas se hizo al azar

El reconocimiento y descripción de los síntomas asociados con la enfermedad, se hizo con base a la observación en campo de brotes y hojas tiernas de higuierilla naturalmente infectadas, revisándose los brotes y hojas de cada planta, desde la base hasta la parte apical.

### Aislamiento de bacterias fitopatógenas de brotes y hojas tiernas

El aislamiento se hizo por medio de siembra directa del tejido afectado, en agar nutritivo (AN, peptona 5 g/L, extracto de carne 4 g/L, agar 15 g/L). Se tomaron trozos de tejido sano y enfermo de 4 mm<sup>2</sup>, los cuales se colocaron en hipoclorito de sodio al 2,5% por un min. y se enjuagaron con agua destilada estéril, enseguida los trozos de tejido se dejaron secar por un min. sobre toallas de papel y posteriormente se transfirieron al medio de cultivo,

sembrándose cuatro trozos por caja Petri, éstas se sellaron y se incubaron 24°C en una incubadora marca WTB Binder, por 72 h. Al cabo de este tiempo, se observaron las siembras y de las colonias bacterianas que se desarrollaron, se hicieron repiques para purificarlas y someterlas a la tinción de Gram. La patogenicidad se comprobó mediante los postulados de Koch (**Botero & Ramírez, 1997**), en brotes y hojas de higuera silvestre.

#### Aislamiento de bacterias de semilla

**Siembra directa:** Se evaluaron 160 semillas por variedad. La semilla fue desinfectada con alcohol etílico al 70%, por un min. y con hipoclorito de sodio al 2,5% por cuatro min., seguidamente, se enjuagó con agua destilada estéril (**ADE**) por dos min. y se secó con toallas de papel, posteriormente, la semilla se sembró en **AN** y agar peptona sucrosa (**APS**, nitrato de calcio 0,35 g/700 mL, sulfato ferroso 0,35 g/700 mL, fosfato dibásico de sodio 1,4 g/700 mL, peptona 3,5 g/700 mL, sucrosa 14 g/700 mL, agar 10,5 g/700 mL), en cada medio se sembraron 80 semillas del total utilizado para cada variedad y se colocaron ocho semillas por caja de Petri, finalmente éstas se sellaron y se incubaron a 24°C, en una incubadora marca WTB Binder, por 72 h. Al cabo de este tiempo, se evaluó el porcentaje de contaminación de la semilla con bacterias fitopatógenas, lo cual se corroboró con la tinción de Gram (**Mehta et al., 2005**).

**Centrifugación:** Se muestrearon 160 semillas por variedad. Previo a la centrifugación, la semilla se esterilizó con alcohol al 70% por un min. y con hipoclorito al 2,5% por cuatro min., después, se lavaron con **ADE** por dos min. y se secaron con toallas. Luego, las semillas se transfirieron a un recipiente de vidrio con 600 mL de solución salina al 0,5%, el cual se agitó en un agitador mecánico marca AREC, durante seis h. continuas. Pasado el periodo de agitación, la solución obtenida se distribuyó por medio de filtración, en cinco tubos de 10 mL y estos se colocaron en una centrífuga marca Clay Adams, donde fueron centrifugados por 10 min., a 3.800 rpm, el precipitado obtenido en cada tubo se suspendió en 5 mL de **ADE**, se realizó una homogenización y se hizo la siembra de las suspensiones en **AN** y **APS**. En cada caja de Petri, se sembraron cuatro muestras, de 20 µL de la solución, las cuales se esparcieron en zigzag, con un asa bacteriana redonda estéril. Finalmente, las cajas se sellaron y se llevaron a incubarse a 24°C, en una incubadora marca WTB Binder, por espacio de 72 h., pasado este tiempo, se observaron las siembras y se evaluó el porcentaje de contaminación, contabilizando el número de semillas con presencia de bacterias fitopatógenas, confirmada con la tinción de Gram (**Mehta et al., 2005**). Para cada variedad se sembraron en total 160 semillas, 80 en **AN** y 80 en **APS**.

**Macerado de testa y embrión:** Se muestrearon 360 semillas por variedad y 160 por tejido evaluado, en tubos de ensayo con **ADE**, para un total de 80 semillas por cada tejido y utilizando dos semillas por repetición.

Previo a los macerados, las semillas se esterilizaron con alcohol al 70% por un min. y con hipoclorito de sodio al 2,5% por cuatro min., se enjuagaron con **ADE** y se secaron con toallas de papel estériles. Para el macerado de testa, se tomaron dos semillas, se les retiró la testa, la cual se colocó en un recipiente estéril, se le adicionó 0,5 mL de **ADE** y se molió en un mortero estéril por 2 o 3 min., a continuación el macerado se pasó a un tubo de ensayo con 5 mL de **ADE** y se dejó ahí por espacio de 6 h., al cabo de ese tiempo, de cada repetición se tomó 30 µL de la solución, se depositó sobre **AN** y se realizó una siembra por agotamiento, finalmente, las cajas de Petri se sellaron y se llevaron a incubarse a 24°C, por 72 h. Para el macerado del embrión el procedimiento fue el mismo, solo que en éste caso se utilizaron dos embriones (**Mehta et al., 2005**). Pasado las 72 h., se observaron las siembras y se calculó el porcentaje de contaminación, tanto en testa como en embrión, contando el número de semillas con presencia de bacterias fitopatógenas, en cada tejido, lo cual se verificó con la tinción de Gram.

#### Pruebas de patogenicidad

Para las pruebas de patogenicidad se utilizó solución bacteriana a una concentración de  $3 \times 10^8$  bacterias/mL, la cual corresponde al tubo No. 1 de la escala de opacidad de McFarland (**Botero & Ramírez, 1997**) y se emplearon plántulas de higuera sanas, de 30 días de edad, de las variedades Nordesteña y Energía, de las cuales se inocularon 20 plántulas por variedad, además se tuvieron 10 testigos, tanto para Nordesteña como para Energía, los cuales fueron inoculados con agua destilada estéril.

La inoculación se hizo por medio de heridas realizadas en hojas tiernas y brotes apicales, las cuales se hicieron con un par de cuchillas, insertadas en un bloque de madera de 7 x 5 cm y con bisturí, respectivamente, sumergidos con anterioridad en la solución bacteriana. Posteriormente, a las plántulas se les adecuó una cámara húmeda, colocándoles una bolsa plástica transparente a cada una, con una mota de algodón humedecido en su interior (**Castañón-Zapata & del Río, 1997; Nico et al., 2006**). Las plántulas inoculadas se dejaron en cámara húmeda por 3 d. y al cabo de ese tiempo se revisaron para valorar el resultado de la prueba de patogenicidad. Se evaluó la incidencia de la enfermedad, tomándose como positivo aquellas plántulas cuyos brotes y hojas tiernas expresaron los síntomas de la enfermedad. Finalmente, de las plántulas afectadas se hizo el reaislamiento de la bacteria en **AN** y se realizó su identi-

ficación, con el fin de complementar los postulados de Koch (Nico *et al.*, 2006).

#### Pruebas culturales, morfológicas y bioquímicas

La identificación y caracterización de las cepas bacterianas, se hizo determinando las características que se indican a continuación:

**Características culturales.** Se observó la forma, color, opacidad, superficie, bordes, pigmento y consistencia de las colonias, en agar, extracto de levadura, dextrosa, carbonato de calcio (YDC, extracto de levadura 10 g/L, dextrosa 20 g/L, carbonato de calcio 20 g/L, agar 15 g/L) (Botero & Franco, 2007).

**Características morfológicas.** Se estableció con la tinción de Gram y su confirmación mediante solubilidad en KOH al 3%, además se observó la forma de la bacteria, al microscopio a 100X (Botero & Franco, 2007).

**Características bioquímicas.** Se determinó utilizando las siguientes pruebas: producción de la enzima catalasa, oxidasa, crecimiento en agar nutritivo glucosa, crecimiento en agar Mac Conkey, oxidación-fermentación para glucosa (Hugh- Leifson-OF), indol-movilidad-ácido sulfhídrico (SIM), licuefacción de la gelatina, utilización del citrato, agar-triple-azúcar hierro (TSI), producción de ácido a partir de arabinosa, glucosa y mannososa, crecimiento en agar nutritivo a 36 °C, hidrólisis del almidón, crecimiento en agar bilis esculina, crecimiento en agar, extracto de levadura, YDC, leche tornasolada, urea, crecimiento en agar sangre y crecimiento en agar eosina y azul de metileno (EMB) (Schaad, 1988).

#### Resultados y discusión

**Reconocimiento de síntomas:** Al comienzo de la enfermedad, se observaron lesiones o puntos de color negro o café en la base de los brotes terminales y con el tiempo, el necrosamiento del tejido avanzó hasta comprometer todo el brote, imposibilitando la formación de hojas nuevas. Finalmente el brote necrosado se seco y se cayó. Las lesiones inicialmente eran acuosas o húmedas y de apariencia aceitosa, además, se podía observar en los puntos de unión entre el tallo y el brote, y sobre el tejido necrosado un exudado bacterial café. Cuando el brote no había sido atacado completamente, se desarrollaba la hoja, pero ésta se deformaba en las partes donde era afectada por el patógeno, porque las porciones de tejido necrosado se desprendían y caían (Figura 1).

Referente a la edad de susceptibilidad de la planta, se ha observado que la enfermedad se puede presentar en

brotes de plantas desde las seis semanas de edad, afectando a los retoños desde el estrato inferior de la planta, hasta el superior; sin embargo, esta patología no afecta el desarrollo general de la planta, porque esta continua creciendo normalmente.

Según Swings & Civerolo (1993), la necrosis de los tejidos, es un síntoma característico de muchas especies del género *Xanthomonas*, especialmente de aquellas que causan manchas en las hojas, ya que al avanzar la enfermedad el fenol de la vacuola reacciona con el citoplasma y la membrana, envolviéndolos de oxidasas y glicosidasas; la oxidación del fenol es lo que resulta en el desarrollo de una pigmentación café o negra de los tejidos de la planta. Estos autores, también afirman, que las lesiones acuosas se vuelven necróticas al final de la infección, probablemente debido a la desintegración continua de los tejidos y en infecciones severas las lesiones pueden coalescer, destruyendo áreas grandes de la lámina foliar, lo que se conoce como Tizón bacterial. Finalmente el área necrótica se separa de la parte sana del tejido y se desprende.

Lozano & Sequeira (1974), reportan que *Xanthomonas campestris* pv. *manihotis*, causante del Tizón bacterial de la yuca, no invade los tejidos maduros de la mayoría de los cultivares de esta planta, por eso las ramas adultas y los tallos de las plantas infectadas permanecen sanos; estos autores indican que la diseminación de la bacteria a partir de plantas infectadas, se da hacia las plantas jóvenes, puesto que la penetración a través de tejidos tiernos probablemente es mayor en comparación con los tejidos maduros.

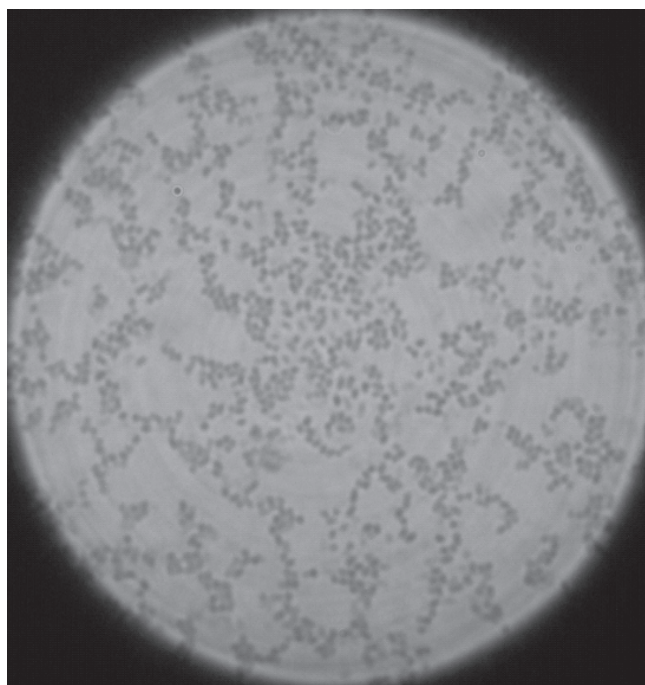
#### Aislamiento de bacterias fitopatógenas de brotes y hojas tiernas de higuierilla

De las siembras directas de tejido, se obtuvo colonias bacterianas amarillas, confirmándose la presencia de bacterias fitopatógenas con la tinción de Gram (Figura 2). De estos cultivos, se obtuvieron 67 aislamientos bacterianos, que fueron obtenidos de cada tipo de tejido evaluado (brote y hoja de Nordeste, brote y hoja de Energía), los cuales se caracterizaron por presentar bacilos Gram negativos y formar colonias de color amarillo y de apariencia butirosa.

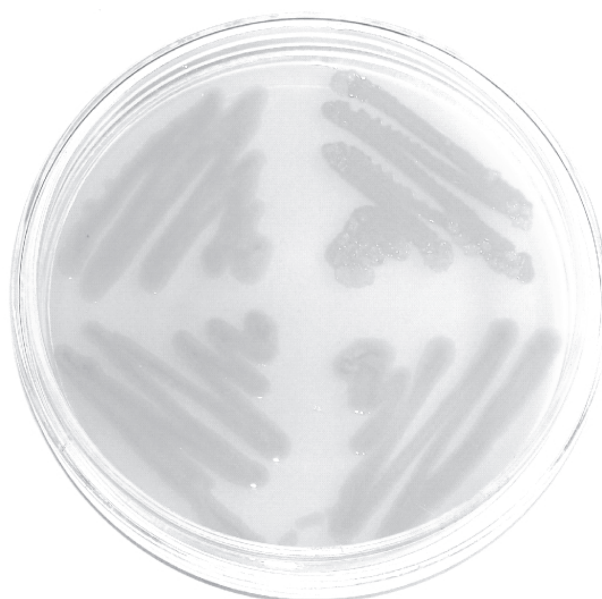
Posteriormente, a las cepas bacterianas se les comprobó su actividad patogénica por medio de pruebas de patogenicidad realizadas en brotes y hojas tiernas de higuierilla silvestre; de esta manera se identificaron 18 cepas altamente patogénicas, puesto que a los tres días después de la inoculación, mostraron los síntomas de la enfermedad. Todos los aislamientos fueron rayados en YDC, obteniéndose colonias amarillas, de superficie lisa, brillantes y de apariencia butirosa (Figura 3).



**Figura 1.** Plantas de higuerilla con sintomatología de la patología estudiada: **A.** Brote necrosado, **B.** Hoja tierna con necrosis en la base.



**Figura 2.** Bacilos Gram negativos (100X).

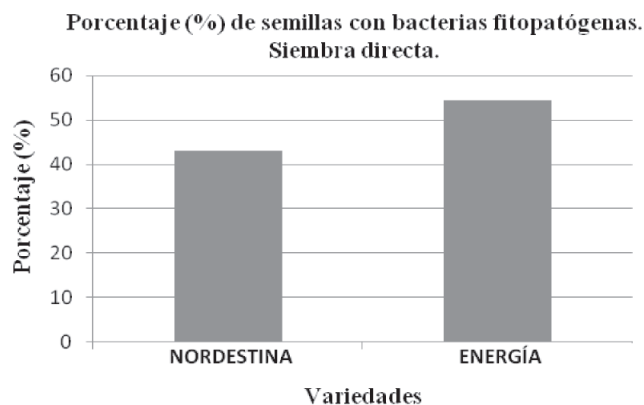


**Figura 3.** Crecimiento de cepas bacterianas puras en agar, extracto de levadura, dextrosa, carbonato de calcio (YDC), mostrando colonias de color amarillo, lisas, brillantes y de apariencia butirosa.

**Schaad (1988)**, indica que las colonias de *Xanthomonas*, son mucoides, convexas y brillantes sobre agar nutritivo glucosado (NGA) y agar, extracto de levadura, dextrosa, carbonato de calcio (YDC), también afirma que una vía de apoyo para confirmar la presencia del género *Xanthomonas* es la identificación del pigmento amarillo, el cual le da el color a las colonias.

#### Aislamiento de bacterias fitopatógenas de semilla de higuierilla

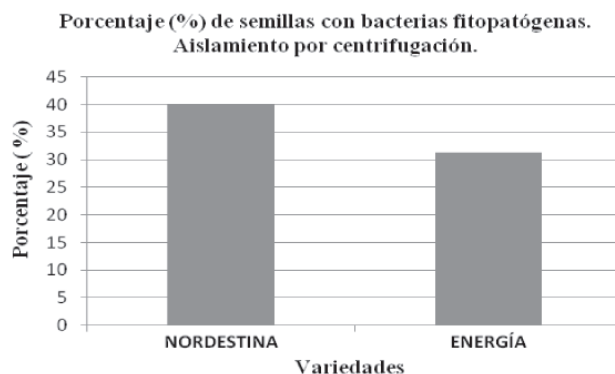
**Aislamiento por siembra directa:** Se aislaron bacterias de colonias amarillas, las cuales resultaron ser fitopatógenas, corroborándose con la tinción de Gram. Respecto al porcentaje de semillas con bacterias fitopatógenas, se encontró que el 43% de las semillas de Nordestina estaba contaminada y el 54% de Energía (Figura 4).



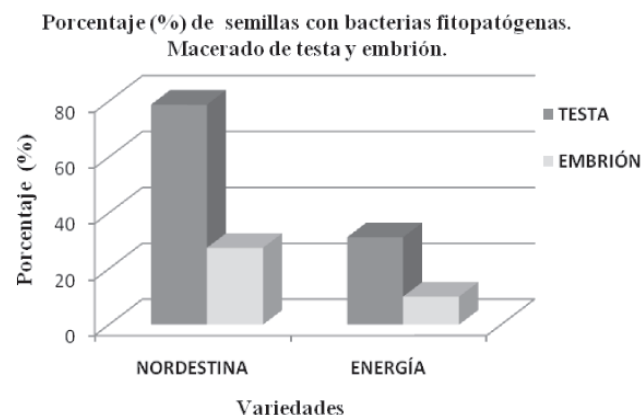
**Figura 4.** Porcentaje de semillas de higuierilla de las variedades Nordestina y Energía con bacterias fitopatógenas, evaluadas por el método de siembra directa. Porcentaje con base en 160 semillas muestreadas, por variedad.

**Aislamiento por centrifugación.** Se observó el crecimiento de colonias bacterianas de color amarillo, confirmando la presencia de bacterias fitopatógenas con la tinción de Gram. Se encontró bacterias fitopatógenas en el 40% de los cultivos de la variedad Nordestina y 31% en los cultivos de Energía (Figura 5).

**Aislamiento por macerado de testa y embrión.** Se aislaron colonias bacterianas fitopatógenas, tanto de las siembras de macerado de testa, como de las siembras de macerados de embrión. Se observó bacterias fitopatógenas en 79% de las testas de la variedad Nordestina y 28% en el embrión. Así mismo, en las testas de Energía se detectó un 31% de bacterias fitopatógenas y 10% en el embrión (Figura 6). Como se desprende de estos resultados, la bacteria se encuentra en mayor porcentaje sobre la testa de la semilla,



**Figura 5.** Porcentaje de semillas de higuierilla de las variedades Nordestina y Energía con bacterias fitopatógenas, evaluadas por el método de centrifugación. Porcentaje con base en 160 repeticiones, por variedad.



**Figura 6.** Porcentaje de semillas de higuierilla de las variedades Nordestina y Energía con bacterias fitopatógenas en testa y embrión, evaluadas por el método de macerado. Porcentaje con base en 160 semillas, por tejido evaluado.

siendo mayor en Nordestina que en Energía; y, muy significativamente en los tejidos internos de las semillas de ambas variedades, lo cual dificulta su detección y manejo.

Teniendo en cuenta que en el muestreo de semilla de las variedades Nordestina y Energía, evaluada por los tres métodos, se encontraron bacterias fitopatógenas, corroborado con pruebas de patogenicidad, se dedujo que la semilla es la fuente primaria de inóculo y que posiblemente podría considerarse como un medio de diseminación del agente causante de la Necrosis de los brotes terminales de la higuierilla.

Resultados similares fueron reportados por **Mehta et al.** (2005), al recuperar a *Xanthomonas axonopodis* pv. *malvacearum*, de semilla de algodón, naturalmente infec-

tada, las colonias típicas de *Xanthomonas* crecieron alrededor de la semilla, muestreada por medio de siembra directa en un medio semiselectivo, las colonias fueron amarillas, lisas, convexas y brillantes.

**Swings & Civerolo (1993)**, afirman que las bacterias de muchos patovares de *Xanthomonas campestris*, están asociadas con la semilla de sus plantas hospedantes, la semilla puede encontrarse contaminada externamente e infectada internamente con éste género bacterial. Lo anterior confirma los resultados obtenidos en esta investigación, puesto que la bacteria fitopatógena aislada de la semilla de higuierilla se encontró tanto en la testa, como en el embrión.

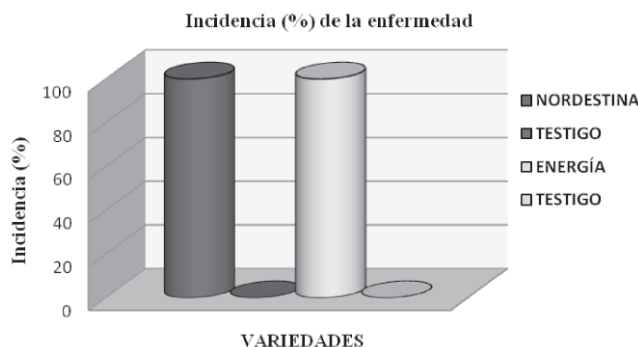
Se han reportado diferentes formas de contaminación de semilla para las enfermedades causadas por bacterias; la contaminación puede ser externa, como consecuencia del contacto de la semilla con poblaciones bacterianas sobre tejidos enfermos, o a una alta cantidad de inóculo sobre los frutos, o por el roce con residuos que acarrean una alta población bacterial. La semilla puede ser infectada por la invasión de las estructuras florales y también puede ser contaminada internamente, por el movimiento sistémico del patógeno de plantas madres infectadas a plantas hijas (**Walcott et al.**, 2003).

#### Desarrollo de las pruebas de patogenicidad

Los resultados de las pruebas de patogenicidad, expresados en porcentaje de incidencia de la enfermedad, demostraron la patogenicidad de la bacteria, la cual es capaz de reproducir los síntomas de la Necrosis de los brotes terminales o Muerte apical de la higuierilla.

La incidencia de la enfermedad en las plántulas de la variedad Nordeste fue del 100%, en cambio en los testigos de esta variedad no se presentó la enfermedad, y para la variedad Energía, el comportamiento fue el mismo, con un porcentaje de infección del 100%, en las plántulas inoculadas con la bacteria y de 0% en las plántulas testigo (Figura 7).

Estas pruebas también permitieron determinar que el periodo de incubación de esta bacteria, bajo condiciones controladas de humedad, es de tres días en las dos variedades de higuierilla, porque las plántulas presentaron los síntomas de la enfermedad a los tres días después de la inoculación, observándose en los puntos de corte en los brotes y hojas tiernas, lesiones de color café y de apariencia acuosa, evidencia del inicio de la necrosis de los tejidos. También se pudo observar la presencia de un exudado bacterial de color café en las lesiones. Este periodo de incubación es similar al obtenido por **Botero et al.**, (2006), en el patosistema mayacuyá-*Xanthomonas campestris* pv. *passiflorae*.



**Figura 7.** Incidencia (%) de la enfermedad, en plántulas de higuierilla, de las variedades Nordeste y Energía, resultado de las pruebas de patogenicidad.

Finalmente, a los cinco días los brotes y hojas tiernas se encontraban totalmente invadidas por el patógeno, manifestándose en una desintegración total de los tejidos (Figura 8 A).

Por último, de las plántulas inoculadas y enfermas se tomaron muestras de brotes y hojas tiernas, para hacer el reaislamiento de la bacteria fitopatógena, obteniéndose cepas bacterianas con características típicas del género *Xanthomonas* y por lo tanto similares a la utilizada para la inoculación, completándose de esta manera los postulados de Koch.

Por medio de la comprobación de la asociación íntima de *Xanthomonas* sp., con las plantas de higuierilla, afectadas por la Necrosis de los brotes terminales, su aislamiento en medio de cultivo puro, seguido por la inoculación de ésta en plántulas sanas, la posterior reproducción de la sintomatología de la enfermedad en las mismas y finalmente el reaislamiento del mismo patógeno en cultivo puro, se afirma que *Xanthomonas* sp. es el agente causal de la Necrosis de los brotes terminales de higuierilla.

**Tushemereirwe et al.** (2004), hicieron un primer reporte de *Xanthomonas campestris* pv. *musacearum*, atacando a banano, en Uganda. Ellos comprobaron por medio de los postulados de Koch, que la bacteria mencionada es la causante de un desorden patológico caracterizado por un rápido amarillamiento y marchitamiento de hojas jóvenes, ocasionalmente una muerte descendente, que se inicia en la parte floral y pudrición de la parte interna del fruto.

#### Pruebas culturales, morfológicas y bioquímicas

Para la identificación y caracterización del agente causante de la Necrosis de los brotes terminales de la higuierilla, se evaluaron 42 cepas bacterianas distribuidas así: 18 cepas obtenidas a partir de la siembra directa de brotes y





**Figura 8.** A. Brote de higuerrilla, mostrando síntomas de la enfermedad, tres días después de la inoculación con la bacteria fitopatógena. B. Testigo (sin presencia de síntomas).

hojas tiernas, de las dos variedades, 12 cepas obtenidas a partir del muestreo de semilla y 12 cepas provenientes de las pruebas de patogenicidad.

En cuanto a las características culturales, todas las cepas se evaluaron en YDC, obteniéndose el desarrollo de colonias de color amarillo, de forma redonda, de bordes enteros, brillantes, mucoides, de superficie lisa, elevación convexa y de apariencia butirosa, características típicas del género *Xanthomonas*. Con respecto a las características morfológicas, todos los aislamientos exhibieron bacilos Gram negativos, de tamaño pequeño y uniforme, con bordes redondeados y de presencia individual.

Referente a la caracterización bioquímica, todos los aislamientos fueron sometidos a 22 pruebas. Los resultados de éstas pruebas para determinar la identidad de la bacteria como perteneciente al género *Xanthomonas* y a la especie *campestris*, se presentan en la Tabla 1.

En las pruebas bioquímicas básicas para la especie *Xanthomonas campestris*, los 40 aislamientos reaccionaron positivamente a catalasa, movilidad, producción de ácido sulfhídrico e hidrólisis de la esculina; los mismos reaccionaron negativamente a oxidasa, producción de indol y urea; presentaron metabolismo oxidativo en Hugh-Leifson (OF) y la reacción de las cepas fue variable a hidrólisis del almidón, licuación de la gelatina y utilización de citrato,

**Tabla 1.** Consolidado de los resultados de la caracterización bioquímica, hecha a 42 aislamientos bacterianos, obtenidos de brotes, hojas tiernas, semilla y pruebas de patogenicidad, de higuerrilla.

Gram	-
Reconfirmación de Gram con KOH al 3%	+
Catalasa	+
Oxidasa	-
Crecimiento en agar nutritivo – Glucosa	Mucoide
Agar Mac Conkey	L-
Crecimiento en Hugh-Leifson (OF)	Metabolismo oxidativo
Indol-	
Movilidad	+
Acido sulfhídrico	+
Utilización de citrato	Variable
Agar triple-azúcar-hierro (TSI)	Ácido/Alcalino
Leche tornasolada	-
Agar EMB	+
Agar sangre	+
<b>Pruebas para la especie <i>campestris</i></b>	
Crecimiento a 36°C	+
Hidrólisis del almidón	Variable
Agar bilis esculina	+
Crecimiento en YDC	+
Licuación de la gelatina	variable
Urea	
Arabinosa	+
Mannosa	+
Glucosa	+

**Tabla 2.** Comparación de los resultados de la caracterización bioquímica de la bacteria en estudio, con patrones de referencia de *X. campestris* y *X. axonopodis*.

Pruebas	Aislamientos de higuierilla	<i>X. campestris</i>	<i>X. axonopodis</i>
Crecimiento a 36°C	+	+	+
Colonias amarillas	+	+	+
Hidrólisis de la esculina	+	+	+
Crecimiento mucoide	+	+	-
Licuación de la gelatina	+/-	+/-	-
Urea	-	-	-
Formación de ácido:			
Arabinosa	+	+	-
Mannosa	+	+	-
Glucosa	+	+	+

todos crecieron a 36°C y produjeron ácido a partir de arabinosa, mannososa y glucosa. Finalmente se hizo una comparación de los resultados de la caracterización bioquímica de los aislamientos bacterianos obtenidos en ésta investigación, con patrones de referencia de *X. campestris* y *X. axonopodis* (Tabla 2).

**Schaad** (1988), indica que las bacterias del género *Xanthomonas*, son bacilos Gram negativos, aeróbicas, catalasa positiva, no utilizan la asparagina como una sola fuente de carbono y nitrógeno y la producción de ácido a partir de carbohidratos es débil.

La caracterización de la especie, comparándola con *X. campestris* y *X. axonopodis*, mediante pruebas culturales, morfológicas, y bioquímicas, permitió concluir que la bacteria aislada de los brotes, hojas tiernas y semilla, de higuierilla, se comporta como *Xanthomonas* de la especie *campestris*; por lo tanto, el agente causal de la Necrosis de los brotes terminales o Muerte apical, de la higuierilla es *Xanthomonas campestris*.

De acuerdo a **Schaad** (1988) y **Holt** (1994), *X. campestris* presenta crecimiento mucoide sobre agar extracto de levadura, dextrosa, carbonato de calcio (YDC) o agar, glucosa, extracto de levadura, carbonato de calcio (GYCA), crece a 35°C, hidrolisa la esculina, la licuefacción de la gelatina es variable (+/-), la digestión de proteína es positiva, la producción de urea es negativa y produce ácido a partir de arabinosa, glucosa y manosa. Teniendo en cuenta esto, se puede afirmar que la bacteria evaluada, pertenece a esta especie, ya que en las pruebas mencionadas, los resultados fueron los mismos.

## Conclusiones

La Necrosis de los brotes terminales o Muerte apical de la higuierilla, de las variedades Nordestina y Energía, es

una enfermedad de origen bacterial, cuyo agente causante es *Xanthomonas campestris*, el cual se identificó y caracterizó por medio de pruebas de patogenicidad y caracteres culturales, morfológicos y bioquímicos.

*X. campestris*, es capaz de atacar a brotes y hojas tiernas de éstas variedades, causándoles lesiones café y de apariencia acuosa. En los brotes la infección causa una necrosis total del tejido a medida que la enfermedad avanza, imposibilitando la formación de hojas nuevas.

En las pruebas de patogenicidad se logró obtener los síntomas típicos de la enfermedad sobre los brotes y hojas tiernas de las plántulas de higuierilla de las dos variedades, tres días después de la inoculación.

Se estableció que la fuente primaria de inóculo en éste patosistema, es la semilla asintomática.

## Bibliografía

- Botero, M. J. & G. Franco.** 2007. Identificación y caracterización preliminar del agente causal de la Mancha necrótica de las hojas de la mora (*Rubus glaucus*) en el municipio de Trujillo (Valle del Cauca, Colombia). Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria **8**(2):22-25.
- \_\_\_\_\_. & **M. C. Ramírez.** 1997. Identificación y caracterización de bacterias asociadas con enfermedades en maracuyá (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa*), en dos zonas productoras del departamento de Caldas. Trabajo de grado (Especialista en Microbiología). Universidad Católica de Manizales. Post-Grado de Microbiología. 191 p.
- \_\_\_\_\_. **M. C. Ramírez & J. Castaño-Zapata.** 2006. Determinación del periodo de incubación de *Xanthomonas campestris* pv. *passiflorae* Pereira, agente causante de la Bacteriosis del maracuyá (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa* Degener). Boletín Fitotecnía N0. 107. Enero 2006.
- Castaño Zapata, J. & L. Del Río Mendoza.** 1997. Manual para el diagnóstico de hongos, bacterias, virus y nematodos fitopató-

- genos. Ied. Manizales: Centro Editorial Universidad de Caldas, Manizales, Colombia - Zamorano Academic Press, Tegucigalpa, Honduras. 210 p.
- Corpoica.** 2008. Higuera: Alternativa productiva, energética, y agroindustrial para Colombia. Primera ed. Rionegro 2008. 35 p.
- Da Silva Cunha, M. A.** 2008. Análisis molecular de la variabilidad genética entre genotipos de *Ricinus communis* L. revelada por marcadores RAPD. Brasil. 52 p.
- Holt, J. G., N. R. Hrieg, P. H. Sneath, J. T. Staley & S. Williams.** 1994. Bergey's manual of determinative bacteriology. 9th ed. USA: Williams & Wilkins, Ed. 787 p.
- Lozano, J.C. & L. Sequeira.** 1974. Bacterial blight of cassava in Colombia: Etiology. *Phytopathology* 64:74-82.
- Mehta, Y. R., C. Bonfeti & V. A. Bolognini.** 2005. A semi selective agar médium to detect the presence of *Xanthomonas axonopodis* pv. *malvacearum* in naturally infected cotton seed. *Fitopatología Brasileira* 30(5):489-495.
- Nico, A.I, A. M. Alippi, E. Dal Bo & L. B. Ronco.** 2006. Interacción de *Pseudomonas corrugata* y *Pseudomonas viridiflava* y diferentes genotipos de tomate. *Revista de la Facultad de Agronomía* 106:37-45.
- Schaad, N.W.** 1988. Laboratory guide for identification of plant pathogenic bacteria. St. Paul. University of Georgia. Department of Plant Pathology. 164 p.
- Swings, J.G. & E. L. Civerolo.** 1993. *Xanthomonas*. First ed. London: Chapman & Hall. 399 p.
- Tushemereirwe, W., A. Kangire, F. Ssekiwoko, L. C. Offord, J. Crozier, E. Boa, M. Rutherford & J. J. Smith.** 2004. First report of *Xanthomonas campestris* pv. *musacearum* on banana in Uganda. *Plant Pathology* 53:802.
- Walcott, R.R., R. D. Gitaitis & A. C. Castro.** 2003. Role of blossoms in watermelon seed infestation by *Acidovorax avenae* subsp. *citrulli*. *Phytopathology* 93:528-534.

Recibido: febrero 16 de 2011.

Aceptado para su publicación: junio 1 de 2011.

# EL RUIDO VEHICULAR URBANO Y SU RELACIÓN CON MEDIDAS DE RESTRICCIÓN DEL FLUJO DE AUTOMÓVILES

Alberto Ramírez González<sup>1,2</sup>, Efraín Antonio Domínguez Calle<sup>3</sup>,  
Isabel Borrero Marulanda

## Resumen

**Ramírez González, A., E. A. Domínguez Calle, I. Borrero Marulanda:** El ruido vehicular urbano y su relación con medidas de restricción del flujo de automóviles. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (135): 143-156, 2011. ISSN 0370-3908.

En la ciudad de Bogotá se han venido implementando medidas progresivas de restricción vehicular y una nueva medida se tomó en enero de 2009 que prohibió la circulación del 40% de los vehículos particulares. Esta investigación evaluó los efectos de la misma y del  *día sin carro* , sobre el ruido vehicular en una de las vías más importantes de la ciudad. Los resultados mostraron que esta nueva medida no redujo el flujo de automóviles, ni tampoco el nivel de ruido vehicular, en tanto durante el día sin carro hubo mayor flujo de transporte público (buses y taxis) y, consecuentemente, niveles de ruido más altos, los cuales superan ampliamente las normas nacionales y pueden considerarse como problema de salubridad pública.

**Palabras clave:** ecología urbana, contaminación acústica, ruido vehicular, restricción vehicular.

## Abstract

Bogotá city traffic has been having progressive circulation constraint measures and a new determination was taken in January of 2009 which banned the mobilization of 40% of the private cars during working days. This research evaluated the traffic noise in one of the most important avenues of the city because of this measure and the  *no car day* . With the new restriction, neither vehicles nor traffic noise, showed decline, however, during the no car day there were more public vehicles (buses and cabs) and consequently, higher sound pressure levels, which are upper the norms and represent a healthiness public problem.

**Key words:** urban ecology, acoustic pollution, traffic noise, traffic restriction.

1 M. Sc. Investigación Doctoral, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Universidad Javeriana, Bogotá. Investigación adscrita al Centro de Excelencia en Investigación de Sistemas Complejos en Colombia, CeIBA - Complejidad.

2 M. Sc. Correo electrónico: alberto.ramirez@javeriana.edu.co. Trans. 4 No. 42-00. Piso 8. Tel: 3 20 83 20 Ext. 4824.

3 Ph.D. Correo electrónico: e.dominguez@javeriana.edu.co. Trans. 4 No. 42-00. Piso 8. Tel: 3 20 83 20 Ext. 4821.

## Introducción

La contaminación acústica se ha constituido en una problemática creciente que se expresa mayormente en los sistemas urbanos y cuya causa principal recae en el transporte vehicular (FHWA, 2004; Austroads, 2005; FTA, 2006). Ha sido objeto de estudio de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos desde hace ya tres décadas (EPA-U.S., 1974), cuando fundamentó las directrices de exposición al ruido sobre la base de protección del 96% de la población, y definió como parámetros admisibles niveles menores a 55 dBA en ambientes exteriores y a 45 dBA en interiores. Más recientemente, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1999), estableció límites de 30 a 35 dBA dentro de las viviendas y de 45 dBA en exteriores, como niveles de referencia para que no se presenten molestias o daños auditivos. No obstante, muchas de las legislaciones internacionales han acogido niveles exteriores entre 55 y 65 dBA para zonas residenciales.

El impacto ambiental más importante derivado de la contaminación auditiva recae en problemas de salud sobre la población, e incluye alteraciones fisiológicas y psicológicas cuya gravedad depende de los niveles y la extensión de la exposición. Comprende, además de impedimentos auditivos, incremento de la presión sanguínea y de los latidos del corazón, vasoconstricción, cambios en respiración, arritmia cardiaca, hipertensión, isquemia cardiaca, resistencia vascular periférica, cambios en la viscosidad de la sangre y de los lípidos, cambios en el balance electrolítico y cambios hormonales, principalmente. Al mismo tiempo, es causa de muchos desórdenes psicológicos como molestia, ansiedad, estrés, agresividad, náuseas, dolor de cabeza, inestabilidad, pérdida argumentativa, cambios de humor, incremento de conflictos sociales, irritabilidad, depresión, neurosis, psicosis e histeria. Genera impedimentos de desempeño como interferencia en la comunicación, cansancio, dificultad para dormir, reducción de las capacidades de atención, motivación, memoria, lectura y solución de tareas cognitivas, entre otras (OMS, 1999).

La magnitud del problema de salubridad queda reflejado en las siguientes cifras: en Estados Unidos 59 millones de habitantes soporta niveles de ruido vehicular de 60 dBA o más (EPA-US, 1978). En Europa se estima que 80 millones de personas viven expuestas a ruidos mayores a 65 dBA (áreas negras) y 170 millones viven entre 55 y 65 dBA (áreas grises) (EC, 1996). Cerca del 40% de la población que hace parte de la Comunidad Europea, está expuesta a ruidos

diurnos provenientes del tráfico vehicular que exceden 55 dBA y 20% a niveles que exceden 65 dBA (OMS, 1999). En China, por su parte, el 71.4% de las ciudades con más de 1 millón de habitantes, están expuestas a niveles de ruido sobre 70 dBA, y el 67% de las zonas residenciales están por encima de los estándares permitidos, proviniendo el 61% del ruido de fuentes vehiculares (Li y Tao, 2004).

Los altos niveles de ruido generan además impactos económicos monumentales, es así como en Estados Unidos los costos por salud y pérdida de productividad, alcanzan entre el 0.2 y el 2% del producto doméstico bruto (Bolund y Hunhammar, 1999), mientras que en la Unión Europea se sitúan entre \$ 13 y \$ 38 billones de euros (COM, 2000). De igual modo, para 1995 se estimaron pérdidas económicas anuales de US\$ 2.5 billones de dólares en China, a causa de este contaminante (Li y Tao, 2004). En el Reino Unido los costos derivados de problemas en el transporte representan entre \$ 10.9 y \$ 20.5 billones de libras anualmente (Poole, 1998). Otro problema económico derivado del ruido vehicular se refiere a la desvalorización de las propiedades tal y como lo demostraron estudios desarrollados por la Danish Environmental Protection Agency que encontraron que las viviendas expuestas a vías con ruidos de más de 55 dBA, pierden 1.6% de su valor por cada decibel de más que reciben (EC, 2006). Así mismo, en Seúl se encontró que por un incremento de 1% en el ruido, se deprecian en 1.3% las propiedades próximas a las vías importantes (Kim *et al.*, 2007). Estos resultados sugieren que en el marco de toda la malla vial de una ciudad, los costos de depreciación pueden representar de centenares a miles de millones de dólares.

La ciudad de Bogotá ha experimentado en los últimos años un crecimiento acelerado en el número de vehículos privados y de servicio público, situación que ha puesto al tráfico en condiciones de embotellamiento y obstrucción permanente, generando serios problemas de movilidad y contaminación para sus ciudadanos. A lo anterior se añade un alto deterioro de la malla vial, presencia de obras permanentes sobre las vías y una inadecuada semaforización<sup>4</sup>, entre otras. Para afrontar tal problemática en el año 2000 se inauguró un sistema de metro-bus o Transmilenio, que cuenta con vías exclusivas que le dan una eficiencia muy alta en movilidad de pasajeros respecto al sistema tradicional de buses. Este sistema, sin embargo, tiene aún muy baja cobertura y cuenta tan sólo con dos ejes viales norte-sur y dos oriente-occidente, por lo que el 75% de los viajes de la ciudad se realizan por el sistema de buses tradicional (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2006). Vale

4 Informe de la Contraloría de Bogotá. 2008.

destacar que la puesta en marcha del sistema Transmilenio, llevó a que el parque de buses que operaba en dichos trayectos conformado por un parque automotor de hasta 2 y 3 décadas de servicio y que genera alta contaminación atmosférica y acústica, se reubicó en otras vías de la ciudad, incrementando profundamente la sobreoferta del servicio y de paso los embotellamientos, la contaminación y los problemas de movilidad.

Los problemas de transporte empezaron a ser abordados con restricciones de flujo a los vehículos particulares en 1998 (medida llamada *pico y placa*) de 7:00 a.m. a 9:00 a.m. y de 5:30 p.m. a 7:30 p.m. para matrículas terminadas en 4 dígitos distintos durante dos días a la semana; se incrementó en 30 minutos en el 2002 (desde las 6:30 a.m.) y pasó en el 2004 a 6 horas diarias (6:00 a.m. a 9:00 a.m. y 4:00 p.m. a 7:00 p.m.). De igual modo, esta medida se instauró para el transporte público (buses y taxis) en el 2001 con 2 días a la semana de 5:30 a.m. a 9:00 p.m. para matrículas terminadas en 2 dígitos diferentes. Adicionalmente, en el 2006 surgió un pico y placa ambiental para todos los buses que no cumplieren con normas de emisión, que implica inmovilidad de 6:00 a.m. a 10:00 a.m. (4 horas) de lunes a sábado para un dígito por día y cuyo propósito fue mejorar la calidad del aire de la ciudad. En este mismo año se implantó el pico y placa ambiental para camiones de más de 5 toneladas, los cuales no pueden transitar entre las 6:30 a.m. y las 10:00 a.m..

Vale añadir, que en la ciudad desde el año 2000 se instauró una norma que prohíbe el tránsito de vehículos particulares un día al año “día sin carro”, la cual a la fecha se aplica dos días al año y cuyo propósito fue de tipo ambiental.

Con el crecimiento poblacional y vehicular de los últimos años, estas medidas se tornaron insuficientes por lo que el 24 de enero de 2009, el Alcalde de Bogotá decidió implementar dos nuevas normas a iniciar el 6 de febrero y que incluyeron: 1. Ampliar la restricción de movilidad de los vehículos particulares a todo el día (6 a.m. a 8 p.m.) y, 2. Eliminar las restricciones de movilidad para los buses en las horas pico. Un día antes de entrar en vigencia esta nueva medida, el Alcalde pospuso la entrada en vigencia de la segunda norma. Este estudio se propuso evaluar entonces, los efectos del *pico y placa ampliado* y del *día sin carro*, en la contaminación auditiva de una de las vías más importantes de la ciudad.

## Metodología

En el marco de una investigación doctoral que se lleva a cabo en la Facultad de Estudios Ambientales y Rurales

de la Universidad Javeriana de Bogotá, los autores realizaron mediciones de ruido vehicular sobre la Carrera Séptima con calle 42, vía de gran importancia para la movilidad ciudadana en el eje norte - sur, y que es compartida por centenares de rutas de buses, taxis, autos, motocicletas y en una baja cuantía por camiones de reparto (figura 1).

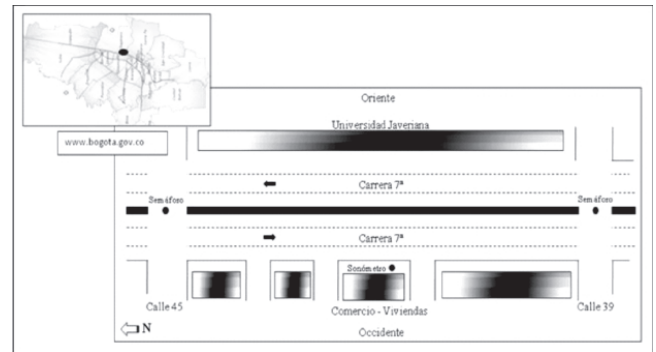


Figura 1. Diagrama del área de estudio.

El diseño de muestreo pretendió comparar los niveles de ruido existentes (*pico y placa*), con los del *día sin carro* y con los del *pico y placa ampliado*. Para ello se tomaron 4 muestras de 10 minutos de duración durante cada hora entre las 7:00 a.m. y las 11:00 a.m. para un total de 16 muestras por día, las cuales se repitieron durante los 5 días laborales de la semana durante el pico y placa (enero 28 a febrero 3 de 2009) y el pico y placa ampliado (16 a 20 de febrero). Un diseño similar pero restringido a un único día (febrero 5) se llevó a cabo para el día sin carro (figura 2).

El estudio implicó, por un lado, mediciones de ruido vehicular y por el otro de tráfico. Las primeras se llevaron



Figura 2. Metodología de investigación empleada.

a cabo manualmente sobre la calzada occidental con un sonómetro Extech 407780 tipo II, con ponderaciones *A* y *lento*, a 1.2 m de altura, a 3 m de la vía y retirado 4 m de la fachada más próxima; las mismas se hicieron en días sin lluvia y con pavimento seco. Las variables acústicas incluyeron el nivel de presión sonora continuo equivalente de cada muestra ( $L_{Aeq}$ ), junto con los 600 registros instantáneos de un segundo para cada muestra, el nivel máximo ( $L_{máx}$ ), el nivel mínimo ( $L_{mín}$ ) y los percentiles  $L_{(1)}$  a  $L_{(99)}$ .

Las mediciones de tráfico involucraron el conteo manual en los 6 carriles que hacen parte de esta vía (3 de sentido norte-sur y 3 sur-norte), de motocicletas, buses (incluidas en esta categoría busetas y microbuses de servicio público), automóviles (incluidos taxis, vehículos particulares y camionetas privadas de reparto) y camiones (de más de 3-4 ton.). Las mediciones de unas y otras variables se llevaron a cabo en un punto único de estudio sobre la calle 42, el cual se considera representativo, por la homogeneidad de su tráfico, de un trayecto mayor comprendido entre las calles 32 a 60. Dicho punto se ubicó a 400 m del semáforo de la calle 39 y a 250 m del de la calle 45. Esta vía se encuentra pavimentada y carece de pendiente (Fotos 1 y 2) y como parámetros de control climático se midieron la temperatura (°C), la humedad relativa (%) y la velocidad máxima (Km/h) y dirección del viento durante un minuto previo a cada muestra, con equipos Extech de campo.

La información recabada se analizó así: 1. Para comparar promedios se emplearon pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) y homoscedasticidad (Levene), encontrándose para numerosas muestras no normalidad y heteroscedasticidad, incluso ante el empleo de transformaciones logarítmicas, por lo que se acudió a las pruebas no paramétricas de comparación de medianas (Kruskal-Wallis

y Steel-Dwass) (Zar, 1984; Sokal y Rohlf, 2000; Sheskin, 2003). 2. Para relacionar las diferentes variables del ruido, por un lado, y del tráfico por otro, se efectuaron análisis de correlación de Pearson y se validaron las relaciones con un 95% de confianza; además de realizarse análisis de componentes principales por covarianzas (Kendall, 1975; Chatterjee y Price, 1977; Drapper y Smith, 1981; Johnson y Wichern, 1982). 3. Para interrelacionar las variables de tráfico (independientes) y de ruido (dependientes) se realizaron tanto análisis de regresión lineal (Arana y García, 2001; Barrigón-Morillas *et al.*, 2002), como de correlación canónica entre el conjunto de variables. 4. Para estudiar la molestia del ruido en la población expuesta se calcularon el Traffic Noise Index (TNI, Eq. 1; Griffiths y Langdon, 1968) y el Noise Pollution Index (Pn, Eq. 2; Guoxia *et al.*, 2006).

$$TNI = 4 \times (L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30 \text{ dB} \quad (1)$$

$$Pn = L_{Aeq}/L_b \quad (2)$$

Donde:

$L_{10}$  y  $L_{90}$  son los percentiles 10 y 90 en su orden.

$L_b$  es un factor de referencia de 75 dBA para *alta molestia* en exteriores.

El análisis de información se efectuó con ayuda de diversos programas de computador como SPSS (v.15), Minitab (v.15), Excel (2007) y Kyplot (v.2.0).

## Resultados

En relación con los registros climáticos en el transcurso de las 7:00 a.m. a las 10:00 a.m., la temperatura media se incrementó de 14.4 a 22.9°C, la humedad relativa decreció de 60.4% a 41.5% y la velocidad máxima del viento se



Fotos 1 y 2. Flujo vehicular sur-norte (izquierda) y norte-sur (derecha) en la carrera séptima.

incrementó de 3.9 a 7.8 km/h. Se observó, además, relación exponencial significativa entre la humedad y la temperatura con  $r^2 = 0.85$ .

### Flujo vehicular

El flujo de buses mostró un comportamiento semejante entre el pico y placa y el pico y placa ampliado, ya que cabe recordar que no entró en vigencia la medida de liberación de este tipo de vehículos entre las 6:00 a.m. y las 9:00 a.m.. No obstante, el flujo muestra un incremento significativo ( $p < 0.05$ ) durante el día sin carro en todas las horas, lo que denota que la medida ambiental sustentada en la reducción vehicular, no tiene efecto en este tipo de vehículos, en esta vía (figura 3). Por otro lado, se observa reducción del flujo de buses hacia el final de la mañana lo que indica que parte del parque automotor no circula o tiene una tasa de viajes menor a dichas horas.

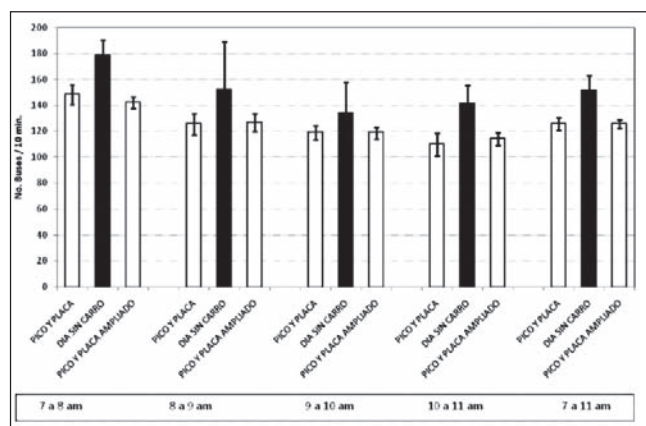


Figura 3. Flujo de transporte público e intervalo de confianza (barra oscura:  $p < 0.05$ ).

Respecto al flujo de automóviles, éste muestra promedios similares en casi todas las condiciones estudiadas, si bien de 8:00 a 9:00 a.m. y en el agregado de 7:00 a 11:00 a.m., indica aumento durante el día sin carro y con pico y placa ampliado, respecto al pico y placa previo (figura 4). Si bien este resultado parece inusitado en virtud al menor número de vehículos particulares circulando por la ciudad en los dos primeros casos referidos, se explica por una saturación de la vía por parte de los taxis durante el día sin carro (incremento del 57% respecto a los otros días). Estos resultados indican, que a pesar de la nueva medida, el flujo vehicular se ha mantenido o incluso ha aumentado en esta vía. De otro lado, y al igual a lo observado en los buses, se presenta reducción del flujo en horas avanzadas de la mañana.

En otro orden de ideas, en el análisis de correlaciones se encontró relación directa entre el flujo de buses y el de

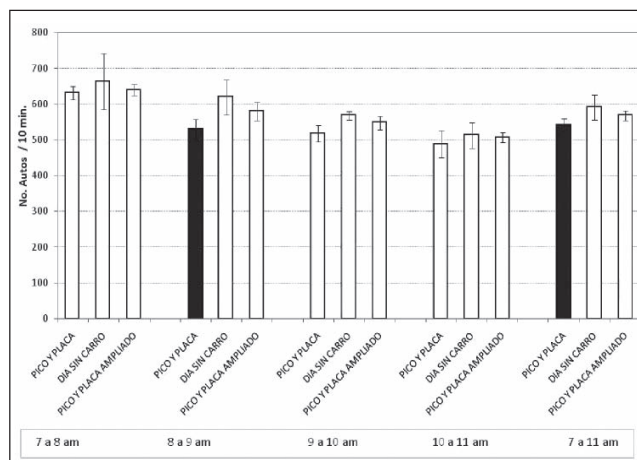


Figura 4. Flujo de automóviles e intervalo de confianza (barra oscura:  $p < 0,05$ ).

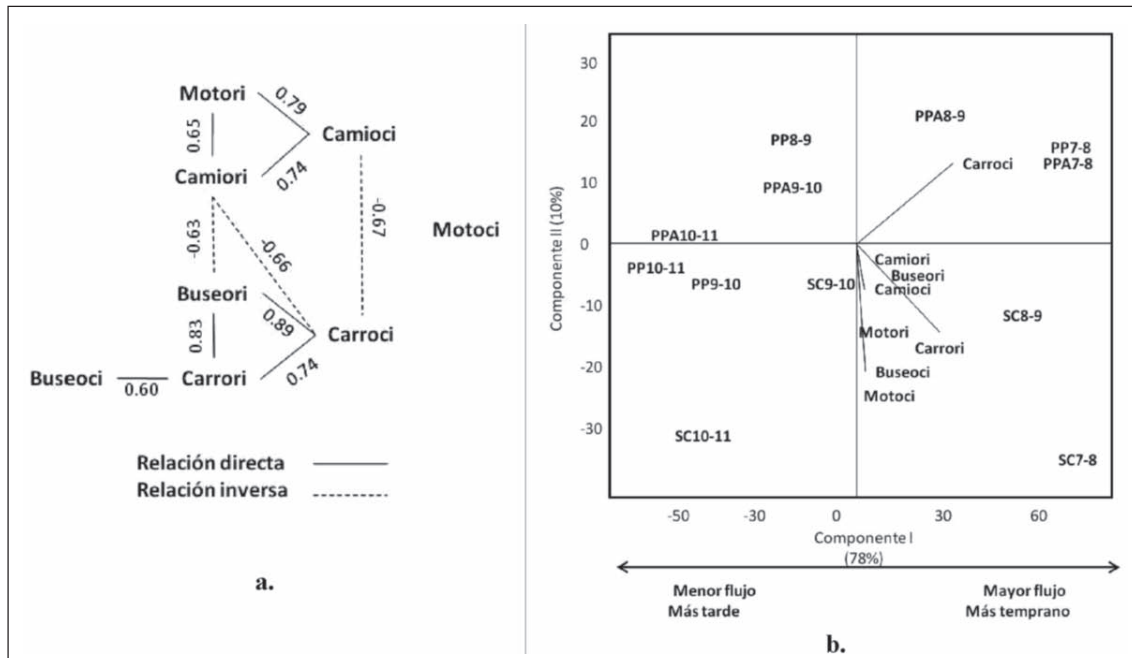
carros por un lado, y el de motos y camiones por el otro; ello se debe a que la participación de los últimos se incrementa de 9:00 a 11:00 a.m., cuando cabe recordar, se reducen los flujos de buses y carros (figura 5a). Los componentes principales por su parte, capitalizan el 88% de la varianza en los dos primeros ejes de ordenación, y desagregan sobre los valores positivos del primer componente, las horas de mayor flujo que corresponden a los horarios de 7:00 a 9:00 a.m.; y, como es de esperar, sobre los valores negativos prevalece el horario de 9:00 a 11:00 a.m., con menor flujo vehicular. Sobre este primer eje se destaca el mayor aporte del flujo de carros, variable que muestra los registros más elevados (figura 5b). El segundo eje, por su parte, desagrega parcialmente las mediciones del día sin carro (valores negativos) de las restantes (positivos), y ello se explica en el mayor rol del flujo de carros del costado occidental durante los últimos.

### Nivel de presión sonora

Cabe destacar, como primera media, que en los registros de ruido jugaron un papel ínfimo las bocinas, las sirenas (4 en total) y las alarmas (1), por lo que prácticamente todo el ruido vehicular medido se origina en el desplazamiento automotor y en los procesos de aceleración-desaceleración propios de la detención y arranque de los vehículos, situación esta última que tuvo lugar por el semáforo de la calle 45 y el represamiento que ocasiona hasta la calle 42 sobre el carril sur-norte.

De los 105600 registros instantáneos medidos, el 97.7% se encuentran sobre 70 dBA, el 83.7% sobre 75 dBA y el 46.3% sobre 80 dBA, registros que denotan claramente la grave problemática de contaminación acústica generada



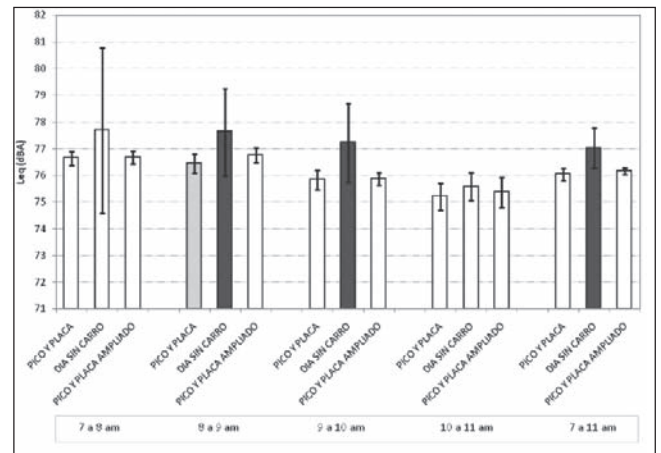


**Figura 5. a.** Coeficientes de correlación significativos para la composición vehicular ( $p < 0.05$ ). **b.** Análisis de componentes principales de 7 a 11 de la mañana, con pico y placa (PP), día sin carro (SC) y pico y placa ampliado (PPA); carril oriental (ori) y occidental (oci).

sobre esta importante avenida y la población local, y que incluye un copioso número de residencias y locales comerciales, así como la presencia de universidades y otras instituciones. Los valores individuales máximos alcanzaron entre 100 y 102 dBA en tres oportunidades y estuvieron asociados a sirenas de ambulancias. Por lo demás, los valores más altos provinieron en su casi totalidad del paso de buses y busetas, y ocasionalmente de algún camión o motocicleta.

Los niveles de presión sonora equivalente muestran resultados próximos con pico y placa y pico y placa ampliado, hecho que se explica en la constancia mostrada por el flujo vehicular en esta avenida (figura 6). Una prueba adicional de comparación de medianas entre los días de la semana resultó no significativa tanto para el pico y placa ( $p = 0.44$ ) como el pico y placa ampliado ( $p = 0.38$ ) lo que indica que los niveles de ruido son similares durante los distintos días hábiles de la semana. No obstante, el ruido es mayor a inicios de la mañana y se reduce levemente hacia el final de la misma.

Para el día sin carro, por el contrario, y en consonancia con lo sucedido en el flujo de buses y automóviles, se incrementó el ruido vehicular ( $p < 0.05$ ), resultado paradójico tratándose de un día ambiental en la ciudad. Vale notar



**Figura 6.** Niveles de presión sonora equivalente ( $L_{Aeq}$ ) e intervalos de confianza (barras oscuras:  $p < 0.05$ ).

que la menor cantidad de registros tomados durante el día sin carro (1 día frente a 5) se refleja en sus mayores intervalos de confianza tal y como se observa en la figura 6, situación que incrementa la probabilidad de cometer errores tipo II, al no rechazar hipótesis nulas que podrían ser falsas, como podría ocurrir durante el día sin carro en el horario de 7:00 a 8:00 a.m..

Los resultados anteriores claramente señalan que la medida de restricción vehicular para toda la ciudad, no cobra efecto como medida de mayor movilidad, ni como medida ambiental sobre la vía estudiada.

La diferencia esencial del día sin carro en el nivel de presión sonora, recae en que exhibe un porcentaje menor de valores en la clase de 75 dBA, pero mayor en las clases de 80 y 85 dBA, las cuales son propias del paso simultáneo de buses-busetas y del arranque-detención de este tipo de vehículos (figura 7).

El análisis de correlaciones entre distintas medidas de presión sonora, muestra la presencia de diversas relaciones significativas que incluyen a los percentiles  $L_{(1)}$ ,  $L_{(10)}$ ,  $L_{(50)}$ , junto con  $L_{máx}$ ,  $L_{Aeq}$  y SEL, los dos últimos con correlación igual a 0.999 (figura 8a). Este resultado nos indica simplemente, que el incremento del ruido incide directamente sobre todos los descriptores citados. Por otro lado, se observa correlación significativa entre el nivel mínimo  $L_{mín}$  y el percentil  $L_{90}$ , este último denominado comúnmente como ruido de fondo y corresponde al nivel de presión sonora que es superado en el 90% de las mediciones; la relación entre estos descriptores es apenas obvia en tanto los dos señalan precisamente los momentos de menor ruido.

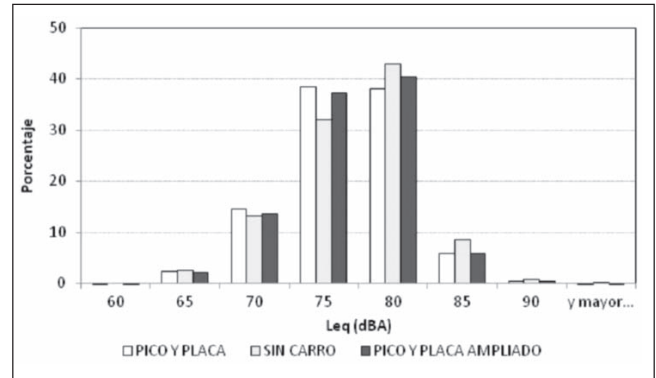


Figura 7. Histograma para los niveles de presión sonora  $L_{Aeq}$ .

El análisis de componentes principales, por su parte, logra explicar el 93% de la varianza en los dos primeros componentes y disocia, sobre el primer eje, las muestras con menores niveles de ruido que corresponden al final de la mañana (9:00 a 11:00 a.m., valores positivos), de las de mayor ruido que ocurren principalmente durante el día sin carro (negativos). Así mismo, el segundo eje disocia a las muestras con menores niveles de  $L_{mín}$  y  $L_{(90)}$  (valores positivos), destacándose entre ellas las muestras del horario de 7:00 a 8:00 a.m. (figura 8b).

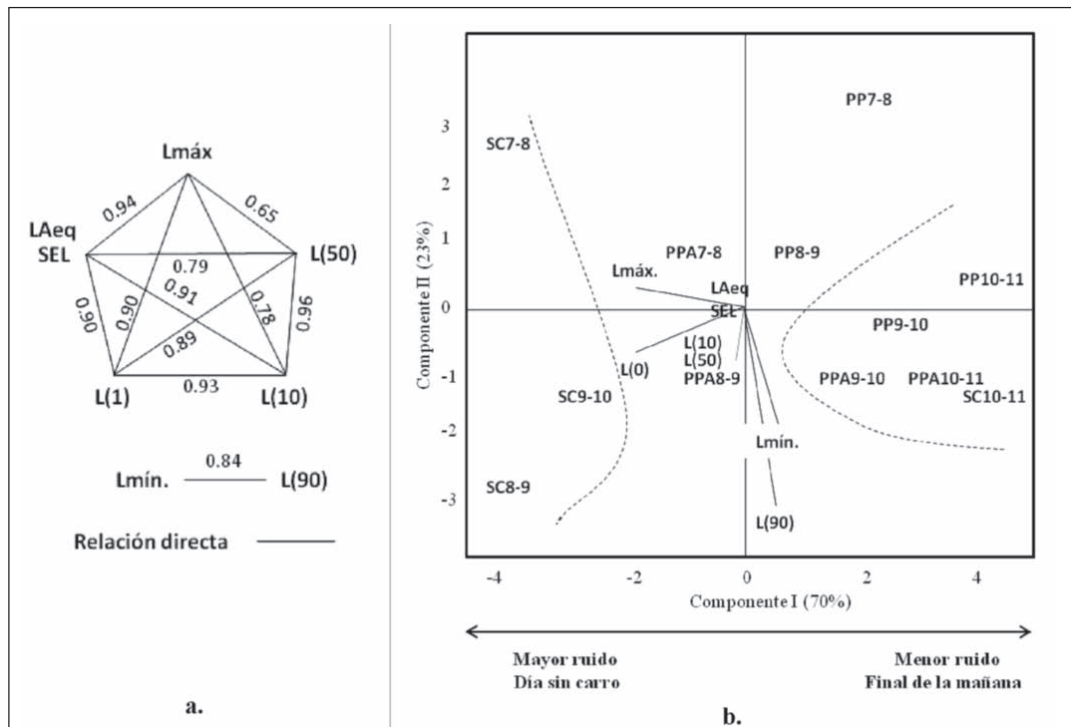


Figura 8. a. Coeficientes de correlación significativos para los descriptores de presión sonora ( $p < 0.05$ ). b. Análisis de componentes principales de 7 a 11 de la mañana, con pico y placa (PP), día sin carro (SC) y pico y placa ampliado (PPA).

Respecto a los niveles de molestia sobre la población, se exponen en la tabla 1 los índices de ruido vehicular (TNI) y de polución por ruido (Pn), para las distintas horas de la mañana y para las diferentes medidas de tráfico. En lo atinente al TNI y siguiendo a Griffiths y Langdon (1968) en el marco de las relaciones dosis-respuesta, el umbral de molestia para el 50% de la población es de 74 dBA y para el 75% de 90 dBA. Se observa en los resultados de este estudio, que la totalidad de los indicadores supera los 74 dBA, en tanto un único registro hace lo propio con 90 dBA el cual ocurrió durante el día sin carro y en el horario más temprano. Por su parte, y de acuerdo con Guoxia et al., (2006), los valores de Pn superiores a 1 son indicativos de niveles de “alta molestia” y dicha situación ocurre en todos los registros, mostrando el día sin carro los mayores indicadores.

Tabla 1. Índices de molestia por ruido vehicular.

Hora	Pico y placa	Día sin carro	Pico y placa ampliado
<b>TNI</b>			
7 a 8 a.m.	88.1	92.9	85.6
8 a 9 a.m.	79.3	82.0	80.9
9 a 10 a.m.	76.6	82.6	78.7
10 a 11 a.m.	74.7	77.5	74.6
<b>Pn</b>			
7 a 8 a.m.	1.02	1.04	1.02
8 a 9 a.m.	1.02	1.04	1.02
9 a 10 a.m.	1.01	1.03	1.01
10 a 11 a.m.	1.00	1.01	1.00

**Relación flujo vehicular y nivel de presión sonora**

Con el propósito de evaluar la relación entre el flujo vehicular y el nivel de ruido, se efectuaron análisis de regresión lineal entre el flujo total y de cada tipo de vehículo (promedio de las 4 muestras con transformación logarítmica -Log<sub>10</sub>- estandarizados a flujo por hora), con los descriptores de presión sonora L<sub>Aeq</sub> y L<sub>min</sub> que como se observó en la figura 8a, no están correlacionados entre sí. Los resultados mostraron relaciones significativas de interés entre el nivel de ruido equivalente y los flujos de carros, buses y total (figuras 9 a 11), mientras que los flujos de motocicletas y camiones mostraron poca incidencia sobre este descriptor (Tabla 2). Contrariamente, el flujo de motos expuso relación significativa con el nivel mínimo L<sub>min</sub>, aunque el coeficiente de determinación no fue relevante (r<sup>2</sup> = 0.14).

Vale notar, que durante las primeras horas de la mañana se obtienen los niveles equivalentes de ruido más elevados,

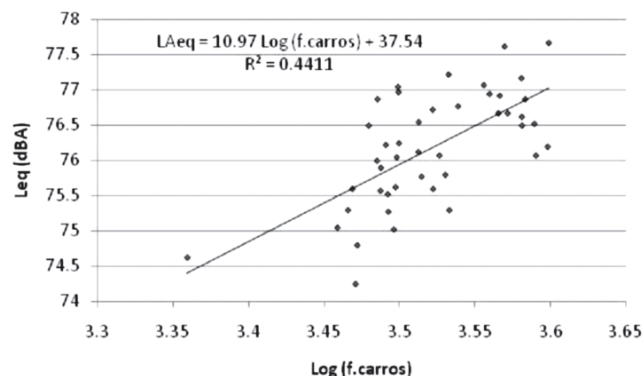


Figura 9. Relación entre el flujo de carros (Log) y L<sub>Aeq</sub>.

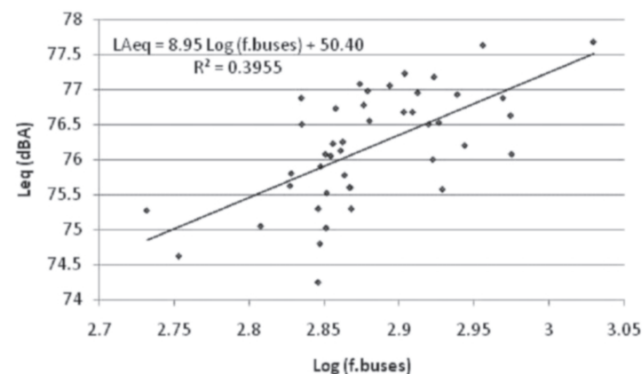


Figura 10. Relación entre el flujo de buses (Log) y L<sub>Aeq</sub>.

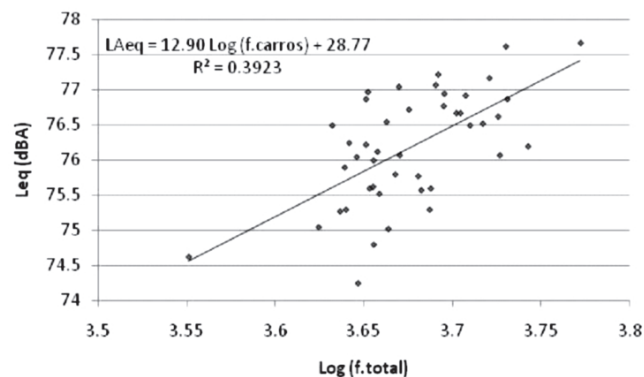


Figura 11. Relación entre el flujo total y L<sub>Aeq</sub>.

Tabla 2. Coeficientes de determinación entre el flujo vehicular y el nivel de presión sonora.

Descriptor	Flujo	R <sup>2</sup>	Descriptor	Flujo	R <sup>2</sup>
L <sub>Aeq</sub>	Motos	0.10	L <sub>min</sub>	Motos	0.14
	Camiones	0.16		Camiones	NS
	Carros	0.44		Carros	NS
	Buses	0.40		Buses	NS
	Total	0.39		Total	NS

NS: No significativa al 95% de confianza. N = 44.

pero también, los niveles instantáneos de ruido más bajos  $L_{\min}$  y  $L_{(90)}$ , situación que ocurre por un comportamiento cíclico del ruido a causa del semáforo de la calle 45 que genera, por un lado, detención total del tráfico en el costado sur-norte por algunos momentos y, por el otro, mínimo flujo en el sentido norte-sur cuando la luz está roja. Es precisamente por esta razón, que se observan relaciones directas significativas entre el  $L_{\min}$  y el flujo de motocicletas, lo cual indica que los  $L_{\min}$  más altos ocurren a finales de la mañana cuando el flujo de este tipo de vehículos se torna más importante y continuo.

La mayor importancia del flujo de carros sobre el de buses en la relación con el  $L_{Aeq}$ , puede explicarse en que el valor medio del primero alcanza 3348 veh/hora frente a 768 buses/hora, lo que señala que el primero es 4.4 veces mayor que el segundo. Adicionalmente, la categoría de buses incluye una variedad diversa de vehículos como buses, busetas y microbuses, cuya incidencia en los niveles de ruido resulta muy variable. Soportan también los resultados encontrados, los menores flujos de motocicletas y camiones con 627 y 28 veh/hora en su orden.

Vale notar que se observa una correlación directa importante entre el flujo de carros y el de buses ( $r = 0.784$ ), la cual genera problemas de colinealidad en el análisis de regresión lineal multivariado. Para sobrellevar tal problema, se realizó un análisis de componentes principales con las variables de flujo vehicular, y los dos primeros ejes de ordenación resultantes se relacionaron mediante análisis de regresión con los descriptores  $L_{Aeq}$  y  $L_{\min}$  (Drapper y Smith, 1981). Este procedimiento, sin embargo, no incrementó los coeficientes de determinación entre los flujos y los descriptores de ruido.

Los análisis previamente expuestos reflejan alta congruencia con los resultados del análisis de correlación canónica llevado a cabo con los flujos y con los descriptores de presión sonora; el mismo señala que los flujos de autos, buses y total, se asocian con el  $L_{Aeq}$ , mientras que los flujos de camiones y motos hace lo propio con el  $L_{\min}$  (figura 12).

### Análisis

Los problemas de contaminación acústica derivados de los vehículos en ambientes urbanos, si bien no excluyen a ciudades de países desarrollados, son cada día más apremiantes en ciudades del tercer mundo, por el desconocimiento y bajo interés de la administración pública ante esta problemática. Algunas cifras de ruido vehicular obtenidas en distintas ciudades del mundo destacan la magnitud del problema: Pamplona, 60 a 75 dBA; Valencia, promedios superiores a 65 dBA y casi siempre a 70 dBA

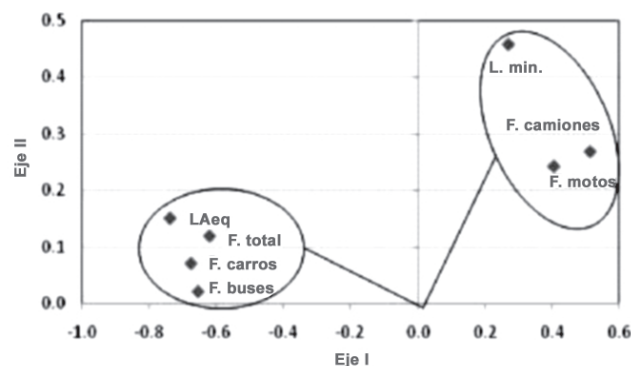


Figura 12. Resultados del análisis de correlación canónica.

(Gaja *et al.*, 2003); Cáceres, 70 dBA con el 88% de las mediciones sobre 66 dBA (Barrigón-Morillas *et al.*, 2002); Teherán, 35% de los registros por encima de 70 dBA (Alimohammadi *et al.*, 2005); Jalgaon,  $87.9 \pm 5$  dBA (Ingle *et al.*, 2005); El Cairo, niveles medios por encima de 80 dBA (Ali y Tamura, 2003); Assiut, niveles medios superiores a 80 dBA; Beijing, nivel promedio de 75.6 dBA (Li *et al.*, 2002; Li y Tao, 2004); Lanzhou, nivel promedio de 69.3 dBA (Guoxia *et al.*, 2006).

La situación no es muy disímil en Latinoamérica tal y como lo evidencian los siguientes estudios: Ciudad de Panamá, el 75% de los registros máximos están por encima de 100 dBA (Corrales y Henríquez, 2007); Curitiba, el 93.3% de los sitios evaluados exhiben niveles mayores a 65 dBA durante el día, 80.6% a 70 dBA y 40.3% a 75 dBA (Trombetta *et al.*, 2002); La Plata, algunos vehículos producen ruidos entre 60 y 80 dBA, y constituyen el 80% del ruido de la ciudad (Rivera y Guerry, 2008). Colombia no es ajena a tal problemática tal y como lo reseña una recopilación de estudios del IDEAM (2006), donde se destaca al ruido vehicular como la principal fuente emisora y para el horario diurno se tienen los siguientes registros: Medellín: entre 66.8 y 75 dBA; Cali: 71.7 dBA; Bucaramanga, registros mayores a 75 dBA; San Juan de Pasto, entre 69 y 85 dBA; Tunja, entre 76 y 101 dBA; Tuluá, entre 66.9 y 76.7 dBA; Riohacha, entre 66 y 71 dBA.

Estudios audiométricos en policías de tráfico y trabajadores urbanos en Sao Paulo, mostraron pérdida auditiva en el 28.5% de los estudiados (Melo-Barbosa y Alves-Cardoso, 2005) y resultados similares se obtuvieron en Jalgaon (India), donde se encontraron impedimentos auditivos en los policías de tránsito (Ingle *et al.*, 2005). En Bogotá en la localidad de Puente Aranda, se encontraron niveles de ruido que oscilan entre 76.3 y 84.3 dBA, y sobre 1080 encuestas a los residentes de la localidad, el 42%

describió molestias por el ruido y señalaron efectos negativos en: salud (16%), dolor de cabeza (12%), irritación (12%), interferencia al hablar (12%), problemas al trabajar (9%), dificultad al dormir (8%), desconcentración (10%), intranquilidad (8%) y otras alteraciones (6%). Así mismo, el estudio audiométrico practicado a una muestra de 1347 personas de la localidad, reveló que el 49% de los individuos exhibe un descenso auditivo en las frecuencias agudas de 3000, 4000 y 6000 Hz (Sandoval, 2000).

De manera general, el nivel de ruido encontrado en este estudio sobre la Carrera Séptima puede considerarse como muy alto, y su condición denota desde la USEPA y la Organización Mundial de la Salud, una situación de salubridad pública. Acentúa la problemática el que tales niveles ocurren en un área eminentemente residencial, en mixtura con centros educativos y con comercio en la primera planta de las edificaciones. Respecto a la normativa nacional más reciente, Resolución 0627 (MAVDT, 2006), ésta expone para horarios diurnos en zonas residenciales, institucionales, de hoteles, oficinas y centros de estudio 65 dBA y para comerciales 70 dBA. Tal normativa, sin embargo, y en contravía con las normativas mundiales, incluye al ruido vehicular como *ruido ambiental* y permite hasta 80 dBA, normativa que resulta contradictoria pues las vías colindan con las edificaciones y constituyen la principal causa de ruido urbano ambiental; a la vez, puede considerarse como laxa y como conveniente para una autoridad ambiental que no expresa ningún interés en abordar esta problemática ambiental. Aun bajo las directrices de dicha norma, cerca de la mitad de los niveles de presión sonora instantáneos estuvieron por encima de ella (46% de los registros resultó mayor a 80 dBA).

Adicionalmente, bajo la clasificación propuesta por Lebedowska (2005) fundamentada en el incremento que ocasiona el ruido vehicular respecto al ambiental, el área estudiada se considera como *muy ruidosa*.

Hay que destacar que la mayor parte de las edificaciones se encuentran a tan sólo un par de metros de la vía, por lo que los niveles de ruido experimentan una atenuación mínima por efecto de distancia lo que indica que reciben altos niveles de contaminación. La ausencia del Gobierno local ante esta problemática, conlleva a que los propietarios de los inmuebles tengan, como única opción, que realizar gastos importantes de insonorización, acción que por un lado, no está al alcance de la mayor parte de la población y, por el otro, no resuelve el problema urbano de contaminación acústica, el cual se mantiene para transeúntes, peatones y usuarios del espacio público.

Los resultados arrojados por los índices de ruido vehicular y contaminación por ruido (TNI y Pn), respaldan

ampliamente lo dicho, pues el primero supera en todos los casos los niveles de molestia para el 50% de la población, en tanto el segundo denota también para todas las mediciones, niveles de alta molestia.

Tal y como lo demuestra el estudio, tales niveles obedecen en esencia, al flujo de autos y buses, los primeros por su alto volumen y con predominio de taxis, y los segundos por su alta generación de ruido individual, condición esta última propia de un parque vehicular viejo que aún transita por la ciudad, gracias a la falta de voluntad política de la administración pública para resolver los problemas de contaminación auditiva y atmosférica.

La contaminación acústica en los diferentes países muestra como eje medular común, al ruido vehicular como la principal fuente emisora y, en particular, su relación más estrecha se encuentra con el flujo, la proporción de vehículos pesados y la velocidad (FHWA, 2004; Austroads, 2005; FTA, 2006). Diversos estudios han ampliamente demostrado la relación entre el flujo vehicular (Q) y el nivel de presión sonora continuo equivalente, destacando entre ellos los de Arana y García (2001) y Barrigón-Morillas *et al.* (2002) quienes sobre una recopilación de estudios encuentran correlaciones que oscilan entre 0.73 y 0.98 con los siguientes rangos para dichos coeficientes:

$$L_{Aeq} = 45.8 a 51,0 + 7.2 a 9.8 \text{ Log } Q \quad (3)$$

De igual modo, el modelo inglés CoRTN (Calculation of road traffic noise) que trabaja sobre la base del percentil 10 (a 10 m de distancia y 0.5 m de altura), una vez es llevado a  $L_{Aeq,1h}$  para flujos de más de 200 autos por hora, se traduce en una ecuación cercana a la previa (Abbott y Nelson, 2002; Abbott y Stephenson, 2006):

$$L_{Aeq,1h} = 40.8 + 9.4 \text{ Log } Q \quad (4)$$

Las ecuaciones estimadas en este estudio muestran parámetros cercanos a los anteriores, si bien exponen coeficientes de correlación menores (0.63 a 0.66), los cuales se atribuyen a la gran variabilidad en las emisiones de cada tipo de vehículos, a que se trata de una vía con 6 carriles que por ende expresan distintas atenuaciones con la distancia al sonómetro, a los ciclos de detención y arranque ligados a la semaforización, a la alta variabilidad en la velocidad vehicular que oscila entre 0 y 80 Km/h y a los cambios en la composición vehicular que tienen lugar durante las horas de la mañana. Las ecuaciones estimadas para este estudio se encuentran en los siguientes rangos:

$$L_{Aeq} = 29 a 50 + 8.9 a 12.9 \text{ Log } Q \quad (5)$$

Se aprecia respecto a las anteriores, una mayor pendiente que permite suponer un mayor nivel de ruido indivi-

dual en los vehículos. Respecto a los niveles mínimos de ruido  $L_{\min}$ , el rango de mediciones estuvo entre 57.1 dBA y 67.7 dBA, cuantías que superan por sí mismas las normativas de la **EPA-US** (1974) y la **OMS** (1999), y trasgreden parcialmente los 65 dBA de la norma nacional para ambientes exteriores. Estos niveles de ruido ocurren durante la detención del flujo vehicular a causa del semáforo de la calle 45. En lo concerniente con los niveles máximos de ruido de buses y busetas, predominan niveles entre 74 y 84 dBA a una velocidad media de 30 Km/h, los cuales pueden ser considerados como muy altos y constituyen una de las causas principales de la problemática de contaminación acústica.

Análisis de sensibilidad sobre el flujo vehicular realizados en Teherán, muestran que si esta variable aumenta de 150 veh/h a 600 veh/h, el nivel del ruido se incrementa apreciablemente, pero después de 3500 veh/h se mantiene casi lineal (**Alimohammadi et al.**, 2005). Iguales resultados encontró **Guoxia et al.** (2006) en la ciudad de Lanzhou, con incrementos del ruido en el rango de flujo vehicular de 0 a 1000 veh/h, pero, a partir de allí, los niveles de presión sonora permanecen estables hasta incluso más de 3000 veh/h. Vale notar que en el presente estudio el flujo total medio fue de 4771 veh/h lo que denota claramente niveles muy elevados de flujo que conducen a la saturación del ruido y que explican también, en buena medida, las bajas relaciones obtenidas entre el flujo vehicular y el  $L_{Aeq}$ .

La modelación matemática del ruido vehicular ha puesto en evidencia que ocurren cambios importantes en esta variable ante modificaciones menores en el tráfico, por lo que la vía apropiada para manejar el ruido de tal procedencia recae en la implementación de medidas sobre el transporte (**De Coensel et al.**, 2005). Por lo anterior, muchas de las medidas que mejoran el tráfico vehicular urbano, reducen tanto la contaminación auditiva como la atmosférica. Ésta no sería, sin embargo, la situación de la Carrera Séptima, pues las condiciones de elevado flujo vehicular y saturación, no conllevarían a una reducción importante del ruido ante cambios menores del flujo vehicular.

Ahora bien, en virtud a que sobre esta importante avenida no se ha producido reducción en el flujo vehicular con la medida de pico y placa ampliada, tampoco ha habido disminución de los niveles de ruido. Así mismo, durante el día sin carro que pretende ser una medida ambiental, se incrementó el flujo de buses y taxis respecto a un día laboral cualquiera y con ello aumentaron significativamente los niveles de ruido.

Otras variables comúnmente asociadas con el ruido vehicular incluyen la velocidad, el ancho de la vía, la pen-

diente y el tipo de pavimento, las cuales no hicieron parte de este estudio. Si bien la velocidad se relaciona directamente con los niveles de ruido en vías con tráfico rodado (**Austrroads**, 2005; **FTA**, 2006), para la avenida estudiada como sucede por igual para muchas vías de Bogotá, el tráfico acontece con embotellamientos, situación que genera bajos niveles de ruido cuando el tráfico está detenido y altos cuando se dan las acciones de aceleración – desaceleración. Al respecto, **Arana y García** (2001) encontraron que no hay o son bajas, las relaciones entre velocidad y nivel de presión sonora, bajo condiciones de tráfico muy lento.

En este estudio se encontraron relaciones estrechas entre el  $L_{Aeq}$  y distintos descriptores de la presión sonora que cobijan  $L_{\max}$ ,  $L_{(1)}$ ,  $L_{(10)}$  y  $L_{(50)}$ , siendo el último el de menor relación. Estos resultados son ampliamente concordantes con los encontrados por **Puigdomènech et al.** (1996) y **Garrigues y García** (1997), si bien estos últimos reportan también relaciones directas e importantes con el  $L_{(90)}$  ( $r = 0.84$ ), situación que en esta investigación no ocurrió siendo, por el contrario, inversa y muy baja ( $r = -0.17$ ), hecho que se explica en particularidades del tráfico que conducen a que ocurran simultáneamente los niveles de ruido más altos y más bajos a comienzos de la mañana.

El último punto de interés para este estudio, radica en sugerir y analizar algunas medidas que podrían implementarse sobre esta importante avenida de la ciudad, de tal modo que se reduzcan los niveles de presión sonora. Al respecto, cabe referir que la puesta en marcha de medidas de reducción de ruido ya ha surtido efecto en otras ciudades tal y como sucedió en El Cairo, donde se efectuaron restricciones al uso de bocinas y cornetas, y al tránsito de camiones y de buses en algunos sectores de la ciudad, obteniendo reducciones hasta de 10.8 dBA (**Ali y Tamura**, 2003); o como en el caso de la ciudad de Lanzhou donde la restricción de vehículos y la prohibición del uso de bocinas, contribuyeron significativamente a la reducción de este contaminante (**Guoxia et al.**, 2006). Estas acciones destacan el importante papel que juega la administración pública en torno a los problemas de contaminación urbana.

En la ciudad de Bogotá como se explicó previamente, ya se han implementado diversas medidas para afrontar el grave problema de transporte y movilidad, y las mismas se han hecho cada vez más restrictivas, pues sus efectos se diluyen con los años. A consecuencia de ello, se mantienen elevados niveles de contaminación atmosférica y acústica, en tanto la población y los transportadores cada vez se muestran más molestos con tales medidas.

Tal y como se ha referido en distintos apartes previos, las restricciones de automóviles particulares en la ciudad

no han surtido efecto alguno en esta vía, por cuanto la última ha sido ocupada por nuevos conductores de taxis y de automóviles particulares que encuentran atractivo su uso frente a otras avenidas cercanas. Por tanto, si se pretende reducir el flujo de automóviles, tendría que haber medidas adicionales que incluyan restricciones de uso por el número de la matrícula o a través de la implementación de peajes u otros. Estas medidas, sin embargo, no se ven muy factibles en tanto una reducción del flujo de automóviles puede interpretarse también, como una subutilización de la malla vial en el marco de una ciudad donde hay carencia de las mismas.

Los planes actuales de la Alcaldía a mediano o largo plazo, buscan implementar un sistema de metrobus o de metro, que permita una movilidad masiva y organizada que suplante al transporte caótico actual. Muy seguramente, esta medida tal y como ya ha ocurrido en otras vías de la ciudad donde se ha implementado con buses articulados modernos y menos contaminantes, tendrá efectos positivos para el medio ambiente y para la calidad de vida y el bienestar de pobladores y usuarios de este eje vial. Como medida de choque de corto plazo, la Alcaldía ofreció hace un año retirar cerca de 1200 rutas de buses de la carrera Séptima, pero no lo ha hecho. Sin lugar a dudas, el retiro de buses sobre esta vía sería una medida que contribuiría ampliamente con la reducción de la contaminación acústica, pero tal y como se anotaba previamente, debe representar volúmenes importantes dada la saturación observada en el ruido. Si bien esta medida puede ocasionar un incremento mayor en el número de taxis y de carros particulares, el ruido individual de éstos es considerablemente menor.

En lo atinente a la vía estudiada, el número de camiones resultó muy bajo en parte por las restricciones de pico y placa ambiental que limitan su movilización de 6:00 a.m. a 10:00 a.m., y por ello son mínimos los efectos atribuibles a los niveles de ruido encontrados, sin embargo, esta no es la situación de otras vías de la ciudad por donde se moviliza gran cantidad de la carga pesada del país, dada la ausencia de vías circunvalares (Sandoval, 2000). Para este tipo de vehículos tendrán que tomarse medidas especiales, sin olvidar que la molestia y el riesgo de salubridad sobre la población, es mayor en horarios nocturnos. De igual forma, aunque la mayor parte de las motocicletas mostró niveles de emisión de ruido bajos, un porcentaje reducido de estos vehículos expuso niveles elevados que merecen ser controlados por la autoridad.

Para el conjunto de la ciudad, resulta esencial la ejecución de las medidas relativas a la chatarrización de los buses más viejos, la cual ha debido ejecutarse años atrás y no se

ha cumplido, muy a pesar que en el costo de los tiquetes se implantó un sobrecosto para la reposición de los mismos. Estudios de la misma Alcaldía han mostrado que en la ciudad debería haber cerca de 11500 buses y hoy transitan cerca de 19000. Para Bogotá sigue siendo prioritaria la ampliación de la cobertura del sistema Transmilenio el cual ha mostrado profundas ventajas de eficiencia de movilidad y menor contaminación respecto al sistema de buses tradicional. Las medidas de pico y placa restrictiva a autos particulares, por el contrario, han conducido a que éstos compren nuevos vehículos por lo que con el tiempo tales medidas se han tornado en inocuas. Por lo tanto, solamente con un sistema de transporte público de calidad, se podrá reducir medularmente el flujo vehicular particular.

King y Davis (2003) consideran que la creación de conciencia en la población, con énfasis en los riesgos sobre la salud, constituye la vía más importante para afrontar la problemática ocasionada por la contaminación acústica. Tal y como lo mostró un estudio de Moser y Robin (2006), se trata de llevar a cabo una construcción social que asocie el ruido vehicular con pérdida de bienestar, salud y calidad de vida, por lo que sólo hasta entonces se abordarán de forma apropiada, las medidas para poner en cintura los impactos ambientales generados por este contaminante.

## Conclusiones

En la ciudad de Bogotá se promulgaron medidas encaminadas a la reducción del flujo vehicular y uno de los propósitos de este estudio, fue evaluar el efecto de tales medidas en la contaminación acústica de una de las avenidas más importantes de la ciudad. Sin embargo, sobre la vía estudiada (Carrera Séptima) no se redujo el tráfico vehicular, muy a pesar de que el 40% (4 de 10 dígitos) de los automóviles particulares dejó de circular por la ciudad y, por ende, los niveles de presión sonora se mantuvieron o incluso en algunos casos aumentaron.

Tal situación se reconoció más claramente durante el día sin carro, en el cual no pueden circular los vehículos particulares y, a pesar de ello, hubo incremento significativo de buses y taxis sobre la vía estudiada que, consecuentemente, se expresaron en mayores niveles de presión sonora. Muy seguramente tal efecto no debió acontecer en toda la ciudad, pero sí ocurrió en esta vía. Por lo anterior, debe tenerse presente ante futuras medidas, que la expresión de las respuestas pueden ser muy variables, independientemente que se trate de mejorar el transporte y la movilidad, o de disminuir la contaminación ambiental.

Los niveles de ruido encontrados sobre la Carrera Séptima son muy altos y en el marco de las instituciones que

más han abordado el tema a nivel mundial como la OMS y la EPA, alcanza niveles considerados de problema de salud pública, con probables daños auditivos sobre la población más expuesta e incluso con otros problemas fisiológicos y psicológicos. Los mismos representan, sin lugar a dudas, pérdida significativa de la calidad de vida de los habitantes expuestos a éstos. Ello indica que se hacen necesarias medidas expeditas sobre el transporte que no solamente apunten a resolver los problemas de movilidad ciudadana, sino de contaminación auditiva y atmosférica.

Es importante notar, que este problema de contaminación no existe en el imaginario de los gobernantes ni de la autoridad ambiental de la ciudad, por lo que no se toman medidas ni para su monitoreo ni para su control. Por el contrario y como se evidenció en la última normativa nacional, se abrieron las puertas a su permisividad.

Para el caso particular de la vía estudiada, se señalan condiciones de saturación del ruido que por ende no pueden ser resueltas con variaciones leves en el flujo vehicular. La solución más inmediata recae en reducir el flujo excedente de vehículos de transporte público, así como la actualización de su parque automotor, pues participan en él vehículos con más de 2 décadas de servicio.

Es importante notar que el incremento del flujo vehicular privado, es claro reflejo de una ciudad que no ofrece un sistema de transporte masivo con cobertura y calidad, el cual se ha dilatado por décadas para salvaguardar los intereses políticos de los gobernantes que no están dispuestos a correr con los costos políticos que representa enfrentar el gremio de los transportadores en la ciudad.

Hay que destacar que la población en Bogotá viene creciendo exponencialmente (2.7% anual durante los últimos 20 años), por lo que los problemas de contaminación ambiental que se evidencian hoy, muestran, de cara al futuro, problemáticas más agudas. La solución medular a los problemas de contaminación urbanos, requiere tanto de conciencia de su población, como de voluntad política de sus gobernantes.

## Bibliografía

- Abbott, P.G., Nelson, P.M.** 2002. Converting the UK traffic noise index LA10,18h to EU noise indices for noise mapping. TRL Project Report PR/SE/451/02.
- Abbott, P.G., Stephenson, S.J.** 2006. Method for Converting the UK Road Traffic Noise Index LA10,18h to the EU Noise Indices for Road Noise Mapping. TRL & Casella Stanger, <http://www.defra.gov.uk/environment/noise/research/crtn/pdf/noise-crtn-update2006.pdf>.

- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.** 2006. Plan maestro de movilidad y estacionamientos. Alcaldía de Bogotá.
- Ali, S.A., Tamura, A.** 2003. Road traffic noise levels, restrictions and annoyance in Greater Cairo, Egypt. *Applied Acoustics*, **64**:815-823.
- Alimohammadi, I., Nassiri, P., Behzad, M., Hosseini, M.R.** 2005. Reliability analysis of traffic noise estimation in highways of Tehran by Monte Carlo simulation method. *Iranian journal of environmental health science & engineering*, **2**(4):229-236.
- Arana, B.M., García, A.** 2001. Variación temporal de los niveles de contaminación sonora en Pamplona y Valencia. *Tecniacústica*, La Rioja 2001:1-6.
- Austrroads.** 2005. Modelling, measuring and mitigating road traffic noise. Project No. TP1085, Sydney. <http://www.austrroads.com.au/>.
- Barrigón-Morillas, J.M., Gómez-Escobar, V., Méndez-Sierra, J.A., Vilchez-Gómez, R., Trujillo-Carmona, J.** 2002. An environmental noise study in the city of Cáceres, Spain. *Applied acoustics* **63**:1061-1070.
- Bolund, P., Hunhammar, S.** 1999. Ecosystem services in urban areas. *Ecological economics* **29**:293-301.
- Chatterjee, S., Price, B.** 1977. *Regression analysis by example*. Wiley, New York.
- COM,** 2000. Propuesta de Directiva del parlamento europeo y del consejo sobre evaluación y gestión del ruido ambiental. Informe final 468. [http://www.ruidos.org/Normas/Eur\\_32002L0049.html](http://www.ruidos.org/Normas/Eur_32002L0049.html).
- Corrales, A., Henríquez, F.** 2007. Contaminación por Ruido Debido al Tráfico Vehicular: un Problema Diario que va en Aumento en la Ciudad de Panamá. *Fac. Ing. Mecánica* <http://www.fim.utp.ac.pa/Revista/vol4/Corrales.html>.
- De Coensel, B., De Muer, T., Yperman, I., Botteldooren, D.** 2005. The influence of traffic flow dynamics on urban soundscapes. *Applied Acoustics* **66**:175-194.
- Draper, N.R., Smith, H.** 1981. *Applied Regression Analysis*. 2a Ed. Wiley, New York.
- EC - European Communities.** 1996. Commission Green Paper on Future Noise Policy [COM(96)540]. European Commission, Brussels.
- EC - European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN).** 2006. Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure. Final Draft, V 2. [http://ec.europa.eu/environment/noise/pdf/wg\\_aen.pdf](http://ec.europa.eu/environment/noise/pdf/wg_aen.pdf).
- EPA - U.S.** 1974. Information on Levels of Environmental Noise Requisite to Protect Public Health and Welfare with an Adequate Margin of Safety. EPA/ONAC 550/9-74-004, Washington D.C.
- \_\_\_\_\_. 1978. Protective noise levels. Condensed version of EPA levels document. Washington D.C.
- FHWA -Federal Highway Administration.** 2004. Traffic Noise Model. Version 2.5 Look-up Tables. User's Guide. U.S. Department of Transportation, FHWA-HEP-05-008. Final Report.



- FTA - Federal Transit Administration.** 2006. Transit noise and vibration impact assessment. [http://www.fta.dot.gov/documents/FTA\\_Noise\\_and\\_Vibration\\_Manual.pdf](http://www.fta.dot.gov/documents/FTA_Noise_and_Vibration_Manual.pdf).
- Gaja, E., Gimenez, A., Sancho, S., Reig, A.** 2003. Sampling techniques for the estimation of the annual equivalent noise level under urban traffic conditions. *Applied Acoustics*, **64**:43-53.
- Garrigues, J.V., García, A.** 1997. Análisis estadístico de los niveles de contaminación sonora medidos en diferentes zonas urbanas a lo largo de las 24 horas del día. *Revista de Acústica*, Vol. **XIX**(1 y 2):13-20.
- Griffiths, T.D., Langdon, F.J.** 1968. Subjective response to road traffic noise. *J. Sound Vibr* **8**(1):16-33.
- Guoxia, M., Yujun, T., Tianzhen, J., Zhengwu, R.** 2006. Assessment of traffic noise pollution from 1989 to 2003 in Lanzhou city. *Environmental Monitoring and Assessment*, **123**:413-430.
- IDEAM – Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales.** 2006. Convenio de asociación No. 112 de 2004 entre IDEAM, MAVDT, CDMB, Corantioquia, CAM, CAS, Corpogujaira, AMVA, la CCB para la ejecución del proyecto “Propuesta de Proyecto Marco de Reglamentación en Materia de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica y Elaboración de los Desarrollos Normativos para la Calidad del Aire, Fuentes Fijas, Fuentes Móviles, Ruido y Combustibles.” Documento de Borrador. <http://www.ideam.gov.co/biblio/paginaabierta/Documento%20soporte%20ruido.pdf>
- Ingle, S.T., Pachpande, B.G., Wagh, N.D., Attarde, S.B.** 2005. Noise exposure and hearing loss among the traffic policemen working at busy streets of Jalgaon urban centre. *Transportation Research Part D* **10**:69-75.
- Johnson, R.A., Wichern, D.W.** 1982. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Kendall, M.G.** 1975. *Multivariate Analysis*. Hafner Press, New York.
- Kim, K.S., Park, S.J., Kweon, Y.J.** 2007. Highway traffic noise effects on land price in an urban area. *Transportation Research Part D*, **12**:275-280.
- King, R.P., Davis, J.R.** 2003. Community Noise: Health Effects and Management. *Int. J. Hyg. Environ. Health* **206**:123-131.
- Lebiedowska, B.** 2005. Acoustic background and transport noise in urbanised areas: A note on the relative classification of the city soundscape. *Transportation Research Part D* **10**:341-345.
- Li, B., Tao, S.** 2004. Influence of expanding ring roads on traffic noise in Beijing City. *Applied Acoustics*, **65**:243-249.
- \_\_\_\_\_, **Dawson, R.W.** 2002. Evaluation and analysis of traffic noise from the main urban roads in Beijing. *Applied Acoustics*, **63**: 1137–1142.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT.** 2006. Resolución 0627 de abril 7 de 2006. Bogotá.
- Melo-Barbosa, A.S., Alves-Cardoso, M.R.** 2005. Hearing loss among workers exposed to road traffic noise in the city of São Paulo in Brazil. *Auris Nasus Larynx*, **32**:17-21.
- Moser, G., Robin, M.** 2006. Environmental annoyances: an urban-specific threat to quality of life? *Revue européenne de psychologie appliquée* **56**:35-41.
- OMS - Organización Mundial de la Salud.** 1999. Guidelines for Community Noise. Birgitta Berglund, Thomas Lindvall, Dietrich H Schwela. (Eds.). <http://www.who.int/docstore/peh/noise/guidelines2.html>.
- Poole,** 1998. Traffic Congestion [including the Road Traffic Reduction (United Kingdom Targets) Bill 1997/98 Bill 11]. House of Commons Library Research Paper 98/16.
- Puigdomènech, J., Jorge, J., Mulet, J.** 1996. Acoustical Impact of Roads on Medium-Sized Mediterranean Coastal Towns. *Applied Acoustics*, **47**:83-92.
- Rivera, J., Guerry, A.** 2008. Propuesta de Evaluación de Impacto Ambiental Vial para la Ciudad de La Plata. Universidad Tecnológica Nacional, <http://www.frlp.utn.edu.ar/lemac/Publicaciones/Del%202002/Ev%20imp%20amb%20-%20Prov%20amb.pdf>.
- Sandoval, R.** 2000. Evaluación de la Contaminación por Ruido en la Localidad de Puente Aranda en Santa Fe de Bogotá, D.C. En Memorias Seminario Técnico Administrativo del Ruido Causado por Fuentes Móviles (Tráfico Rodado). DAMA, PNUD, Goethe-Institut de Bogotá. 25 y 26 de Sept. 2000. Bogotá. [www.goethe.de/hn/bog/ruido/rasmusse.pdf](http://www.goethe.de/hn/bog/ruido/rasmusse.pdf)
- Sheskin, D.J.** 2003. *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures*. Chapman & Hall, Florida.
- Sokal, R.R., Rohlf, F.J.** 2000. *Biometry: the Principles and Practice of Statistics in Biological Research*. Freeman, New York.
- Trombetta, P.H., Diniz, F.B., Barbosa, W.A.** 2002. Environmental noise pollution in the city of Curitiba, Brazil. *Applied Acoustics*, **63**:351-358.
- Zar, J.H.** 1984. *Biostatistical Analysis*. Prentice-Hall, USA.

Recibido: noviembre 10 de 2010.

Aceptado para su publicación: mayo 11 de 2011.

# IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES ÓPTIMAS PARA LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DEL PRECURSOR *GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH*

Jhon Jairo Prías Barragán<sup>1,2</sup>, Carlos Andrés Rojas González<sup>1</sup>, Narly Andrea Echeverry Montoya<sup>1</sup>, Gerardo Fonthal<sup>1</sup>, Hernando Ariza Calderón<sup>1</sup>

## Resumen

**Prías Barragán J. J., C. A. Rojas González, N. A. Echeverry Montoya, G. Fonthal, H. Ariza Calderón:** Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado a partir del precursor *Guadua angustifolia Kunth*. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (135): 157-166, 2011. ISSN 0370-3908.

En este trabajo se presentan las variables óptimas encontradas para la obtención de carbón activado a partir del precursor *Guadua angustifolia Kunth*. Lográndose identificar parámetros tales como: temperatura de carbonización, tiempo de carbonización, temperatura de impregnación en activante, tiempo de impregnación en activante, relación carbón vegetal-activante, temperatura de activación, tiempo de activación y tamaño de muestra. Estas condiciones óptimas de carbonización, permitieron obtener la mayor capacidad de adsorción en procesos de decoloración con Azul de Metileno.

**Palabras clave:** adsorción, carbón activado, pirólisis.

## Abstract

In this paper, we reported the optimal variables for obtaining activated carbon from the precursor *Guadua angustifolia Kunth* (*Bamboo*). We identify parameters such as, carbonization temperature, carbonization time, impregnation temperature in activating, impregnation time in activating, relationship activating-Charcoal, activation temperature, activation time and sample size. These optimal conditions of carbonization, allowed to obtain the highest adsorption capacity in the bleaching process with Methylene Blue.

**Key words:** adsorption, activated carbon, pyrolysis.

<sup>1</sup> Laboratorio de Optoelectrónica, Universidad del Quindío, A.A. 2639, Armenia.

<sup>2</sup> Programa de Tecnología en Electrónica, Universidad del Quindío, A.A. 2639 Armenia.

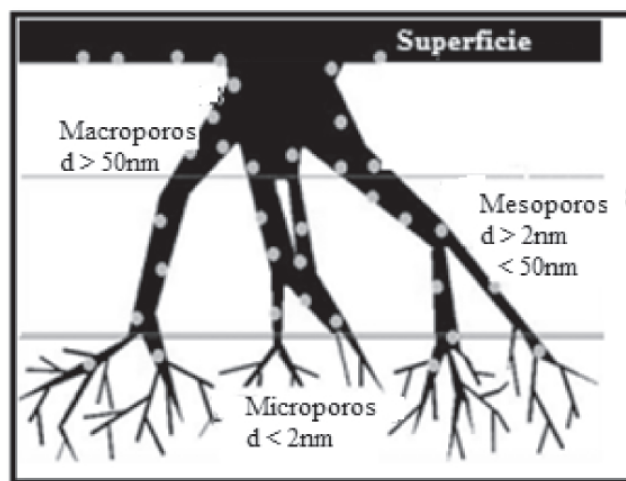
## Introducción

En la actualidad, el carbón activado es un producto muy cotizado en el mercado mundial, por sus innumerables aplicaciones en los campos de: la medicina, la industria biofarmacéutica y el medio ambiente. Su producción es controlada por países altamente desarrollados como Holanda, Reino Unido, Japón, Alemania y los Estados Unidos, según **Fernández et al.** (2006). El carbón ha sido utilizado como adsorbente desde épocas remotas y se ha desarrollado hasta lo que hoy conocemos como carbón activado de acuerdo a lo mencionado por **Fombuena y Valentín** (2010). El carbón activado es utilizado en áreas que van desde la medicina según **Newberry** (2006) y **Taylor** (2006), el tratamiento de aguas, en la eliminación de olores y sabores, como agente decolorante en la industria del azúcar, en máscaras para la adsorción de gases tóxicos, para eliminar o recuperar compuestos orgánicos como tintes, disolventes o compuestos orgánicos tóxicos de las aguas según **Valdés y Zaror** (2010), en la purificación del aire, en la industria química, en la industria farmacéutica, en la purificación de gases, en la implementación de supercapacitores según **Jayalakshmi y Balasubramanian** (2008), en la decoloración de vinos, zumos y vinagres, en la eliminación de cloro libre en agua potable, en la eliminación de ozono en agua potable, en la eliminación de geosminas, antracinas, simazinas, y en la eliminación de dioxinas, entre otros, tal como lo menciona la empresa Global Water Technologies Group (2010).

La elevada capacidad de adsorción que posee el carbón activado y la posibilidad que tiene de ser reutilizado, le permite un tratamiento eficaz y de bajo costo en múltiples aplicaciones. Las propiedades intrínsecas del carbón activado, son totalmente dependientes de la fuente de materia prima utilizada. Tal como ha sido reportado por **Gonzales** (2002) y **Keith et al.** (2005), el carbón activado del *Bambú*, presenta propiedades superiores al de otros precursores vegetales; por lo tanto es un campo abierto de Investigación, encontrar diversas fuentes de materia prima para obtenerlo. Al respecto, se conoce que la *Guadua* es un muy buen candidato como precursor para producir carbón activado, debido a su bajo costo de producción y alta tasa de reposición tal como lo reporta **Prías** (2009); asimismo, gran parte de esta importante materia prima se pierde en los rodales o queda como desecho en el sector de la construcción. Por lo tanto, dentro del campo de interés en el aprovechamiento de la *Guadua* en su cadena productiva, en este trabajo presentamos la identificación de las variables óptimas que permitieron obtener carbón activado a partir del precursor *Guadua angustifolia Kunth*, con la mayor capacidad de adsorción, en procesos de decoloración con azul de metileno.

## Carbón activado

El carbón activado es un material que posee una estructura altamente porosa, es preparado artificialmente a través de un proceso de carbonización, para que exhiba un mayor grado de porosidad y superficie interna. El carbón vegetal, después de la activación incrementa su área superficial hasta 300 veces debido a la formación de poros internos de diferentes dimensiones, tal como se puede apreciar en el esquema ilustrativo de la figura 1.



**Figura 1.** Tipo de poros formados en el carbón activado.

En la actualidad, se ha logrado fabricar carbones activados, con áreas superficiales desde 500 hasta 1500 m<sup>2</sup>/g. Por su parte, el carbón vegetal, está compuesto de hidrógeno, oxígeno y principalmente carbono según lo menciona **Rodríguez** (2003). El carbón puede ser activado por dos métodos diferentes, la activación física o la activación química, en la activación física o térmica se busca hacer reaccionar a altas temperaturas el carbón vegetal en atmosfera inerte y saturada con vapor de agua, de tal manera que después de un tiempo, algunos átomos de carbón reaccionan, se gasifican en forma de CO<sub>2</sub> y otros se recombinan y condensan en forma de placas grafiticas, creando la estructura carbón-poro.

Por otro lado la activación química se caracteriza por la impregnación del carbón vegetal en diferentes agentes químicos, los cuales pueden ser, ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), cloruro de zinc (ZnCl<sub>2</sub>), hidróxido de potasio (KOH) y carbonato de potasio (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), los cuales son sometidos a temperaturas alrededor de los 500°C. El material volátil que aún queda en el carbón es eliminado por arrastre, dejando los poros libres, tal como ha sido reportado por **Marsh y Rodríguez** (2006). El carbón Activado resultante, tiene la capacidad de

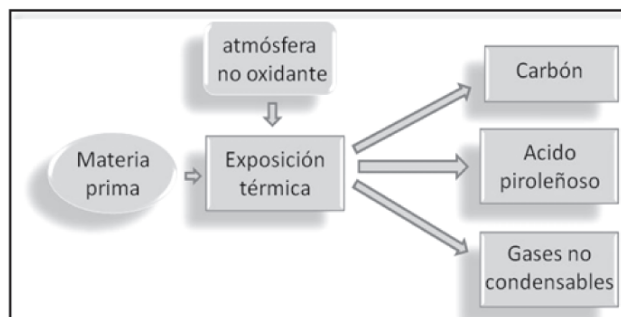
atraer y retener moléculas de otros compuestos. A este mecanismo de atracción se le denomina adsorción, al sólido se le denomina “adsorbente” y a la molécula atrapada, “adsorbato”. La unión entre el carbón y el adsorbato se lleva a cabo por medio de fuerzas de London, que son una de las clases de fuerzas de Van Der Waals. Éstas fuerzas son relativamente débiles y, por lo tanto, reversibles al utilizar calor y presión de acuerdo con lo expresado por la empresa Global Water Technologies Group (2010).

El carbón activado es también capaz de efectuar quimiadsorciones; es decir, reacciones químicas pueden presentarse en la superficie del carbón, produciendo cambios de estado en el adsorbato. La quimiadsorción es una reacción irreversible, y se evidencia claramente con el proceso de deoloración. Es utilizado también, en el enmascaramiento de raíces para evitar el contacto con los herbicidas según el CIAT (1981) y en soporte de catalizadores, debido a su termoestabilidad, propiedades ácidas y básicas, la fácil interacción con los metales, el control de la estructura porosa y las propiedades químicas de la superficie logrando así, ser aprovechadas en aplicaciones catalíticas según **Perera y Rangel (2008)**.

Por lo tanto, debido a las múltiples aplicaciones del carbón activado, el consumo mundial de carbones activados para el año 2007 fue cercano a 0,9 millones de toneladas. Con un crecimiento estimado de 5,2% por año, se prevé para el 2012 un consumo de 1,2 millones de toneladas. La producción se concentra en China, Japón, Europa y Estados Unidos. Colombia ha presentado un consumo anual promedio entre los años 1996 y 2002 de 700 ton/año, según **Gómez et al. (2010)**. El carbón activado puede ser producido a partir de una gran variedad de materias primas carbonizables, siendo entre ellas las principales: Carbón mineral, cáscara de coco, madera, lignita, etc. De acuerdo con la Red Chilena del *Bambú* (2008) y **Deiana (1998)**, las propiedades intrínsecas del carbón activado que se obtiene, son totalmente dependientes de la fuente de materia prima utilizada para obtenerlo.

#### Obtención de carbón activado a partir del precursor *Guadua angustifolia Kunth*

Para lograr la carbonización de un material precursor, se requiere de la descomposición físico-química bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante. Los productos resultantes de la carbonización son gases, líquidos y carbón, cuyas cantidades relativas dependen de las propiedades del precursor a tratar y de los parámetros de operación del equipo de calentamiento, según lo expresa **Lesme (2010)**. En la figura 2 se muestra el esquema básico del proceso de la carbonización. Este proceso es un



**Figura 2.** Proceso de carbonización a partir de biomasa.

tipo de pirólisis, la cual, se presenta a temperaturas en el rango desde 400°C hasta 600°C y tiempos que varían desde horas hasta días de acuerdo con **Márquez (2010)**.

Por lo tanto, un sistema para la obtención de carbón requiere de una fuente de calor constante, en un reactor, el cual puede ser continuo o discontinuo (batch), debe producirse una atmósfera libre de oxígeno, para evitar que la biomasa se consuma por efectos de la oxidación. Es posible hacer vacío en el reactor o utilizar un gas de arrastre inerte, tal como el nitrógeno (N<sub>2</sub>). Preferiblemente, se debe hacer recolección del subproducto de la carbonización, mediante la condensación de los vapores resultantes, debido a que los alquitranes y los ácidos piroleñosos pueden tener efectos negativos en la salud y el ambiente.

Se observa también, que el rendimiento teórico del carbón vegetal varía con la temperatura de carbonización, debido al cambio de contenido de material volátil alquitranado o ácidos piroleñosos, tal como se muestra en la Tabla 1, información reportada por la FAO (1983)

Donde se observa para valores de bajas temperaturas y corto tiempo de carbonización un mayor rendimiento, pero un menor porcentaje de carbono fijo, indicando con esto que aun se encuentra ácidos piroleñosos en la biomasa que en nuestro caso hace referencia a la *Guadua*, mientras para altas temperaturas y mayor tiempo de carbonización, se presenta un menor rendimiento, pero un mayor porcentaje de carbono fijo.

**Tabla 1.** Efecto de la temperatura de carbonización sobre el rendimiento y composición del carbón vegetal.

Temperatura de carbonización	Análisis químico del carbón	
	% carbono fijo	% material volátil
300	68	31
500	86	13
700	92	7

## Materiales, métodos y experimentación

En este trabajo, las muestras de *Guadua* sometidas a carbonización, siguieron el proceso que se muestra en la figura 3. En el cual, inicialmente se cortaron tabletillas de la parte media del culmo de la *Guadua*, luego se llevaron a un reactor cilíndrico de pirólisis, el cual, se encuentra en el interior de una mufla cuya temperatura fue controlada, después, se realizó vacío en el sistema y se hizo fluir  $N_2$ , para garantizar la mínima cantidad de  $O_2$ , posteriormente y antes de iniciar la carbonización, se suspendió el flujo de  $N_2$ , se encendió el controlador de la mufla y se configuró la temperatura deseada. Asimismo, en este montaje de carbonización, se ubicó un sistema para la condensación del material volátil presente en la *Guadua*, como son, los ácidos piroleñosos. En este sistema se logró la condensación de gases, a partir de la recirculación de agua fría, a través de tres condensadores serpentín de vidrio. Por otro lado, el subproducto de la carbonización fue almacenado, ya que, este puede ser utilizado en otras aplicaciones, como antiséptico veterinario, como preservador de maderas, como compuesto para calafateo, y como sustituto de alquitrán para caminos, entre otros de acuerdo con lo reportado por la FAO (1983).

Entonces, una vez obtenido el carbón de *Guadua*, se llevó a molienda, hasta obtener un tamaño de grano menor a  $180\mu m$ , el tamaño de grano se determinó a través del paso por un tamiz, de la marca Ro-Tap Model E y para la malla #80, equivalente a  $180\mu m$ . Posteriormente, se hizo la impregnación en ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) al 85%, en una relación de 2:1 activante:carbón, sometiendo la muestra de carbón impregnado a una temperatura de  $110^\circ C$  durante 15h, después, se realizó la activación a una temperatura de  $450^\circ C$

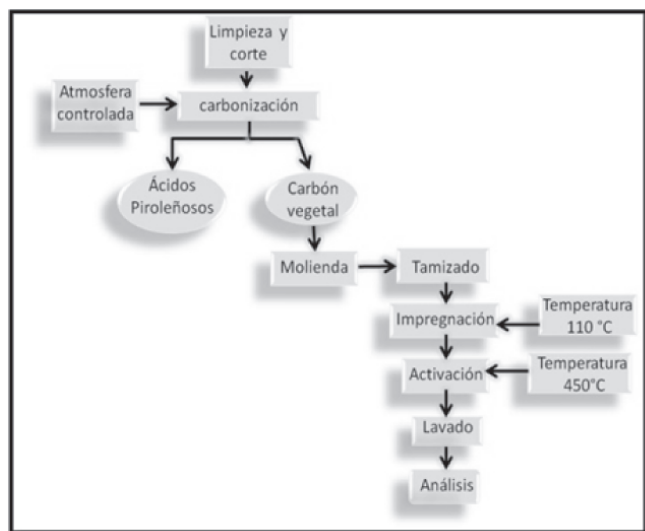


Figura 3. Procedimiento para la obtención de carbón activado.

durante 1h. Una vez terminado este procedimiento, se procedió al lavado del carbón activado con agua y la adición de hidróxido de sodio (NaOH), hasta llegar a pH neutro constante, en esta etapa del proceso se formaron sales altamente solubles en agua, las cuales fueron retiradas del carbón por medio de filtración a vacío, mediante un embudo gooch. Luego, el carbón activado fue secado y almacenado. Este proceso también se llevó a cabo con el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) al 15% y el cloruro de Zinc ( $ZnCl_2$ ) al 3M.

El sistema de pirólisis construido en el desarrollo de este trabajo se presenta en la figura 4. Donde inicialmente, las muestras de *Guadua* fueron ubicadas en el interior del reactor, el cual presenta entrada de gas  $N_2$  y salida de ácidos piroleñosos, luego estos gases de salida, fueron llevados hasta un sistema de condensación. La temperatura del reactor fue elevada empleando una mufla con conexión a 220V y una potencia eléctrica alrededor de 5000W, lo cual permitió variar la temperatura en el rango comprendido desde temperatura ambiente hasta  $700^\circ C$ .

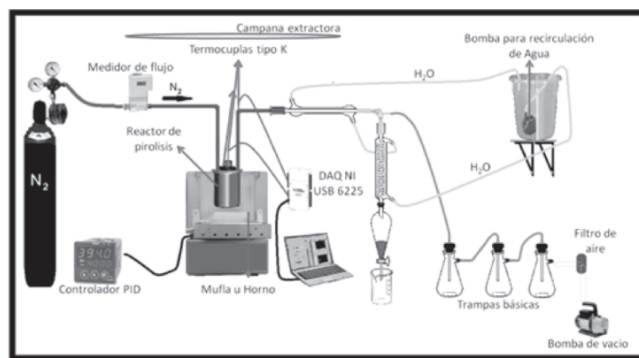


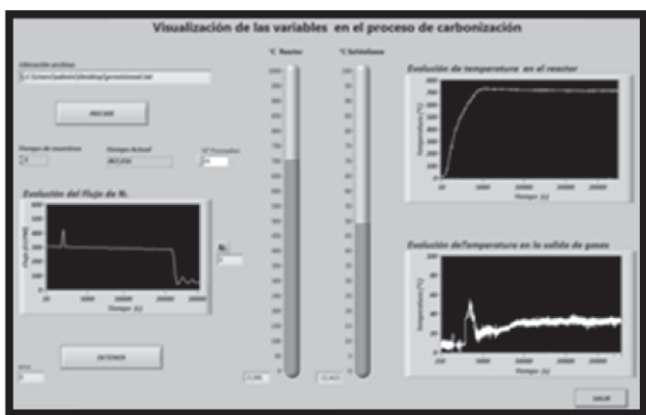
Figura 4. Sistema de pirólisis para la obtención de carbón activado a partir del precursor *Guadua angustifolia Kunth*.

El control de la temperatura en la mufla se logró empleando el controlador PID ATR-241 de la marca PIXSYS, el cual tiene la opción de autoajuste de los parámetros P, I, D, (Proporciona, Integral y Derivativo). El actuador utilizado fue un relé de estado sólido (SSR) de la marca CRYDOM, el cual soporta hasta 600V y 50A. En la medición de la temperatura en la mufla, se utilizó una termocupla tipo k, con un bulbo en acero inoxidable, al igual que para sensar la temperatura dentro del reactor y en la salida de gases (ácidos piroleñosos), la variable temperatura fue llevada al computador mediante una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) NI USB-6225 de la empresa National Instruments. Asimismo, la señal del medidor de flujo para gases fue llevada al computador mediante la DAQ, esta señal tiene un comportamiento lineal de la forma:

$$F_{N_2} = 100xV \quad (1)$$

Donde  $F_{N_2}$  es el flujo de nitrógeno en unidades de centímetro cúbico por minuto (CCPM) y V se refiere a la señal de voltaje en la salida del medidor de flujo para gases.

La herramienta de visualización presentada al usuario se puede observar en la figura 5, mediante la cual, se logró monitorizar la temperatura en el reactor, la temperatura en la salida de gases y el flujo de  $N_2$ . Esta automatización nos permitió de manera sistemática, realizar, la identificación de variables óptimas para obtener carbón activado a partir de la *Guadua* tal como se ha presentado en estudios previos por Echeverry *et al.* (2010).



**Figura 5.** Herramienta de visualización de las variables en el proceso de carbonización.

En la caracterización estructural de muestras de *Guadua* y carbón vegetal se emplearon las técnicas de difracción de rayos X y transformada rápida de Fourier utilizando los equipos D8 Advance e IR Prestige Shimadzu, respectivamente. Con el mismo equipo de DRX en configuración de transmisión, se realizaron las mediciones de microporosidad y área específica mediante la técnica de SAXS (Small-Angle X Ray Scattering). Por otro lado, La determinación del porcentaje de adsorción se realizó empleando soluciones de azul de metileno en las concentraciones de 30 ppm, a las cuales se les realizaron análisis de adsorción empleando un espectrofotómetro UV-Vis. 8453 con arreglo de diodos marca HP.

## Resultados y discusión

En el proceso de identificación de las variables óptimas, se realizó la caracterización de las muestras, para diferentes fases del proceso. Inicialmente, se realizaron estudios de difractogramas de rayos X, en muestras del culmo de la *Guadua angustifolia Kunth*, para los tres diferentes biotipos; Macana, Cebolla y Castilla, en los cuales

se encontró una alta similitud en los resultados, tal como se puede observar en la figura 6.

En los espectros de DRX se observan bandas alrededor de  $16^\circ$  y  $22^\circ$ , las cuales corresponden a las banda exhibidas por la celulosa, tal como se presenta en la figura 7. Lo cual indica una alta presencia de celulosa en la *Guadua*, tal como era de esperarse.

Asimismo, se realizaron análisis de espectros de FTIR para los tres biotipos en estudio, encontrándose similitud entre los resultados obtenidos, tal como se muestra en la figura 8. En el espectro FTIR de esta figura, se pueden observar bandas características de celulosa como por ejemplo estiramiento  $-OH$  a  $3410\text{ cm}^{-1}$ ,  $C-H$  alifático, estiramiento  $C-H$  asimétrico en grupos metilos y metilénicos a  $2924\text{ cm}^{-1}$ , estiramiento  $C=O$  de grupos carbonílicos en ácidos aromáticos a  $1735\text{ cm}^{-1}$ , por encima de  $1600\text{ cm}^{-1}$  y alrededor de  $1556\text{ cm}^{-1}$ , estiramiento en anillos aromáticos de  $C=C$ , estiramiento  $C-O$  en ácidos, alcoholes y fenoles, y deformación fuera del plano del enlace  $C-H$  a  $876, 750$  y  $666\text{ cm}^{-1}$ .

Posteriormente, en la figura 9 se presentan los resultados obtenidos en el análisis de los difractogramas DRX para las muestras de carbón vegetal, variando las condiciones de temperatura y tiempo de carbonización.

Se puede observar en el difractograma que a partir de los  $400^\circ\text{C}$ , la respuesta amorfa, empieza a formar una banda de mayor intensidad alrededor de los  $10^\circ$ , lo cual se puede atribuir a la formación de placas grafiticas, creando la estructura carbón-poro, lo cual constituyó una evidencia experimental de la presencia de interfaces carbón-poro. Por lo tanto, para comprender mejor lo que ocurre en el proceso de carbonización, se realizaron análisis de FTIR para las muestras de carbón vegetal en las diferentes condiciones de temperatura y tiempo, tal como se muestra en la figura 10. En esta figura se puede observar como en el proceso de carbonización, a medida que se incrementa la temperatura hay una mayor presencia de carbono fijo, lo cual se puede deducir de la desaparición de las bandas presentes en el espectro realizado para la *Guadua*, presentado en la figura 8, indicando el rompimiento de enlaces durante la pirólisis de las moléculas de lignina y celulosa, y la conversión del material vegetal en carbono fijo.

También se muestra en la figura 10 los espectros de FTIR de la lignina y la celulosa encontrados en la base de datos del equipo, donde efectivamente se puede observar la correspondencia con las bandas del espectro de FTIR de las muestras de *Guadua*. También, para conocer el comportamiento en el tiempo, del proceso de carbonización, se realizaron los espectros de FTIR mostrados en la figura 11.

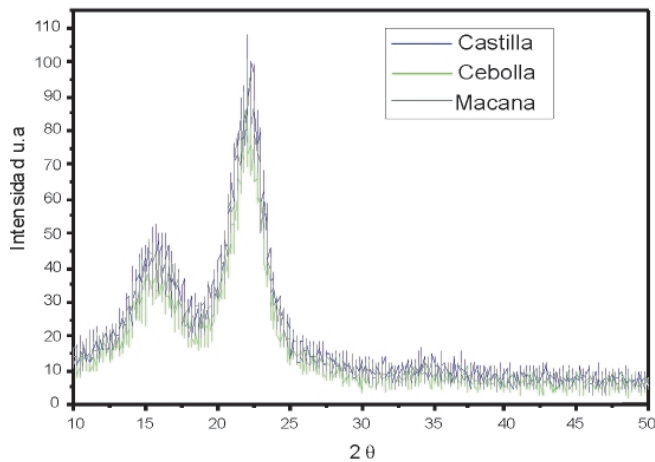


Figura 6. Difracción de rayos x en los biotipos de *Guadua*.

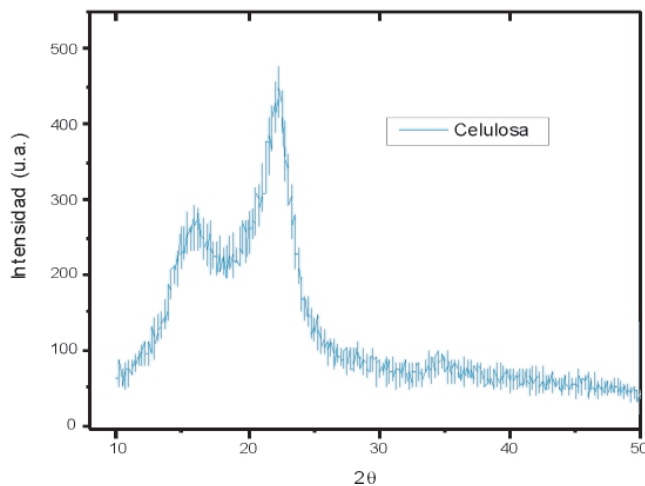


Figura 7. Difracción de rayos x para la celulosa.

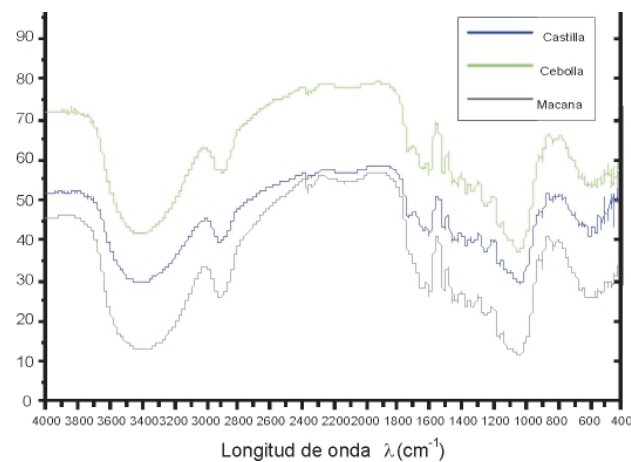


Figura 8. Espectros de FTIR en biotipos de *Guadua*.

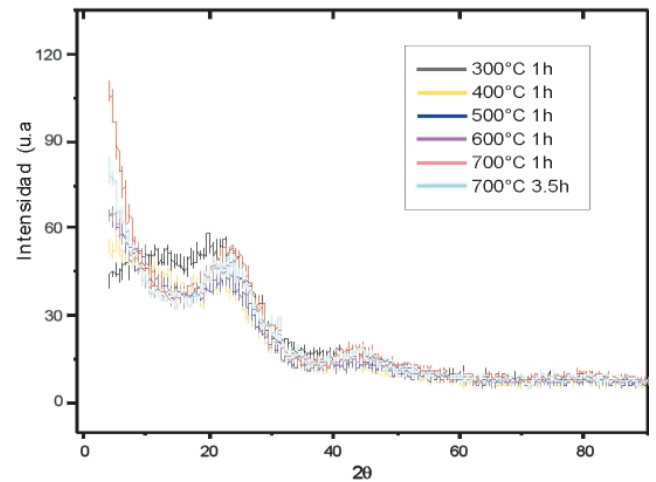


Figura 9. Difractogramas de rayos x para el carbón vegetal obtenido para diferentes temperaturas y tiempo de carbonización.

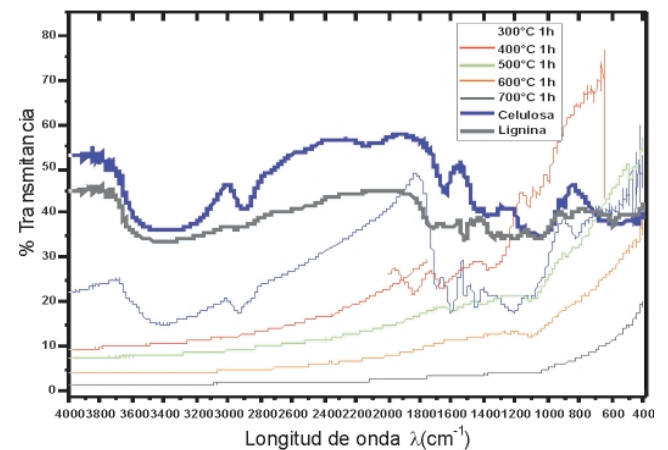


Figura 10. Espectros de FTIR en el carbón vegetal variando la temperatura de carbonización.

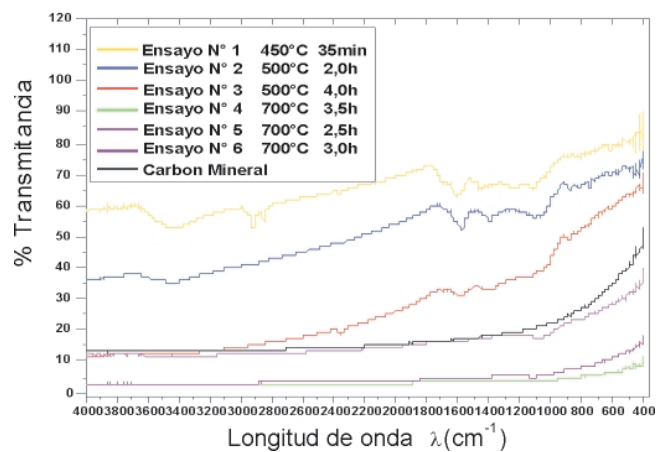


Figura 11. Espectros de FTIR en carbón vegetal para diferentes tiempos de carbonización.

En donde se puede observar que la mayor cantidad de carbono fijo se produce a una temperatura de 700°C y 3,5h, siendo esta curva la más cercana al resultado obtenido para el espectro FTIR del carbón mineral mostrado también en la figura en mención.

El control sobre las variaciones de temperatura mostradas en las gráficas anteriores, se logró mediante la implementación de un controlador PID, el cual recibió la señal de las termocuplas ubicadas en el reactor de pirólisis y en la salida de gases. Una de las respuestas obtenidas en la evolución de la temperatura interna del reactor de pirólisis se presenta en la figura 12. Donde se puede observar que el ajuste de las constantes del controlador PID, permitió minimizar el sobreimpulso, alcanzando el estado estacionario después de los primeros 2500s, con una temperatura de estado estacionario de  $700 \pm 30^\circ\text{C}$ .

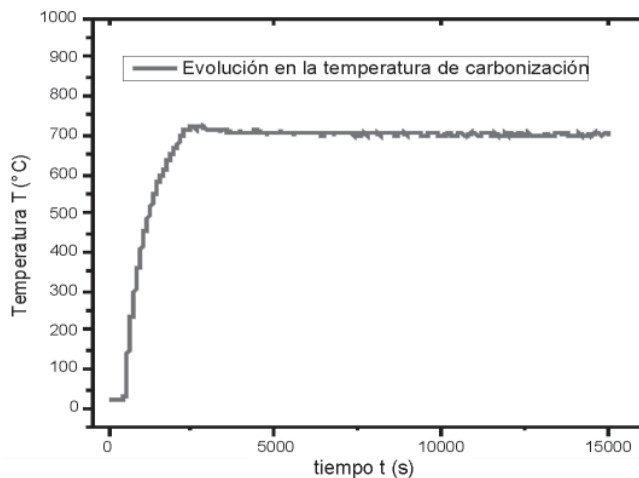


Figura 12. Evolución de la temperatura en el reactor.

De igual manera, en la figura 13 se muestra el comportamiento de la temperatura en la termocupla ubicada en la salida de gases del reactor de pirólisis.

El comportamiento que se presenta en esta gráfica se corresponde con el desprendimiento de materia volátil que ocurre en la carbonización, donde se puede observar un pico alrededor de los primeros 500s, el cual se logró asociar al desprendimiento de materia en las muestras de *Guadua*, tal como vapor de agua y ácidos piroleñosos en forma gaseosa, luego se presenta un posterior enfriamiento, el cual se logró atribuir a la disminución de gases en la salida del reactor; nuevamente, ocurre un leve aumento en la temperatura, debido al desprendimiento de sustancias tales como alquitranes y otros compuestos, los cuales, requieren de mayor temperatura, para ser volatilizados.

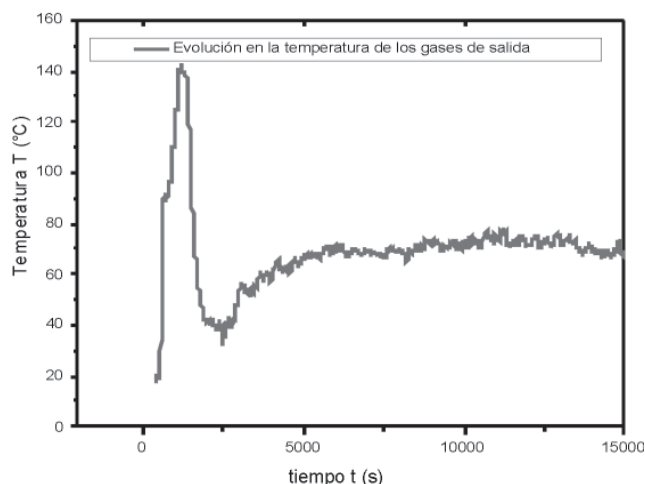


Figura 13. Evolución de la temperatura en la salida de gases del reactor de pirólisis.

Finalmente, se logra el equilibrio térmico alrededor de una temperatura de 70°C, después de los 10.000s.

Una vez realizado el proceso de carbonización y los análisis de las muestras obtenidas para las diferentes condiciones de temperatura y tiempo, se procedió a hacer la activación del carbón vegetal, con los tres diferentes agentes activantes mencionados anteriormente.

Para el proceso de activación fue necesario realizar previamente la impregnación en el agente activante en presencia de calor y durante un tiempo específico, motivo por el cual fue necesario hacer un procedimiento experimental que nos permitiera conocer el tiempo de impregnación adecuado, para lo cual se realizaron análisis de adsorción en el espectrofotómetro UV-Visible, para los diferentes tiempos, encontrándose los porcentajes de adsorción que se presentan en la figura 14. se puede observar que 15h es el tiempo óptimo para la impregnación a 110°C.

Los análisis en el espectrofotómetro UV-Vis se realizaron empleando la curva de calibración presentada en la figura 15 y los datos que se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Espectrofotómetro UV-Vis.

Curva de Calibración	
Concentración en ppm	Absorbancia
1	0,22688
2	0,42054
3	0,63231
4	0,83748
5	1,03420



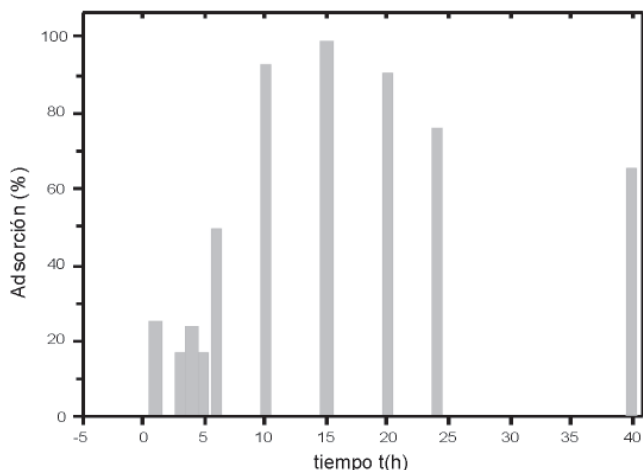


Figura 14. Adsorción para diferentes tiempos de impregnación del carbón vegetal y una temperatura constante de 110°C.

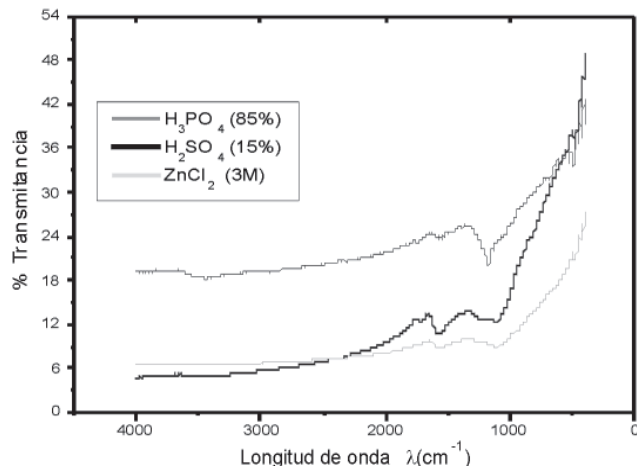


Figura 16. Espectros de FTIR en muestras de carbón activado para diferentes agentes activantes.

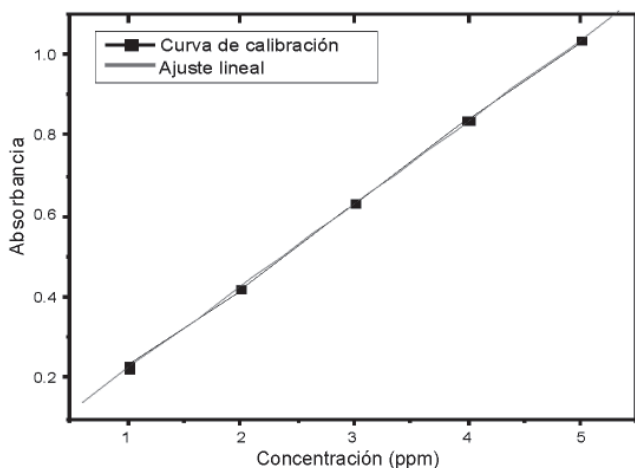


Figura 15. Curva de calibración espectro-fotómetro UV-Vis.

La curva de calibración se realizó para la longitud de onda ( $\lambda$ ) máxima del azul de metileno a 665 nm, sustancia, utilizada en los procesos de cuantificación mediante la adsorción del color por medio del carbón activado tal como ha sido reportado por Jurado (2003). En la curva de calibración presentada se obtuvo  $R^2=0,99975$ , según el UV-Vis, lo cual es un valor apropiado para este tipo de cuantificaciones.

Posteriormente, se realizaron análisis de las muestras de carbón activado a una temperatura de 450°C durante 1h, obteniéndose el espectro de FTIR para el carbón activado con cada uno de los agentes activantes mencionados anteriormente, tal como se presenta en la figura 16.

En esta gráfica se puede observar la aparición de bandas atribuidas a residuos de las sales resultantes de la neutralización del activante en la etapa de lavado del carbón activo. Posteriormente se realizaron análisis en el espectrofotómetro UV-Vis, con el fin de establecer las condiciones de carbonización adecuadas para obtener el carbón activado con el mejor desempeño en procesos de decoloración con azul de metileno, obteniéndose los resultados presentados en la figura 17.

Es posible determinar mediante este gráfico de barras, que la temperatura óptima para obtener el carbón activado con el mejor desempeño en procesos de decoloración con azul de metileno es 300°C.

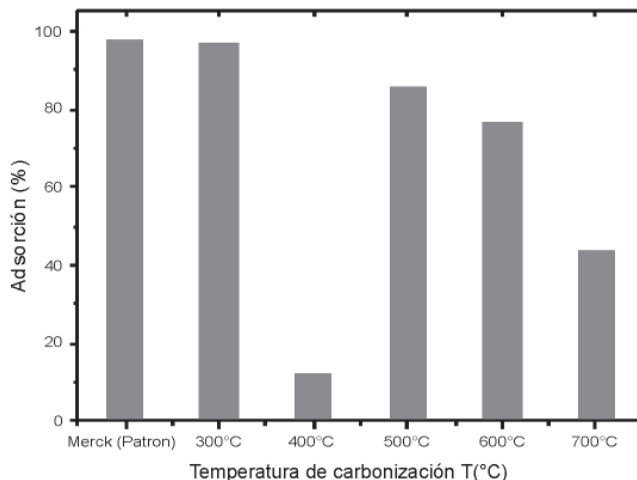
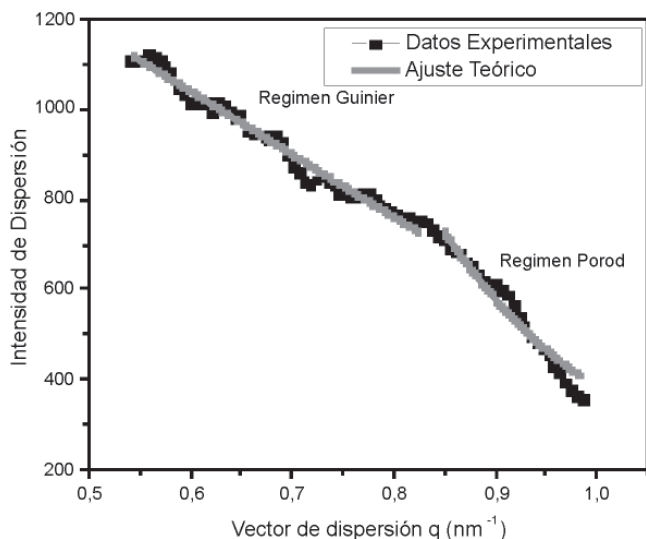


Figura 17. Porcentaje de adsorción para el carbón obtenido a diferentes temperaturas.

La determinación del tamaño promedio de poros y el área específica, se realizó empleando mediciones de SAXS, las cuales se pueden observar en la figura 18.



**Figura 18.** Mediciones de SAXS en el Carbón Activado obtenido a partir del culmo de la *Guadua angustifolia* Kunth, a una temperatura de carbonización de 300°C.

El análisis de las mediciones de SAXS se realizó empleando las leyes de Guinier y Porod, según **Crosgrove** (2005), a partir de la dispersión de rayos X en la muestra de carbón activado, encontrándose un área superficial de 850 m<sup>2</sup>/g y un tamaño promedio de poro de 6,33 nm, lo cual corresponde a mesoporos, de acuerdo a la clasificación de la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry). Este tipo de carbones activados sirve para el tratamiento de aguas residuales de origen diverso y procesos de decoloración, entre otros.

## Conclusiones

Hemos presentado en este trabajo las variables óptimas encontradas para la activación del carbón vegetal a partir del precursor *Guadua angustifolia* Kunth, en procesos de decoloración con azul de metileno, para lo cual se determinó la temperatura de carbonización de 300°C durante 1h, el tamaño de partícula debe ser menor a 180µm para la activación, la impregnación en el agente activante se debe realizar a una temperatura de 110°C durante 15h, encontrándose un mejor desempeño con el ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), en una relación de 2:1 activante: carbón y una temperatura de activación de 450°C durante 1h, mientras que el proceso de obtención de carbón activado a partir de los otros activantes mencionados, requieren de

un seguimiento específico, debido a que no presentaron un desempeño óptimo con las condiciones encontradas. Asimismo proponemos que para muestras de carbón con altos niveles de material volátil se produce carbón activado con una alta capacidad de adsorción en procesos de decoloración con azul de metileno y la metodología empleada en este trabajo para demostrarlo.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo financiero de Colciencias bajo el código 1113-452-21292 y la Universidad del Quindío mediante el proyecto 427.

## Bibliografía

- CIAT, Centro Internacional de Agricultura Tropical.** 1981. Principios básicos sobre la selectividad de los herbicidas; guía de estudio para ser usada como complemento de la unidad audiotutorial sobre el mismo tema 2.40.
- Crosgrove, T.** 2005. Colloid science: principle, methods and applications. Blackwell Publishing.
- Deiana, A.C., Petkovic, L.M. y Noriega, S.E.** 1998. Carbón activado a partir de materias primas regionales. Centro de Información Tecnológica 9(5):89-93.
- Echeverry, N. A., González Rojas, A., Prías-Barragán, J. J., Gómez, J. F., Muñoz, G. Á., Fonthal, G., Ariza-Calderón, H.** 2010. Obtención de carbón activado a partir del precursor *Guadua angustifolia* Kunth. IX ENFMC. Poster.
- , **Prías-Barragán, J. J., González, Rojas A., Ariza-Calderón, H.** 2010. Automatización de un sistema de pirólisis para la obtención de carbón activado a partir del precursor *Guadua angustifolia* Kunth. en Proc. XIII Seminario taller nacional de instrumentación y control, Armenia, 1-5.
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.** 1983. Métodos simples para fabricar carbón vegetal. 41.
- Fernández Rodríguez, A., Castillo, C. R., Aja Muñiz, E. R., García Fernández, I., Huerte-Mendía, M., Marín.** 2006. Aspectos industriales de la producción de carbón activado y sus aplicaciones en la mitigación ambiental. *IBEROMET IX*. 417-423.
- Fombuena, M. y Valentín, A.** 2010. Manual del carbón activo. Aguapedia. U. Sevilla 1-89.
- Global Water Technologies Group.** 2010. Carbón activado granular. (<http://www.ciberteca.net/equipos-para-purificadoras-y-embotelladoras-de-agua-purificada-y-mineral/medios-filtrantes-de-filtos/carbon-activado.htm>).
- Gómez, A., Klose, W., Rincón, S.** 2010. Carbón activado de cuesco de palma. Estudio de termogravimetría y estructura. Alemania.
- Gonzales Mora, H. E.** 2002. Estudio de carbonización y sus productos de 2 especies de "Paca" (*Guadua Angustifolia* y *Guadua Sarcocarpa*) provenientes de la zona de Iberia-Tahuamanu, madre de Dios. Universidad Nacional Agraria, La Molina 1-16.

- Jayalakshmi, M., Balasubramanian, K.** 2008. Simple capacitors to supercapacitors - an overview. *Int. J. Electrochem. Sci* **3**: 1196-1217.
- Jurado, P.L., Mutuberría, J. F. Oliver, N., Charadia, R., Brül, S.P., García, M. C.** 2003. Diseño de un proceso de aprovechamiento integral de residuos agroindustriales. *Jornadas SAM/CONAMET/simposio materia 1-4*.
- Keith, K.H., C, Barford J. P. y McKay G.** 2005. Production of activated carbon from bamboo scaffolding waste-process design, evaluation and sensitivity analysis. *Chemical Engineering Journal* **109**(1-3):147-165.
- Lesme Jaén, R.** 2010. Pirólisis de biomasa. Experiencias y aplicaciones. (<http://www.cengicana.org/Portal/SubOtrasAreas/Cogeneracion/Presentaciones/PirolisisBiomasa.pdf>).
- Márquez Montesino, F.** 2010. Transformación térmica de la madera. (<http://www.monografias.com/trabajos15/transformacion-madera/transformacion-madera.shtml>).
- Marsh, H. y Rodríguez-Reinoso, F.** 2006. *Activated Carbon*. 1st ed. ELSEVIER. Agawam, MA.
- Newberry, L. E.** 2006. *Sheehy manual de urgencia de enfermería*. Elsevier, España.
- Perera Barbosa, D., Rangel, M. C.** 2008. *Nanoporous materials*. World Scientific. Singapore.
- Prías-Barragán, J. J.** 2009. Implementación del método de Fitch para la medición de la conductividad térmica en muestras de *Guadua angustifolia Kunth*. *Memorias Congreso Internacional de la Guadua, otros Bambües y fibras naturales* 1,81-83.
- Red Chilena del Bambú.** 2008. *Carbón de Bambú y productos derivados, desarrollo tecnológico y comercial*. ([http://www.Bambú.cl/proyectos\\_carbon.htm](http://www.Bambú.cl/proyectos_carbon.htm))
- Rodríguez, F. J., Vidal.** 2003. *Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización*. Ediciones Díaz de Santos. España.
- Taylor, R. B.** 2006. *Medicina de familia: principios y práctica*. Elsevier. España.
- Valdés, H., Zaror, C. A.** 2010. Influencia de la composición química superficial del carbón activado en la adsorción de benzotiazoles. *Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería* **18**(1):38-43.

Recibido: febrero 1 de 2011.

Aceptado para su publicación: mayo 11 de 2011.

# INFLACIÓN VECTORIAL

Carlos A. Sierra<sup>1</sup>, Yeinzon Rodríguez<sup>2,3</sup>

## Resumen

**Sierra, C. A., Y. Rodríguez:** Inflación vectorial. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **35** (135): 167-173, 2011. ISSN 0370-3908.

A escalas cosmológicas el Universo luce homogéneo e isótropo, aun cuando existan estructuras y espacio vacío. Uno de los mecanismos de evolución espaciotemporal del universo (no de creación) es el de inflación, propuesto por Alan Guth, mediante el cual el universo se expandió aceleradamente en fracciones de segundo y permitió que el contenido energético siguiera evolucionando hasta adquirir hoy en día la estructura que se puede observar. Los escenarios que muchos científicos han propuesto, incluyendo a Guth, se basan en un campo escalar primordial llamado inflatón mediante el cual se inicia la inflación primordial del universo y se heredan del campo características como homogeneidad e isotropía. En la naturaleza aún no se han podido observar campos escalares fundamentales, y es ésta la principal motivación para buscar otra alternativa que genere inflación siendo una de ellas los campos vectoriales. En este artículo, se realiza un estudio sobre la inflación del tipo slow-roll utilizando campos vectoriales primordiales, obteniendo así los resultados asociados a la estadística de estructuras a gran escala concernientes a homogeneidad e isotropía, propiedades que han sido confirmadas observacionalmente y predichas por la ley de Hubble. Lo anterior conduce, a su vez, a resolver los problemas clásicos de la cosmología estándar.

**Palabras clave:** cosmología, inflación, campos vectoriales, gravedad modificada.

<sup>1</sup> Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Ciudad Universitaria, Bucaramanga 680002, Colombia, Correo electrónico: [casierao@gmail.com](mailto:casierao@gmail.com)

<sup>2</sup> Vicerrectoría de Ciencia, Tecnología, e Innovación, Universidad Antonio Nariño, Cra 3 Este # 47A - 15, Bogotá D.C. 110231, Colombia, Correo electrónico: [yeinzon.rodriguez@uan.edu.co](mailto:yeinzon.rodriguez@uan.edu.co)

<sup>3</sup> Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Ciudad Universitaria, Bucaramanga 680002, Colombia, Correo electrónico: [yrodrig@uis.edu.co](mailto:yrodrig@uis.edu.co)

### Abstract

At cosmological scales the Universe looks isotropic and homogeneous, although there exist structures and empty space. One of the mechanisms for the spacetime evolution of the universe (not for its creation) is the inflation, proposed by Alan Guth, by means of which the universe experienced an accelerated expansion in fractions of a second and let the energetic content continue evolving until acquiring the structure that we may observe today. The scenarios that many scientists have proposed, including Guth, are based on a fundamental scalar field called inflaton that ignites the primordial inflationary engine, maintaining the homogeneity and isotropy inherent to the nature of the field. In nature, those fields have not been observed yet, and this is the main motivation for searching another alternative that generates inflation, being one of them the vector fields. The aim of this work is to study the slow-roll inflation using primordial vector fields that maintain the characteristics of homogeneity and isotropy associated to the statistics of the large-scale structure, properties that have been observationally confirmed and predicted by the Hubble law. This, in turn, leads to solve the classical problems of the standard cosmology.

**Key words:** Cosmology, Inflation, Vector fields, Modified gravity.

## 1. Introducción

En el estudio de la cosmología estandar, la inflación es un gran acierto intelectual y hace uso de campos escalares para generar el mecanismo de expansión acelerada (**Dodelson**, 2003; **Lyth & Liddle**, 2009; **Mukhanov**, 2005; **Weinberg**, 2008). Sin embargo, la existencia de campos escalares fundamentales en la naturaleza es actualmente un tema de investigación que concentra esfuerzos de muchos centros de investigación de física de partículas. Uno de los objetivos principales del Gran Colisionador de Hadrones<sup>4</sup> es el de encontrar campos escalares fundamentales, tales como el bosón de Higgs (**Kane**, 1993). Desafortunadamente no hay evidencia contundente, hasta el día de hoy, que permita asegurar la existencia de tales campos (**Nakamura et al.**, 2010).

La inflación generada por campos escalares posee una rica fenomenología, la cual puede ser comparada con la evidencia observacional adquirida principalmente por los satélites que captan la Radiación Cósmica de Fondo (RCF) (**Lyth & Liddle**, 2009; **Komatsu et al.**, 2011; **The Planck Collaboration**, 2006), además de dar solución a los problemas de la cosmología estándar: problema de horizonte, de planitud y de reliquias no deseadas (**Guth**, 1981).

Es necesario que después de inflación el Universo continúe evolucionando mediante el modelo de expansión des- acelerada de Friedmann (**Dodelson**, 2003; **Lyth & Liddle**, 2009; **Mukhanov**, 2005; **Weinberg**, 2008), ya que de otro modo la nucleosíntesis, piedra angular de la cosmología, no tendría lugar.

En cosmología los campos escalares son muy utilizados debido a las propiedades de homogeneidad e isotropía que

son la base fundamental del principio cosmológico; sin embargo hay otra posibilidad para generar el mecanismo inflacionario y mantener las tan atractivas características ya mencionadas. La inflación a través de campos vectoriales es la otra posibilidad (**Golovnev, Mukhanov & Vanchurin**, 2008). Es evidente que un campo vectorial no es homogéneo ni isótropo de forma simultánea pues es direccional, razón por la que no es muy utilizado por los cosmólogos como generador de inflación. Sin embargo, el uso de muchos de ellos aleatoriamente orientados (**Golovnev, Mukhanov & Vanchurin**, 2008), o sólo tres de igual norma, homogéneos, y ortogonales entre sí (**Armendariz-Picon**, 2004; **Golovnev, Mukhanov & Vanchurin**, 2008), permite que se obtenga la homogeneidad e isotropía necesarias para que sean los campos generadores de la inflación primordial.

## 2. Inflación vectorial

Existe una razón fundamental para elegir campos vectoriales como mecanismo generador de inflación, y es que si bien los modelos de expansión acelerada que son aceptados por la comunidad científica son los que utilizan campos escalares fundamentales, éstos no han sido observados hasta la fecha (**Nakamura et al.**, 2010). Adicionalmente, la posible evidencia de anisotropía estadística en los datos provenientes de la RCF (**Groeneboom, Ackerman, Wehus & Eriksen**, 2010) sugiere que los mecanismos inflacionario y de generación de estructuras a gran escala podrían involucrar campos vectoriales fundamentales (**Dimopoulos, Karčiauskas, Lyth & Rodríguez**, 2009).

<sup>4</sup>CERN's LHC homepage: <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>.

Se habla de *acoplamiento no mínimo a la gravedad* cuando la acción mediante la cual se calculan las ecuaciones de campo contiene términos que explícitamente relacionan la curvatura espacio-temporal con el contenido energético. En este caso no es posible obtener una igualdad entre términos geométricos y energéticos, al estilo de las ecuaciones de campo de Einstein, debido al término de acoplamiento. A partir de la acción propuesta en las Refs. (Ford, 1989; Golovnev, Mukhanov & Vanchurin, 2008), la cual involucra un acoplamiento no mínimo a la gravedad, se buscará reproducir los resultados obtenidos por la inflación del tipo slow-roll (Dodelson, 2003; Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008) con campos escalares fundamentales, reemplazando el campo escalar por un campo vectorial fundamental  $A_\nu$  masivo o de corto alcance. Se muestra a continuación la acción mencionada, en donde el término  $F_{\alpha\beta}$  es función de las derivadas del campo vectorial:  $F_{\alpha\beta} = \partial_\alpha A_\beta - \partial_\beta A_\alpha$ ,  $g$  es el determinante de la métrica  $g_{\mu\nu}$ ,  $m_P$  es la masa reducida de Planck,  $R$  es el escalar de Ricci (Weinberg, 1972), y  $m$  es la masa del campo vectorial:

$$S = \int dx^4 \sqrt{-g} \left[ -\frac{m_P^2}{2} R - \frac{1}{4} F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} + \frac{1}{2} \left( m^2 - \frac{R}{6} \right) A^\alpha A_\alpha \right]. \quad (1)$$

La acción presentada va a ser la materia prima de este artículo mediante la cual se van a calcular las condiciones de slow-roll vectorial. Se pueden diferenciar fácilmente tres términos:

- Geométrico :  $\frac{m_P^2}{2} R$ .
- Contenido energético :  $\frac{1}{4} F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta}$  y  $\frac{1}{2} m^2 A^\alpha A_\alpha$ .
- Acoplamiento no mínimo a la gravedad :  $\frac{R}{12} A^\alpha A_\alpha$ .

El tercer término es la clave para que, mediante campos vectoriales fundamentales, se puedan obtener las condiciones de slow-roll. La razón de este efecto tiene relación directa con la forma del escalar de curvatura  $R$  para un espaciotiempo espacialmente plano de Friedmann o en expansión.

Aplicando el principio de acción estacionaria con extremos fijos, se calcularán las ecuaciones de movimiento para el campo  $A_\nu$ , y así mismo el tensor de momentum-energía  $T_{\mu\nu}$ .

### 3. Ecuaciones de movimiento y evolución del campo vectorial

Una condición fundamental para utilizar campos vectoriales como motor generador de la inflación primordial es

que reproduzca las características favorables de un campo escalar, principalmente las de homogeneidad e isotropía. El modelo inflacionario se propone dentro de un espaciotiempo plano del tipo Friedmann-Robertson-Walker (FRW) (Dodelson, 2003; Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008):

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) [dx^2 + dy^2 + dz^2], \quad (2)$$

en donde  $t$  es el tiempo cósmico,  $x$ ,  $y$ , y  $z$  son coordenadas espaciales cartesianas, y  $a$  es el parámetro de expansión.

Aplicando el principio de acción estacionaria con extremos fijos a la acción (1), con respecto al campo vectorial  $A_\mu$ , se obtiene la ecuación de movimiento:

$$\left( m^2 - \frac{R}{6} \right) A_\mu + \frac{1}{\sqrt{-g}} \frac{\partial}{\partial x_\gamma} (\sqrt{-g} F_{\gamma\mu}) = 0. \quad (3)$$

Teniendo en cuenta la métrica en la ecuación de movimiento, y manteniendo el campo vectorial altamente homogéneo se obtiene:

$$A_0 = 0. \quad (4)$$

Se introduce una nueva variable  $B_k = \frac{A_k}{a}$  que representa el campo vectorial físico escalado por la expansión del universo (el subíndice  $k$  denota las componentes espaciales del campo vectorial). A través de la ec.(3), y haciendo uso de la condición  $A_0 = 0$ , se obtiene una ecuación diferencial que representa la evolución del campo vectorial generador de inflación y que se presenta a continuación (los puntos denotan derivadas con respecto al tiempo cósmico):

$$\ddot{B}_k + 3H\dot{B}_k + m^2 B_k = 0. \quad (5)$$

Esta ecuación es muy similar a la ecuación de Klein-Gordon para campos escalares (Dodelson, 2003; Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008), y muestra concordancia entre los resultados que se obtienen mediante los dos posibles motores del mecanismo inflacionario: el escalar y el vectorial (Zhang, 2009).

### 4. Cálculo del tensor $T_{\mu\nu}$

Aplicando el principio de acción estacionaria con extremos fijos a la acción mostrada en la ec.(1), con respecto a la métrica  $g_{\mu\nu}$ , es posible obtener el tensor momentum-energía  $T_{\mu\nu}$  el cual satisface las ecuaciones de campo:

$$T_{\mu\nu} = -m_P^2 \left[ R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R \right], \quad (6)$$

siendo  $R_{\mu\nu}$  el tensor de Ricci (Weinberg, 1972). De acuerdo con los resultados obtenidos,  $T_{\mu\nu}$  viene dado por:

$$T_{\mu\nu} = \frac{1}{4} F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} g_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \left( m^2 - \frac{R}{6} \right) A_\alpha A^\alpha g_{\mu\nu} - \frac{1}{6} (R_{\mu\nu} + \nabla_\mu \nabla_\nu - g_{\mu\nu} \square) A^\alpha A_\alpha - g^{\beta\lambda} F_{\beta\mu} F_{\lambda\nu} + \left( m^2 - \frac{R}{6} \right) A_\mu A_\nu, \quad (7)$$

en donde  $\nabla_\mu$  representa la derivada covariante y  $\square$  es el operador D'Alembertiano para un espaciotiempo curvo. En ausencia de un acoplamiento directo en la acción entre la geometría y el contenido energético, la cual corresponde al denominado *acoplamiento mínimo a la gravedad*, la ecuación (6) determina la igualdad preexistente entre el contenido energético y la geometría del espaciotiempo, y es una relación causa-efecto en la que el campo gravitacional es generado y perturbado por la distribución del contenido energético. El tensor  $T_{\mu\nu}$  es en este caso diagonal, y su componente temporal representa la densidad de energía mientras que las componentes espaciales son iguales representando isotropía en la presión ejercida por el fluido cósmico.

En contraposición, la ecuación (7) muestra que el tensor  $T_{\mu\nu}$  contiene términos que dependen del campo vectorial, de las derivadas del campo vectorial, del tensor y el escalar de Ricci (geometría) y de productos cruzados entre ellos. Estos productos cruzados entre geometría y contenido energético son consecuencia del *acoplamiento no mínimo a la gravedad*. La relación causa-efecto entre campos gravitacionales generados por contenido energético tendrá una nueva fuente: los términos cruzados presentes en la acción propuesta (1) para campos vectoriales.

A pesar de estar trabajando con campos vectoriales, se deben garantizar la homogeneidad e isotropía. De aquí que se requiera encontrar las condiciones necesarias para representar  $T_{\mu\nu}$  de forma diagonal, tal que se mantenga la estructura funcional del tensor canónico momentum-energía para un fluido perfecto en el sistema de referencia comóvil, localmente inercial, y cartesiano (Weinberg, 1972):

$$T_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Estas condiciones son proveídas por un adecuado número de campos vectoriales que serán empleados como generadores del proceso inflacionario. Así, logrando que el tensor momentum-energía del modelo propuesto tenga la forma mostrada en (8), se obtendrá presión isotrópica, la cual es condición necesaria para que inflación evolucione espacialmente

de la misma forma que para el caso de campos escalares fundamentales.

## 5. Ecuación de evolución para el parámetro $\rho$

Si el Universo observable es homogéneo e isótropo, se cumple en esta región el principio cosmológico (Dodson, 2003; Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008), base experimental de la cosmología estandar. Para una región del universo que cumpla este principio, el cuadrado del parámetro de Hubble, el cual es definido como  $H = \dot{a}/a$ , viene dado por (Dodson, 2003; Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008):

$$H^2 = \frac{\rho}{3m_p^2}. \quad (9)$$

Esta ecuación, que se deriva de la componente 0-0 de las ecuaciones de campo de Einstein (ec.(6)), se conoce como la ecuación de Friedmann y permite caracterizar la expansión del universo, explicando las observaciones realizadas por Edwin Hubble sobre las velocidades de recesión de las galaxias.

Aplicando la derivada covariante a ambos miembros de las ecuaciones de campo de Einstein (ec.(6)), se obtiene la expresión  $T^{\mu\nu}{}_{;\nu} = 0$ , cuya componente temporal viene dada por

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + P) = 0, \quad (10)$$

y cuyo significado físico es la conservación local del cuadrimomentum (Weinberg, 1972). Esta última expresión es la llamada ecuación de continuidad.

Con el fin de garantizar la homogeneidad e isotropía, se usarán tres campos vectoriales homogéneos, de igual norma, y mutuamente ortogonales (Armendariz-Picon, 2004; Golovnev, Mukhanov & Vanchurin, 2008). La isotropía es obtenida debido a que cada uno de los campos expande el espaciotiempo en su propia dirección con una misma magnitud, lo cual genera una simetría esférica en el proceso. De esta forma, y calculando la parte temporal del tensor  $T^\mu{}_\nu$ , se obtiene:

$$T^0{}_0 = \frac{3}{2} (\dot{B}_k^2 + m^2 B_k^2) = \rho, \quad (11)$$

en donde se ha empleado una convención de suma para los subíndices espaciales (nótese que  $B_k^2$  es entonces igual a  $|\vec{B}|^2$ ). Así, con base en la condición de isotropía y homogeneidad demostrada previamente, ha sido posible generar una ecuación de continuidad para  $\rho$  de la forma especificada en la ec.(10).

Finalmente, reemplazando en la expresión (9) el valor de  $\rho$  obtenido en la ecuación (11), se obtiene

$$H^2 = \frac{1}{2m_p^2} \left( \dot{B}_k^2 + m^2 B_k^2 \right). \quad (12)$$

## 6. Cálculo de la presión $P$

Considerando que el motor inflacionario propuesto se compone de tres campos vectoriales homogéneos, ortogonales entre sí, y con igual norma, se concluye que la expansión generada por ellos debe ser isótropa y homogénea, razón por la cual la presión ejercida por los campos debe ser isótropa igualmente. La parte espacial del tensor  $T^\mu_\nu$  se muestra a continuación:

$$T^i_j = \left( -\frac{3}{2} \dot{B}_k^2 - H B_k \dot{B}_k + \frac{3}{2} m^2 B_k^2 \right) \delta_j^i, \quad (13)$$

en donde se observa que la parte espacial del tensor  $T^\mu_\nu$  sí es diagonal para tres campos ortogonales entre sí, homogéneos, y de igual norma, aun cuando no lo es para un único campo vectorial (en este último caso hay términos adicionales en  $T^i_j$  que no son proporcionales a  $\delta_j^i$  (**Golovnev, Mukhanov & Vanchurin, 2008**)). Este hecho, junto a la expresión para  $T^0_0$ , permite expresar a  $T_{\mu\nu}$  de la forma mostrada en (8). De este modo, la presión isótropa es:

$$P = \frac{3}{2} \left( \dot{B}_k^2 - m^2 B_k^2 \right). \quad (14)$$

Aplicando las definiciones de  $P$  y  $\rho$  en la ecuación de continuidad presentada en (10), se recupera la ecuación de evolución temporal en (5) para los campos vectoriales que se proponen como motor de inflación.

## 7. Inflación del tipo Slow-Roll con tres campos vectoriales

La inflación mediante campos escalares requiere que el campo escalar genere un régimen de slow-roll durante el cual la magnitud del campo es casi invariante, lo cual se logra si se imponen las siguientes condiciones:

$$\epsilon = -\frac{\dot{H}}{H^2} \ll 1, \quad (15)$$

$$|\eta| = \left| \frac{V''(\phi)}{3H^2} \right| \ll 1, \quad (16)$$

en donde  $\epsilon$  y  $\eta$  son conocidos como los parámetros de slow-roll (**Dodelson, 2003; Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov,**

**2005; Weinberg, 2008**) (una prima denota una derivada del potencial  $V(\phi)$  con respecto al campo escalar  $\phi$ ). A partir de las condiciones de slow-roll asociadas a la inflación con campos escalares, es posible hacer una generalización de las mismas para el caso vectorial (**Golovnev, Mukhanov & Vanchurin, 2008; Zhang, 2009**) la cual se muestra en la tabla 1:

Inflación Escalar	Inflación Vectorial
$\dot{\phi}^2 \ll V(\phi)$	$\dot{B}_k^2 \ll \frac{1}{2} m^2 B_k^2$
$ \dot{\phi}  \ll 3H \phi $	$ \dot{B}_k  \ll 3H B_k $

Tabla 1. Condiciones de Slow-Roll para inflación escalar y vectorial.

Si se reemplaza en el parámetro de slow-roll  $\epsilon$  (15) el parámetro de Hubble (12) asociado al modelo con tres campos vectoriales, se obtiene:

$$\epsilon = -\frac{\sqrt{2}m_P}{2} \frac{d}{dt} \left[ \frac{\left( \dot{B}_k^2 + m^2 B_k^2 \right)}{\left( \dot{B}_k^2 + m^2 B_k^2 \right)^{3/2}} \right]. \quad (17)$$

Si a la expresión anterior se le aplican las condiciones de slow-roll vectoriales presentadas en la tabla 1, el valor del parámetro  $\epsilon$  viene dado por:

$$\epsilon = \frac{2}{3} \frac{m_P^2}{B_k^2}, \quad (18)$$

en donde se observa que desaparece la dependencia con la masa del campo vectorial para el parámetro mencionado. Si ahora se aplica la condición  $\epsilon \ll 1$  (**Zhang, 2009**), se reescribe la condición de slow-roll en términos de la magnitud del campo vectorial:

$$|\vec{B}| \gg \sqrt{\frac{2}{3}} m_p. \quad (19)$$

Esta condición se impone sobre la magnitud de los tres campos vectoriales simultáneamente para que la inflación sea del tipo slow-roll. La razón más importante para que sea tan deseable que el modelo inflacionario sea de este tipo es lograr consistencia con los resultados observacionales, específicamente los relacionados con el origen de las estructuras a gran escala y más concretamente aquellos concernientes al índice espectral del espectro de la perturbación en la curvatura (**Dodelson, 2003; Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008**). Inflación sólo permite explicar el origen de las estructuras a gran escala con base en la preexistencia de anisotropías en la distribución del contenido energético. Para más detalles respecto al mecanismo de formación y evolución de las mencionadas estructuras véase las referencias (**Dodelson, 2003; Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008**).



Con respecto al parámetro  $\eta$ , definido en la ec.(16), su posible extensión al caso de campos vectoriales, para el tipo de acción presentada en la ec.(1), está dada por (Zhang, 2009):

$$\eta = \frac{V''(|\vec{B}|)}{3H^2}, \quad (20)$$

en donde ahora una prima denota una derivada con respecto a la norma del campo vectorial, y  $V(|\vec{B}|)$  para el modelo en discusión es  $V(|\vec{B}|) = \frac{1}{2}m^2 B_k^2$ . Teniendo en cuenta la expresión (12) y las condiciones de slow-roll vectoriales presentadas en la tabla 1, se obtiene

$$\eta = \frac{2 m_P^2}{3 B_k^2}, \quad (21)$$

con lo cual se observa que  $\eta = \epsilon$  y, por lo tanto, la condición  $|\eta| \ll 1$  es satisfecha gracias a la ec.(19).

## 8. Monto de inflación vectorial

El número de efolds  $N$ , llamado también monto de inflación, es una medida que determina qué tanto se ha expandido el espacio debido al mecanismo de inflación. La cantidad de efolds que se obtienen mediante el mecanismo de inflación vectorial propuesto se obtiene a partir de la definición presentada a continuación:

$$N = \ln \frac{a_f}{a_i} = \int_{t_i}^{t_f} H dt, \quad (22)$$

en donde  $a_i$  y  $a_f$  representan el parámetro de expansión al inicio y al final de inflación respectivamente. Introduciendo la expresión para  $H$ , dada en la ecuación (12), en la definición de  $N$  se obtiene:

$$N = \frac{3}{4m_P^2} (B_i^2 - B_f^2), \quad (23)$$

en donde  $B_i$  y  $B_f$  son las magnitudes de los campos vectoriales al inicio y al final de inflación respectivamente.

Encontrando el valor de  $N$ , el cual debe satisfacer  $N \gtrsim 62$  para resolver los problemas clásicos de la cosmología estándar (Lyth & Liddle, 2009), es posible cuantificar la expansión generada por los tres campos vectoriales homogéneos, ortogonales entre sí, y de igual norma. Utilizando la condición de slow-roll encontrada en (19), la anterior expresión se puede reescribir de la siguiente forma:

$$N = \frac{3}{4m_P^2} B_i^2, \quad (24)$$

en donde la magnitud del campo al final de inflación se ha ignorado debido a que su valor es despreciable en comparación con su valor al inicio.

## 9. Solución a los problemas clásicos de la cosmología estándar

Conociendo el monto de inflación en términos de la magnitud inicial de cada uno de los tres campos vectoriales, es posible encontrar un valor específico para dicha magnitud aplicando la condición  $N \gtrsim 62$  e-folds tal que se solucionen los problemas de horizonte, planitud, y reliquias no deseadas (Lyth & Liddle, 2009).

$$N = \frac{3}{4m_P^2} B_i^2 \gtrsim 62, \quad (25)$$

$$\Rightarrow B_i \gtrsim \sqrt{\frac{248m_P^2}{3}} \approx 9,1 m_P. \quad (26)$$

El valor encontrado en la expresión anterior, en términos de la masa reducida de Planck, es la magnitud mínima que cada uno de los tres campos vectoriales debe tener al inicio de inflación para que el mecanismo de expansión acelerada solucione los problemas clásicos de la cosmología estándar.

Es importante notar que la condición encontrada en esta sección mantiene el modelo de inflación vectorial propuesto en el régimen de slow-roll tal como puede confirmarse al comparar con la ec.(19). También es de anotar que la expresión (26) comparada con la magnitud de los campos vectoriales al final de inflación,  $B_f \simeq \sqrt{\frac{2}{3}}m_P$  (relación obtenida a partir de la ec.(19) identificando el final de inflación con la violación de las condiciones de slow-roll), da cuenta del por qué, hacia el final de la sección anterior, se despreció  $B_f$  con respecto a  $B_i$ .

## 10. Conclusiones

1. El mecanismo de inflación es un proceso físico que permite explicar la evolución del contenido energético de la región correspondiente al universo observable para nosotros hoy en día. Aun cuando su duración puede ser ínfima, con una cota mínima de  $10^{-36}$  s (Rodríguez, 2009), su efecto es dramático ya que aumenta la distancia coordinada entre dos puntos inicialmente separados  $d_0$  por un factor mínimo de  $8,4 \times 10^{26} d_0$  (Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008).
2. Es muy importante tener presente que el proceso inflacionario sólo es aplicable a grandes escalas, lo que implica que a escalas del sistema solar y del planeta tierra esta expansión es imperceptible. Si el Universo se estuviese expandiendo en todas las escalas espaciales, no habría forma de detectar dicha expansión pues alteraría incluso los sistemas de medición que se diseñaran para detectarla.

3. Una limitante importante para defender propuestas inflacionarias basadas en el uso de campos escalares fundamentales es la no observación de este tipo de campos en la naturaleza (**Nakamura et al.**, 2010). Una alternativa a la propuesta escalar es dar arranque al motor inflacionario mediante campos vectoriales fundamentales. Estos campos son comunes en el universo, como ejemplo se pueden citar el campo vectorial asociado al fotón o a los bosones  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z^0$ .
4. El motor inflacionario vectorial genera una dificultad natural: la anisotropía inherente a la dirección en la que evoluciona el campo vectorial fundamental, impidiendo que se cumpla el principio cosmológico. Esta dificultad, como se mostró en el presente artículo, puede eliminarse si se toman tres campos vectoriales homogéneos, de igual norma, y ortogonales entre sí (**Armendariz-Picon**, 2004; **Golovnev, Mukhanov & Vanchurin**, 2008), de modo que el proceso de expansión ocurra de la misma forma en todas las direcciones, emulando así el mismo proceso de expansión inflacionaria con campos escalares.
5. Es necesario que inflación vectorial solucione los problemas de la cosmología estandar para considerar el modelo como una opción viable, específicamente hablando los problemas de horizonte, de planitud, y de reliquias no deseadas. Una forma para determinar si el modelo inflacionario soluciona estos problemas es a través del monto de inflación. La cota mínima para solucionar estos problemas es 62 e-folds de inflación (**Lyth & Liddle**, 2009), y esto se asegura para el modelo inflacionario propuesto si cada campo vectorial posee una magnitud inicial bien definida de aproximadamente nueve veces la masa reducida de Planck.
6. Entre los modelos inflacionarios, los que más aceptación han tenido en la comunidad científica son los de tipo slow-roll en donde el campo rueda lentamente a lo largo de la pendiente impuesta por el potencial (**Dodelson**, 2003; **Lyth & Liddle**, 2009; **Mukhanov**, 2005; **Weinberg**, 2008). Son los modelos más aceptados porque este tipo de mecanismos permiten obtener al final del período inflacionario las condiciones necesarias para que el universo observable continúe evolucionando hacia las estructuras a gran escala que observamos hoy en día (**Lyth & Liddle**, 2009; **Rodríguez**, 2009). El modelo de inflación estudiado en este artículo logra cumplir las condiciones necesarias para ser catalogado como un modelo inflacionario del tipo slow-roll.

## Agradecimientos

Y.R. cuenta con el apoyo financiero de COLCIENCIAS mediante proyecto de investigación número 1102-487-25992 CT-460-2009, y de la DIF (UIS) mediante proyecto de investigación número 5177.

## Referencias

- Armendariz-Picon**, C., 2004. Could dark energy be vector-like?, *JCAP* **0407**, 007.
- Dimopoulos K., Karčiauskas M., Lyth D. H. & Rodríguez Y.**, 2009. Statistical anisotropy of the curvature perturbation from vector field perturbations, *JCAP* **0905**, 013.
- Dodelson S.**, 2003. *Modern cosmology*, Elsevier Academic Press, London - UK.
- Ford H.**, 1989. Inflation driven by a vector field, *Phys. Rev. D* **40**, 967.
- Golovnev A., Mukhanov V. & Vanchurin V.**, 2008. Vector inflation, *JCAP* **0806**, 009.
- 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.
- Guth A. H.**, 1981. The inflationary Universe: a possible solution to the horizon and flatness problems, *Phys. Rev. D* **23**, 347.
- Kane G.**, 1993. *Modern elementary particle physics*, Addison Wesley, Redwood City - USA.
- Komatsu E. et al.**, 2011. Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: cosmological interpretation, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **192**, 18.
- Lyth D. H. & Liddle A. R.**, 2009. *The primordial density perturbation: cosmology, inflation and the origin of structure*, Cambridge University Press, Cambridge - UK.
- Mukhanov V. F.**, 2005. *Physical foundations of cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge - UK.
- Nakamura K. et al.**, 2010. Review of particle physics, *J. Phys. G* **37**, 075021.
- The PLANCK Collaboration**, 2006. The scientific programme of PLANCK, arXiv:astro-ph/0604069.
- Rodríguez Y.**, 2009. The origin of the large-scale structure in the Universe: theoretical and statistical aspects, LAP - Lambert Academic Publishing, Saarbrücken - Germany. También disponible como PhD Thesis, Lancaster University, Lancaster - UK, 2005. arXiv:astro-ph/0507701.
- Weinberg S.**, 1972. *Gravitation and Cosmology*, John Wiley & Sons, New York - USA.
- Weinberg S.**, 2008. *Cosmology*, Oxford University Press, Oxford - UK.
- Zhang Y.**, 2009. The slow-roll and rapid-roll conditions in the space-like vector field scenario, *Phys. Rev. D* **80**, 043519.

Recibido: abril 1 de 2011.

Aceptado para su publicación: junio 15 de 2011.



# ANISOTROPÍA ESTADÍSTICA, NO GAUSSIANIDAD, Y PERTURBACIONES EN CAMPOS VECTORIALES

César A. Valenzuela-Toledo<sup>#1</sup>, Yeinzon Rodríguez<sup>#2,3</sup>

## Resumen

**Valenzuela-Toledo, C. A., Y. Rodríguez:** Anisotropía estadística, no gaussianidad, y perturbaciones en campos vectoriales. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (135): 175-187, 2011. ISSN 0370-3908.

Se estudian los descriptores estadísticos (nivel de anisotropía estadística y niveles de no gaussianidad) de la perturbación primordial en la curvatura  $\zeta$  para modelos cosmológicos inflacionarios que incluyen campos escalares y vectoriales, estos últimos propuestos para incluir violaciones de la isotropía estadística. Para estos modelos se encuentra que es posible obtener relaciones de consistencia entre los descriptores estadísticos, los cuales poseen una contraparte observacional y que por ende permiten validar o desechar un modelo teórico. Finalmente se muestra que los resultados obtenidos están de acuerdo con los datos observacionales más recientes. Como un subproducto de este estudio, presentamos en este artículo la definición del verdadero principio cosmológico.

**Palabras clave:** cosmología, anisotropía estadística, no gaussianidad, perturbación primordial en la curvatura.

#1 Departamento de Física, Universidad del Valle, Ciudad Universitaria Meléndez, Santiago de Cali 760032, Colombia, Correo electrónico: cesar.valenzuela@correounivalle.edu.co

#2 Vicerrectoría de Ciencia, Tecnología, e Innovación, Universidad Antonio Nariño, Cra. 3 Este # 47A-15, Bogotá D.C. 110231, Colombia, Correo electrónico: yeinzon.rodriguez@uan.edu.co

#3 Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Ciudad Universitaria, Bucaramanga 680002, Colombia, Correo electrónico: yrodrig@uis.edu.co

### Abstract

We study the statistical descriptors (the level of statistical anisotropy and the levels of non-gaussianity) of the primordial curvature perturbation  $\zeta$  for cosmological inflationary models that include scalar fields as well as vector fields, the latter being proposed to include violations of the statistical isotropy. It is found for these models that it is possible to obtain consistency relations among the statistical descriptors, which possess an observational counterpart and that therefore allow us to keep or reject a theoretical model. Finally, we show that the obtained results agree with the most recent observational data. As a byproduct of this study, we present in this paper the definition of the true cosmological principle.

**Key words:** Cosmology, Statistical anisotropy, Non-gaussianity, Primordial curvature perturbation.

## 1. Introducción

El desarrollo de la cosmología moderna centra sus esfuerzos en el principio cosmológico, aquél que señala que el Universo luce igual en todas las direcciones (isótropo) con respecto a cualquier región de volumen superior a  $10^6$  Mpc<sup>3</sup>, y en consecuencia luce igual en cada una de estas regiones (homogéneo)<sup>#4</sup>. Generalmente se piensa que el principio cosmológico tuvo sus orígenes en la observación, pero es bien sabido que las observaciones de la distribución de galaxias en escalas mayores a 100 Mpc datan de no más de dos décadas atrás, así como los datos de radiación cósmica de fondo (RCF) datan desde la década de los 60's. En realidad el principio cosmológico es resultado de una línea de pensamiento filosófico establecida en la época de los antiguos griegos, el cual coincidentalmente terminó siendo coherente con las observaciones modernas. Sin embargo, ¿qué podemos entender como un Universo isótropo con respecto a todas las regiones (y por lo tanto homogéneo) a grandes escalas? Si dividimos el Universo en cubos de volumen de unos pocos Megaparsecs cúbicos, encontraremos que la densidad de energía puede variar considerablemente de cubo a cubo; esto por supuesto implica que el Universo a esta escala no es homogéneo y por ende no es isótropo con respecto a todos los cubos. Por el contrario, si se divide el Universo en cubos de volumen superior a los  $10^6$  Mpc<sup>3</sup>, se podrá observar que en promedio el Universo luce homogéneo e isótropo con respecto a todos los cubos. Lo anterior nos invita a fundamentar todos nuestros desarrollos en cosmología: la métrica de Friedmann-Robertson-Walker (FRW), las ecuaciones de Friedmann y de continuidad, la evolución postinflacionaria del Universo, el proceso de nucleosíntesis, etc., a partir del sacro principio cosmológico. Con respecto al primer punto, la métrica de FRW se construye a partir de la simetría de

invarianza ante rotaciones espaciales (Weinberg, 1972) (la cual realmente es la definición formal de isotropía) con respecto a todos los puntos, que a su vez implica la simetría de invarianza ante translaciones espaciales (Mukhanov, 2005) (la cual realmente es la definición formal de homogeneidad). La estructura a gran escala que observamos hoy en día es el resultado de la evolución de perturbaciones en la densidad de energía en un fondo absolutamente isótropo con respecto a todos los puntos y por consiguiente homogéneo (de ahí que dicho fondo venga descrito por la métrica de FRW). El principio cosmológico, como un producto de la observación y no de la filosofía, *no corresponde* al conjunto de simetrías descritas anteriormente asociadas al fondo sino al mismo conjunto de simetrías asociadas a la estructura a gran escala observada. Puesto que en este caso este conjunto de simetrías no se respeta, pero aún así podemos hablar *en promedio* de homogeneidad e isotropía con respecto a todos los cubos, es necesario definir claramente qué entendemos por principio cosmológico.

La primera parte de este artículo (Sección 2) está dedicada a la formulación clara del principio cosmológico en términos de lo que se denomina la homogeneidad e isotropía estadística. Para ello se introducirán los correladores de  $n$  puntos en perturbaciones cosmológicas que son base fundamental para el estudio de los mecanismos que dan origen a las estructuras a gran escala. Estos correladores describen la estadística de las estructuras presentes y por consiguiente pueden darnos información acerca de posibles desviaciones del (no tan) sacro principio cosmológico, así como del carácter gaussiano o no gaussiano de tales estructuras. En la actualidad poseemos pistas que nos conducen a pensar que existen violaciones tanto de la homogeneidad como de la isotropía estadística hasta un máximo relativo del 10 % (Groeneboom, Ackerman, Wehus, & Eriksen, 2010; Hansen *et. al.*, 2009;

<sup>#4</sup>En este caso se dice que el Universo es homogéneo e isótropo *a gran escala*. El conjunto de palabras "gran escala" hace referencia al hecho de que se está considerando regiones del Universo de volumen superior a  $10^6$  Mpc<sup>3</sup>.

**Hoftuft et. al.**, 2009). Tales pistas serán discutidas en la Sección 3.

Si bien violaciones en la homogeneidad estadística son posibles de acuerdo a lo discutido en la Sección 3, son las violaciones en la isotropía estadística las que más se han estudiado hasta el momento (debido a que la ausencia de homogeneidad estadística nos impediría contrastar los resultados derivados de los diferentes modelos cosmológicos con las observaciones vía el teorema ergódico<sup>#5</sup>). La anisotropía estadística se genera simultáneamente por cierto monto de expansión anisótropa pero también por la naturaleza anisótropa de los campos involucrados en el mecanismo de expansión inflacionaria. Varios tipos de campos han sido estudiados hasta el momento con el fin de generar este efecto: campos vectoriales (véase por ejemplo (**Golovnev, Mukhanov, & Vanchurin**, 2008b)), campos espinoriales (**Böhmer & Mota**, 2008), p-formas (**Germani & Kehagias**, 2009), pero en este artículo sólo nos concentraremos en el primer tipo, realizando en la Sección 3 una introducción a la anisotropía estadística y la no gaussianidad en modelos inflacionarios que involucran campos vectoriales.

La distribución de las estructuras a gran escala en el Universo ha sido bien estudiada por las sondas galácticas (**Aihara et. al.**, 2011) y por las misiones espaciales dedicadas a estudiar la RCF (**Komatsu et. al.**, 2011). Se ha concluido que el perfil de distribución de densidad de energía, así como el de temperatura de la RCF, es prácticamente gaussiano. Sin embargo, los mismos resultados observacionales son consistentes con pequeñas desviaciones con respecto a la gaussianidad exacta, con una cota superior del orden de una parte en  $10^3$  (**Komatsu et. al.**, 2011). Normalmente los modelos inflacionarios convencionales (aquéllos basados en campos escalares y que por consiguiente respetan la homogeneidad e isotropía estadística a través del teorema del no cabello cósmico (**Starobinsky**, 1983; **Wald**, 1983)) pueden desviarse de la gaussianidad exacta hasta en una parte en  $10^7$  (**Komatsu**, 2010), haciendo que sea imposible someterlos a la prueba observacional y discriminar entre ellos en vista de la actual precisión experimental. En contraste, los modelos inflacionarios que involucran campos vectoriales pueden fácilmente generar niveles de no gaussianidad apreciables, altamente anisótropos, pero aún consistentes con las cotas observacionales (**Karčiauskas, Dimopoulos & Lyth**, 2009; **Valenzuela-Toledo & Rodríguez**, 2010; **Valenzuela-Toledo, Rodríguez, & Lyth**, 2009), perteneciendo de esta manera al selecto grupo de modelos que pueden ser discriminados mediante estas pruebas. En las Secciones 4 y 5 se discuten los aspectos más importantes concernientes a la generación de no gaussianidad primordial en modelos inflacio-

narios con campos vectoriales, enfatizando en la Sección 5 en la tremenda utilidad que tendrían las relaciones de consistencia entre el nivel de anisotropía estadística y los niveles de no gaussianidad en la puesta a prueba de los modelos inflacionarios que involucran campos vectoriales a la luz de las observaciones.

## 2. El principio Cosmológico: homogeneidad e isotropía estadística

Las existencia de galaxias, cúmulos, supercúmulos, filamentos, pero también de regiones de espacio vacío claramente nos enseña que nuestro Universo no es homogéneo y en consecuencia no es isótropo con respecto a todos los puntos. Por esta razón nuestro Universo no puede ser descrito mediante la métrica de FRW. Sin embargo, las mismas observaciones nos han enseñado también que las estructuras presentes pueden ser descritas adecuadamente a través de perturbaciones en esta métrica. El procedimiento a seguir es asignar un sistema coordenado cartesiano a nuestro espacio-tiempo de tal manera que en cada hipersuperficie de tiempo  $t$  constante la densidad de energía sea uniforme, exigir que las líneas descritas por coordenadas espaciales  $\mathbf{x}$  constantes sean líneas de mundo de observadores típicos en caída libre, y hacer uso de la suposición de universos separados (**Dimopoulos, Karčiauskas, Lyth & Rodríguez**, 2009; **Lyth & Liddle**, 2009) que permite describir cada punto del espacio en escalas de superhorizonte como si fuese un universo separado el cual evoluciona localmente de forma homogénea. Así, la parte espacial de la métrica de FRW perturbada viene descrita por:

$$g_{ij} \equiv a^2(t)e^{2\zeta(t,\mathbf{x})}\gamma_{ij}(t,\mathbf{x}), \quad (1)$$

en donde  $a(t)$  es el parámetro de expansión global,  $\zeta$  es la perturbación en la curvatura, y  $\gamma_{ij}$  es una cantidad que da cuenta de las perturbaciones tensoriales y cuyo determinante es igual a uno<sup>#6</sup>. La perturbación en la curvatura  $\zeta$  es la cantidad más importante en cosmología; es mediante ella que podemos describir la estadística de las estructuras a gran escala, y es precisamente ella la que nos permitirá definir adecuadamente el principio cosmológico.

Como se discutió en la Introducción, si dividimos el Universo en cubos de volumen mayor a  $10^6 \text{ Mpc}^3$  encontraremos que la distribución del contenido energético es en promedio similar en cada cubo. De allí que digamos que el Universo es *homogéneo*, pero esta palabra “homogéneo” debemos entenderla en relación con la *homogeneidad estadística*. De

<sup>#5</sup>El teorema ergódico, y las hipótesis que conducen a éste, se presentan y discuten en (**Weinberg**, 2008).

<sup>#6</sup>Cuando  $\gamma_{ij}$  depende del tiempo, la expansión es anisótropa (**Dimopoulos, Karčiauskas, Lyth & Rodríguez**, 2009).

manera similar, podemos decir que el Universo es *isótropo* con respecto a todos los cubos, pero esta palabra “isótropo” debemos entenderla en relación con la *isotropía estadística*. La siguiente subsección presenta las respectivas definiciones de homogeneidad estadística e isotropía estadística que dan cuenta del verdadero principio cosmológico, así como la definición de gaussianidad que se empleará más adelante en este artículo.

## 2.1. Homogeneidad estadística, isotropía estadística, y gaussianidad

La mecánica cuántica sólo nos permite predecir las probabilidades de diferentes resultados después de un experimento en un ensamble de sistemas, en contraste con la mecánica clásica la cual sí nos permite predecir el resultado exacto después de un experimento en sólo un elemento del ensamble. Puesto que el mecanismo físico subyacente en la generación de perturbaciones cosmológicas es de naturaleza cuántica, los cosmólogos están más interesados en estudiar las propiedades estadísticas de un mapa de perturbaciones, dígase el mapa de la RCF o el mapa de la distribución de galaxias. La manera de hacer esto es vía los correladores de  $n$  puntos de las perturbaciones en el espacio real. Realicemos una expansión en integral de Fourier de  $\zeta(\mathbf{x})$  en el espacio real:

$$\zeta(\mathbf{x}) \equiv \int \frac{d^3 k}{(2\pi)^3} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}} \zeta(\mathbf{k}), \quad (2)$$

en donde  $\zeta(\mathbf{k})$  es un modo de Fourier genérico de  $\zeta(\mathbf{x})$ . Los correladores de  $n$  puntos de  $\zeta(\mathbf{x})$  son promedios sobre el ensamble de los productos  $\zeta(\mathbf{x}_1)\zeta(\mathbf{x}_2)\dots\zeta(\mathbf{x}_n)$  en donde  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n$  representan diferentes puntos en el espacio<sup>#7</sup>:

$$\begin{aligned} \langle \zeta(\mathbf{x}_1)\zeta(\mathbf{x}_2)\dots\zeta(\mathbf{x}_n) \rangle \equiv \\ \int \frac{d^3 k_1}{(2\pi)^3} \frac{d^3 k_2}{(2\pi)^3} \dots \frac{d^3 k_n}{(2\pi)^3} e^{i(\mathbf{k}_1\cdot\mathbf{x}_1 + \mathbf{k}_2\cdot\mathbf{x}_2 + \dots + \mathbf{k}_n\cdot\mathbf{x}_n)} \times \\ \times \langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_2)\dots\zeta(\mathbf{k}_n) \rangle. \end{aligned} \quad (3)$$

Así, las funciones de correlación en el espacio real pueden ser estudiadas vía las funciones de correlación en el espacio de momentum. Veamos ahora el significado de homogeneidad estadística, isotropía estadística, y gaussianidad.

### Homogeneidad estadística

Por supuesto el mapa de perturbaciones no es homogéneo (i.e., invariante bajo translaciones espaciales), pero puede ser que la función de distribución de probabilidad que gobierna a  $\zeta(\mathbf{x})$  sí lo sea, lo cual es llamado homogeneidad estadística

(Abramo & Pereira, 2010; Lyth & Liddle, 2009; Weinberg, 2008). Esto significa que los correladores de  $n$  puntos en el espacio real son invariantes bajo translaciones en el espacio, i.e.

$$\langle \zeta(\mathbf{x}_1 + \mathbf{d})\zeta(\mathbf{x}_2 + \mathbf{d})\dots\zeta(\mathbf{x}_n + \mathbf{d}) \rangle = \langle \zeta(\mathbf{x}_1)\zeta(\mathbf{x}_2)\dots\zeta(\mathbf{x}_n) \rangle, \quad (4)$$

en donde  $\mathbf{d}$  es algún vector en el espacio real que establece el monto de la translación espacial. La única forma de lograr esto, en vista de la Ec. (3), es expresar el argumento de la función exponencial dentro de la integral con la suma de varios términos de la forma  $f(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)$ , lo cual es a su vez posible (pero no es la única posibilidad) si los correladores de  $n$  puntos en el espacio de momentum son proporcionales a la función delta de Dirac:

$$\langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_2)\dots\zeta(\mathbf{k}_n) \rangle \equiv (2\pi)^3 \delta^3(\mathbf{k}_{12\dots n}) M_\zeta(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \dots, \mathbf{k}_n). \quad (5)$$

En la anterior expresión,  $\mathbf{k}_{12\dots n}$  significa  $\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 + \dots + \mathbf{k}_n$ , y la función  $M_\zeta(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \dots, \mathbf{k}_n)$  es llamada el  $(n-1)$ -espectro. La homogeneidad estadística es absolutamente necesaria como una hipótesis del teorema ergódico (Weinberg, 2008); de otra manera, aunque sí disponemos de un marco teórico para hacer cálculos y aunque sí disponemos de un monto significativo de datos observacionales con precisión sin precedentes, no podríamos comparar lo uno con lo otro.

### Isotropía estadística

Una vez la homogeneidad estadística ha sido asegurada, en la forma de la Ec. (5), nos preguntamos acerca de la invarianza ante rotaciones espaciales (i.e. isotropía). De nuevo por supuesto, el mapa de las perturbaciones no es isótropo, pero puede que la función de distribución de probabilidad que gobierna a  $\zeta(\mathbf{x})$  sí lo sea, lo cual es llamado isotropía estadística (Abramo & Pereira, 2010; Lyth & Liddle, 2009; Weinberg, 2008). Esto significa que los correladores de  $n$  puntos en el espacio real son invariantes bajo rotaciones en el espacio, i.e.

$$\langle \zeta(\tilde{\mathbf{x}}_1)\zeta(\tilde{\mathbf{x}}_2)\dots\zeta(\tilde{\mathbf{x}}_n) \rangle = \langle \zeta(\mathbf{x}_1)\zeta(\mathbf{x}_2)\dots\zeta(\mathbf{x}_n) \rangle, \quad (6)$$

en donde  $\tilde{\mathbf{x}}_i = \mathcal{R} \mathbf{x}_i$ , siendo  $\mathcal{R}$  un operador de rotación. Para satisfacer el anterior requerimiento, el  $(n-1)$ -espectro debe satisfacer la condición

$$M_\zeta(\tilde{\mathbf{k}}_1, \tilde{\mathbf{k}}_2, \dots, \tilde{\mathbf{k}}_n) = M_\zeta(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \dots, \mathbf{k}_n), \quad (7)$$

en donde las tildes sobre los momentums representan también una rotación espacial, parametrizada por  $\mathcal{R}$ , en el espacio de momentum. Esta condición tiene consecuencias

<sup>#7</sup>El promedio sobre el ensamble dentro de la integral es sobre los modos de Fourier solamente puesto que ellos son las variables estocásticas.

más explícitas en el espectro (1-espectro) y el biespectro (2-espectro):

$$M_{\zeta}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2) \equiv P_{\zeta}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2) = P_{\zeta}(k), \quad (8)$$

$$M_{\zeta}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3) \equiv B_{\zeta}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3) = B_{\zeta}(k_1, k_2, k_3), \quad (9)$$

en donde en la primera línea  $k = |\mathbf{k}_1| = |\mathbf{k}_2|$ , y en la segunda línea  $k_i = |\mathbf{k}_i|$ . A partir del triespectro (3-espectro), la condición en la Ec. (7) acerca de la isotropía estadística en todos los  $(n - 1)$ -espectros de más alto orden no puede ser reducida a condiciones similares a aquéllas en las Ecs. (8) y (9), de tal manera que la forma mínima de parametrizar los  $(n - 1)$ -espectros (con  $n \geq 4$ ) será siempre en términos de todos los  $n$  vectores de onda.

### Gaussianidad

La gaussianidad puede ser definida ya sea vía las perturbaciones  $\zeta(\mathbf{x})$  en el espacio real o vía las perturbaciones  $\zeta(\mathbf{k})$  en el espacio de momentum. Hablemos primero acerca de las últimas y luego regresaremos sobre las primeras. Decimos que la función de distribución de probabilidad que gobierna a  $\zeta(\mathbf{k})$  es gaussiana si para diferentes vectores de onda las perturbaciones no están correlacionadas:<sup>#8</sup>

$$\langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_2) \rangle = (2\pi)^3 \delta^3(\mathbf{k}_{12}) P_{\zeta}(\mathbf{k}_1), \quad (10)$$

y si los correladores de  $n$  puntos, con  $n$  siendo impar, son cero, mientras que aquéllos con  $n$  siendo par son iguales a la suma sobre todas las formas de aparear  $\zeta(\mathbf{k})$ s con cada uno de los otros de un producto de correladores de dos puntos de los pares<sup>#9</sup> (Lyth & Liddle, 2009; Weinberg, 2008):

$$\langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_2)\zeta(\mathbf{k}_3) \rangle = 0, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_2)\zeta(\mathbf{k}_3)\zeta(\mathbf{k}_4) \rangle &= \langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_2) \rangle \langle \zeta(\mathbf{k}_3)\zeta(\mathbf{k}_4) \rangle + \\ &+ \langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_3) \rangle \langle \zeta(\mathbf{k}_2)\zeta(\mathbf{k}_4) \rangle + \\ &+ \langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_4) \rangle \langle \zeta(\mathbf{k}_2)\zeta(\mathbf{k}_3) \rangle \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} &= (2\pi^6) \delta^3(\mathbf{k}_{12}) \delta^3(\mathbf{k}_{34}) \times \\ &\times P_{\zeta}(\mathbf{k}_1) P_{\zeta}(\mathbf{k}_3) + 2 \text{ p.}, \end{aligned} \quad (13)$$

y así sucesivamente, en donde 2 p. significa dos permutaciones. Las Ecs. (10) y (13) muestran claramente que la homogeneidad estadística es una condición necesaria mas no suficiente para que la función de distribución de probabilidad que gobierna a  $\zeta(\mathbf{k})$  sea gaussiana (Dimopoulos, Karčiauskas, Lyth & Rodríguez, 2009; Lyth & Liddle, 2009). Ahora, regresando a las perturbaciones  $\zeta(\mathbf{x})$  en el espacio real, es posible mostrar que la condición de gaussianidad expresada arriba implica que la función de distribución de probabilidad

$P(\zeta(\mathbf{x}))$  está dada por

$$P(\zeta(\mathbf{x})) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \langle \zeta^2(\mathbf{x}) \rangle}} e^{-\zeta^2(\mathbf{x})/2\langle \zeta^2(\mathbf{x}) \rangle}, \quad (14)$$

la cual es la definición usual de una función de distribución de probabilidad gaussiana. Sin embargo, exigiendo que las Ecs. (11), (12), y así sucesivamente se satisfagan para  $\zeta(\mathbf{x})$ , en vez de para  $\zeta(\mathbf{k})$ , también da lugar a la Ec. (14) sin requerir gaussianidad en los modos  $\zeta(\mathbf{k})$ . En otras palabras, la gaussianidad en  $\zeta(\mathbf{k})$  es una condición suficiente pero no necesaria para la gaussianidad en  $\zeta(\mathbf{x})$ ; de hecho, vía el teorema del límite central (Adler, 1981; Karlin & Taylor, 1975),  $\zeta(\mathbf{x})$  puede llegar a ser gaussiana simplemente si es expresada como una suma de cantidades no correlacionadas ( $\zeta(\mathbf{k})$ ) incluso si ellas no son gaussianas.

Cuando las perturbaciones  $\zeta(\mathbf{k})$  no son gaussianas, pero aún asumiendo homogeneidad estadística, los correladores de  $n$  puntos en el espacio de momentum, con  $n \geq 3$ , son expresados en términos de los correladores de  $n$  puntos "conectados" (identificados con el subíndice  $c$ ) los cuales establecen la desviación de la condición de gaussianidad:

$$\langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_2) \rangle = (2\pi)^3 \delta^3(\mathbf{k}_{12}) P_{\zeta}(\mathbf{k}_1), \quad (15)$$

$$\langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_2)\zeta(\mathbf{k}_3) \rangle = \langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_2)\zeta(\mathbf{k}_3) \rangle_c \quad (16)$$

$$= (2\pi)^3 \delta^3(\mathbf{k}_{123}) B_{\zeta}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3), \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_2)\zeta(\mathbf{k}_3)\zeta(\mathbf{k}_4) \rangle &= \langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_2)\zeta(\mathbf{k}_3)\zeta(\mathbf{k}_4) \rangle_c + \\ &+ \langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_2) \rangle \langle \zeta(\mathbf{k}_3)\zeta(\mathbf{k}_4) \rangle + \\ &+ \langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_3) \rangle \langle \zeta(\mathbf{k}_2)\zeta(\mathbf{k}_4) \rangle + \\ &+ \langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_4) \rangle \langle \zeta(\mathbf{k}_2)\zeta(\mathbf{k}_3) \rangle \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} &= (2\pi)^3 \delta^3(\mathbf{k}_{1234}) T'_{\zeta}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4) + \\ &+ (2\pi^6) \delta^3(\mathbf{k}_{12}) \delta^3(\mathbf{k}_{34}) \times \\ &\times P_{\beta}(\mathbf{k}_1) P_{\beta}(\mathbf{k}_3) + 2 \text{ p.}, \end{aligned} \quad (19)$$

y así sucesivamente. En las anteriores expresiones,  $B_{\zeta}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3)$  y  $T'_{\zeta}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$  son llamados el biespectro y triespectro conectados de  $\zeta$ .

### 3. Anisotropía estadística y no gaussianidad en modelos inflacionarios que involucran campos vectoriales

Las propiedades de las anisotropías en la temperatura de la RCF se han convertido en uno de los campos de estudio más relevantes de la cosmología moderna (Lyth & Liddle, 2009; Weinberg, 2008), particularmente porque son utilizadas para discriminar entre los diferentes modelos cosmológicos propuestos para la formación de estructuras a gran escala

<sup>#8</sup>Para iguales vectores de onda, la condición de realidad sobre  $\zeta(\mathbf{x})$  aplica y, por lo tanto, hay autocorrelación.

<sup>#9</sup>La suma sobre los apareamientos no distingue aquéllos que intercambian vectores de onda en un par, o que meramente intercambian pares.



(Alabidi & Huston, 2010; Alabidi & Lidsey, 2008; Alabidi & Lyth, 2006a; Alabidi & Lyth, 2006b) a través de parámetros que pueden ser contrastados directamente con la observación. En el aspecto teórico de la cosmología, las propiedades de las anisotropías en la temperatura de la RCF se estudian a través de las propiedades de la perturbación primordial en la curvatura  $\zeta$ <sup>#10</sup> (Lyth & Liddle, 2009; Weinberg, 2008). Las propiedades de  $\zeta$  están descritas en términos de funciones espectrales, tales como el espectro, el biespectro, el triespectro, etc., quienes a su vez están dadas en función de los, así llamados, descriptores estadísticos de la función de distribución de  $\zeta$  (Cogollo, Rodríguez, & Valenzuela-Toledo, 2008). En estos términos, la parte isótropa del espectro  $P_\zeta$  se encuentra parametrizada en función de una amplitud  $\mathcal{P}_\zeta$  y del índice espectral  $n_\zeta$ :

$$P_\zeta(k) \equiv \frac{2\pi^2}{k^3} \mathcal{P}_\zeta \left( \frac{k}{a_* H_*} \right)^{n_\zeta - 1}, \quad (20)$$

en donde  $a_*$  y  $H_*$  son el parámetro de expansión y el parámetro de Hubble evaluados a la salida del horizonte, el biespectro  $B_\zeta$  se encuentra parametrizado en términos de productos del espectro y del nivel de no gaussianidad  $f_{\text{NL}}$ :

$$\begin{aligned} B_\zeta(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3) &\equiv \frac{(2\pi^2)^2}{k_1^3 k_2^3} B_\zeta(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3) \\ &= \frac{5}{6} f_{\text{NL}} \left[ \frac{(2\pi^2)^2}{k_1^3 k_2^3} \mathcal{P}_\zeta(\mathbf{k}_1) \mathcal{P}_\zeta(\mathbf{k}_2) + 2 \text{ p.} \right], \quad (21) \end{aligned}$$

el triespectro  $T_\zeta$  se encuentra parametrizado como productos del espectro y de los niveles de no gaussianidad  $\tau_{\text{NL}}$  y  $g_{\text{NL}}$ :

$$\begin{aligned} T_\zeta(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4) &\equiv \frac{(2\pi^2)^3}{k_1^3 k_2^3 k_3^3 |\mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3|^3} \mathcal{T}_\zeta(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4) + \\ &+ \frac{(2\pi^2)^3}{k_1^3 k_2^3 k_3^3} \mathcal{G}_\zeta(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4) \\ &= \tau_{\text{NL}} \left[ \frac{(2\pi^2)^3}{k_1^3 k_2^3 k_3^3 |\mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3|^3} \mathcal{P}_\zeta(\mathbf{k}_1) \mathcal{P}_\zeta(\mathbf{k}_2) \times \right. \\ &\quad \times \mathcal{P}_\zeta(\mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3) + 11 \text{ p.} \left. \right] + \frac{54}{25} g_{\text{NL}} \times \\ &\quad \times \left[ \frac{(2\pi^2)^3}{k_1^3 k_2^3 k_3^3} \mathcal{P}_\zeta(\mathbf{k}_1) \mathcal{P}_\zeta(\mathbf{k}_2) \mathcal{P}_\zeta(\mathbf{k}_3) + 3 \text{ p.} \right], \quad (22) \end{aligned}$$

y así sucesivamente. Estas cantidades están fijadas por la observación o, por lo menos, poseen una cota observacional (Bunn & White, 1997; Komatsu *et al.*, 2011; Smidt *et al.*, 2010):  $\mathcal{P}_\zeta \simeq (5 \times 10^{-5})^2$ ,  $n_\zeta = 0,968 \pm 0,012$ ,

$$-10 < f_{\text{NL}}^{\text{local}} < 74, -0,6 \times 10^4 < \tau_{\text{NL}}^{\text{local}} < 3,3 \times 10^4, \text{ and } -7,4 \times 10^5 < g_{\text{NL}}^{\text{local}} < 8,2 \times 10^5.$$

En la gran mayoría de los modelos cosmológicos propuestos para la formación de estructuras a gran escala, se asume que los correladores de  $n$  puntos, de los cuales derivan las funciones espectrales, son invariantes bajo rotaciones espaciales (isotropía estadística) y translaciones espaciales (homogeneidad estadística). Sin embargo, violaciones de tales invarianzas son objeto de estudio hoy en día puesto que podrían estar presentes en las observaciones (ver (Armendariz-Picon & Pekowsky, 2009; Groeneboom, Ackerman, Wehus, & Eriksen, 2010; Groeneboom & Eriksen, 2009; Hanson & Lewis, 2009; Hanson, Lewis & Challinor, 2010; Ma, Efstathiou & Challinor, 2011; Samal, Saha, Jain, & Ralston, 2009) para el caso de anisotropía estadística).

Una forma de caracterizar las violaciones a la isotropía estadística es incluir campos vectoriales en la dinámica inflacionaria (Armendariz-Picon, 2007; Dimopoulos, 2006; Dimopoulos, 2007; Dimopoulos & Karčiauskas, 2008; Dimopoulos, Karčiauskas, Lyth, & Rodríguez, 2009; Dimopoulos, Karčiauskas, & Wagstaff, 2010a; Dimopoulos, Karčiauskas, & Wagstaff, 2010b; Dimopoulos & Wagstaff, 2011; Dulaney & Gresham, 2010; Golovnev, 2010; Golovnev, Mukhanov, & Vanchurin, 2008a; Golovnev, Mukhanov, & Vanchurin, 2008b; Golovnev & Vanchurin, 2009; Gümrükcüoğlu, Himmetoğlu, & Peloso, 2010; Himmetoğlu, 2010; Himmetoğlu, Contaldi, & Peloso, 2009a; Himmetoğlu, Contaldi, & Peloso, 2009b; Himmetoğlu, Contaldi, & Peloso, 2009c; Kanno, Kimura, Soda & Yokoyama, 2008; Karčiauskas, 2011; Karčiauskas & Lyth, 2010; Koh & Hu, 2009; Maleknejad & Sheikh-Jabbari, 2011a; Maleknejad & Sheikh-Jabbari, 2011b; Watanabe, Kano, & Soda, 2009; Watanabe, Kano, & Soda, 2010; Yokoyama & Soda, 2008)<sup>#11</sup>, lo cual implica modificaciones en los descriptores estadísticos para la perturbación primordial en la curvatura  $\zeta$  (Ackerman, Carroll, & Wise, 2007; Dimopoulos, Karčiauskas, Lyth, & Rodríguez, 2009; Bartolo, Dimastrogiovanni, Matarrese, & Riotto, 2009a; Bartolo, Dimastrogiovanni, Matarrese, & Riotto, 2009b; Dimastrogiovanni, Bartolo, Matarrese, & Riotto, 2010; Karčiauskas, Dimopoulos, & Lyth, 2009; Valenzuela-Toledo & Rodríguez, 2010; Valenzuela-Toledo, Rodríguez, & Lyth, 2009). Por ejemplo, para parametrizar la anisotropía estadística (asumiendo homogeneidad estadística), el espectro se modifica de tal manera que éste adquiere una dependencia explícita del vector de onda. En esta forma, el espectro incluye una parte isótropa  $P(k)$  y una

<sup>#10</sup>La relación entre estas dos cantidades es conocida como el efecto Sachs-Wolfe (Sachs & Wolfe, 1967).

<sup>#11</sup>Una descripción de los resultados de cada uno de estos artículos está más allá de los propósitos del presente artículo. Sin embargo, el propósito de cada uno de ellos es esencialmente el mismo: contribuir a la expansión acelerada y/o a la generación de estructuras a gran escala a través de campos vectoriales.

parte anisótropa proporcional a  $P(k)$  (**Ackerman, Carroll, & Wise, 2007**):

$$P(\mathbf{k}) = P(k)(1 + g_\zeta(\hat{\mathbf{d}} \cdot \hat{\mathbf{k}})^2 + \dots), \quad (23)$$

en donde  $g_\zeta$  es un parámetro adimensional conocido como el nivel de anisotropía estadística en el espectro,  $\hat{\mathbf{k}}$  es el vector de onda unitario y  $\hat{\mathbf{d}}$  es un vector unitario a lo largo de la dirección preferencial.

Un estudio reciente (**Groeneboom, Ackerman, Wehus, & Eriksen, 2010; Groeneboom & Eriksen, 2009**) de las anisotropías en la temperatura de la RCF, encuentra una débil evidencia de violaciones de la isotropía estadística en el quinto año de resultados del satélite WMAP de la NASA<sup>#12</sup>. Mantiendo únicamente términos cuadrupolares en la ecuación (23), es decir:

$$P(\mathbf{k}) = P(k)(1 + g_\zeta(\hat{\mathbf{d}} \cdot \hat{\mathbf{k}})^2), \quad (24)$$

los autores de (**Groeneboom, Ackerman, Wehus, & Eriksen, 2010; Groeneboom & Eriksen, 2009**) encuentran que  $g_\zeta \simeq 0,290 \pm 0,031$ . Este resultado elimina la posibilidad de  $g_\zeta = 0$  a más de  $9\sigma$ . Sin embargo, la dirección preferente ( $\hat{\mathbf{d}}$ ) yace cerca al plano del sistema solar, lo cual hace pensar a los autores que este efecto podría ser debido a algún error sistemático sin resolver. A pesar del panorama expuesto anteriormente, algunos autores (**Pullen & Kamionkowski, 2007**) se han tomado el trabajo de calcular la incertidumbre asociada a  $g_\zeta$  a la que llegarán los satélites encargados de medir la temperatura de la RCF en su estado de mayor rendimiento y que actualmente se encuentran en operación. Ellos encuentran (**Pullen & Kamionkowski, 2007**):  $|\Delta g_\zeta| \simeq 0,1$  para el satellite de la NASA WMAP y  $|\Delta g_\zeta| \simeq 0,02$  para el satellite de la ESA PLANCK<sup>#13</sup>.

En algunos estudios diferentes (**Hansen et. al., 2009; Hoftuft et. al., 2009**), la perturbación cuadrática media en la temperatura de la RCF se ha medido en hemisferios opuestos con el fin de observar si existe alguna diferencia entre los hemisferios. Ellos encuentran una diferencia del orden de 10 %, para una cierta escogencia de los hemisferios, siendo estadísticamente significativa en un 99 %. Dada la dificultad en el manejo de los errores sistemáticos sería prematuro considerar la evidencia de asimetría hemiesférica como completamente abrumadora. Ahora bien, enfocándonos en un pequeño parche del cielo, la anisotropía estadística de  $\zeta$  implica que la perturbación cuadrática media en la temperatura de la RCF en un pequeño parche dependerá en general de la dirección de ese parche. Lo anterior debido a que la perturbación cuadrática media en ese parche depende (en la aproximación de desacople repentino) de la perturbación cuadrática media

en la curvatura en una pequeña región plana de espacio perpendicular a la línea de observación ubicada en la última dispersión. Sin embargo, la perturbación cuadrática media en la temperatura de la RCF será la misma en parches situados en direcciones opuestas del cielo debido a que ella explora a  $\zeta(\mathbf{k})$  en el mismo  $\mathbf{k}$ -plano y el espectro  $P_\zeta(\mathbf{k})$  es invariante bajo el cambio  $\mathbf{k} \rightarrow -\mathbf{k}$ . Se concluye entonces que la anisotropía estadística de  $\zeta$  no puede por sí misma generar la asimetría hemiesférica y que, por ende, es la inhomogeneidad estadística la requerida para explicar dicho fenómeno. En virtud de las hipótesis requeridas para demostrar el teorema ergódico (**Weinberg, 2008**), si la evidencia de asimetría hemiesférica se torna contundente en los próximos años, nos estaríamos enfrentando a una crisis sin precedentes en los fundamentos de la cosmología como ciencia.

En el presente trabajo se utiliza el formalismo  $\delta N$  (**Dimopoulos, Karčiauskas, Lyth, & Rodríguez, 2009**) para calcular las contribuciones a nivel árbol y a un lazo para el espectro  $P_\zeta$ , el biespectro  $B_\zeta$  y el triespectro  $T_\zeta$  de la perturbación primordial en la curvatura  $\zeta$ , cuando se incluyen campos escalares y vectoriales en la dinámica inflacionaria; se integran de esta manera los resultados obtenidos en (**Valenzuela-Toledo, Rodríguez & Lyth, 2009**) para el caso del biespectro y en (**Valenzuela-Toledo & Rodríguez, 2010**) para el caso del triespectro, para aquellos casos descritos en la próxima sección y que gozan de completa autoconsistencia. Debido a las restricciones observacionales se asumirá que el espectro está dominado por las contribuciones provenientes de perturbaciones en el campo escalar (denotadas con un subíndice  $\zeta_\phi$ ) ya que su contribución al espectro es perfectamente isotropa. Además, se supondrá que el biespectro y el triespectro están dominados por contribuciones provenientes de las perturbaciones en el campo vectorial (denotadas con un subíndice  $\zeta_A$ ); esta suposición permite obtener niveles de no gaussianidad altamente anisótropos (lo cual está absolutamente permitido por las observaciones, en contraste a lo que ocurre con el espectro) y que fácilmente pueden ser contrastados con la observación. Finalmente, se calculan los niveles de no gaussianidad  $f_{NL}$  y  $\tau_{NL}$  y se relacionan con el nivel de anisotropía estadística en el espectro  $g_\zeta$ .

#### 4. Funciones espectrales para $\zeta$

El formalismo  $\delta N$  (**Dimopoulos, Karčiauskas, Lyth, & Rodríguez, 2009; Lyth, Malik, & Sasaki, 2005; Lyth & Rodríguez, 2005; Sasaki & Stewart, 1996; Sasaki & Tanaka, 1998; Starobinsky, 1985**) se ha convertido en una de las herramientas más usadas para calcular la perturbación pri-

<sup>#12</sup>NASA's Wilkinson Microwave Anisotropy Probe homepage: <http://wmap.gsfc.nasa.gov/>.

<sup>#13</sup>ESA's PLANCK mission homepage: <http://planck.esa.int/>.

mordial en la curvatura  $\zeta$  y sus descriptores estadísticos. El caso más simple que permite violaciones a la isotropía estadística consiste en incluir en la dinámica inflacionaria un campo escalar y un campo vectorial; en este caso el formalismo  $\delta N$  brinda una fórmula para calcular  $\zeta$  hasta segundo orden (**Dimopoulos, Karčiauskas, Lyth, & Rodríguez, 2009**):

$$\zeta(\mathbf{x}, t) = N_\phi \delta\phi + N_A^i \delta A_i + \frac{1}{2} N_{\phi\phi} (\delta\phi)^2 + N_{\phi A}^i \delta\phi \delta A_i + \frac{1}{2} N_{AA}^{ij} \delta A_i \delta A_j, \quad (25)$$

en donde

$$N_\phi \equiv \frac{\partial N}{\partial \phi}, \quad N_A^i \equiv \frac{\partial N}{\partial A_i}, \quad N_{\phi\phi} \equiv \frac{\partial^2 N}{\partial \phi^2}, \quad (26)$$

$$N_{AA}^{ij} \equiv \frac{\partial^2 N}{\partial A_i \partial A_j}, \quad N_{\phi A}^i \equiv \frac{\partial^2 N}{\partial A_i \partial \phi}, \quad (27)$$

siendo  $N$  es el número de e-folds global desde una hipersuperficie de tiempo constante inicial  $t_*$  en donde la geometría espacial es plana, hasta una hipersuperficie de tiempo constante final  $t$  en donde la densidad de energía es uniforme;  $\phi$  es el campo escalar y  $\mathbf{A}$  es el campo vectorial con sus respectivas perturbaciones evaluadas en la hipersuperficie de tiempo constante inicial  $t_*$ . Es de anotar que el tiempo inicial  $t_*$  se escoge apropiadamente como unos pocos e-folds después de la salida del horizonte. Finalmente, el índice  $i$  corresponde a un índice espacial que corre de 1 a 3<sup>#14</sup>.

Por simplicidad, las expresiones (20), (21), y (22) se escriben como una suma, en la cual se encuentran términos que dependen solamente de perturbaciones escalares, otros que dependen de perturbaciones vectoriales y otros que dependen de contribuciones mixtas:

$$\mathcal{P}_\zeta(\mathbf{k}) = \mathcal{P}_{\zeta_\phi}(k) + \mathcal{P}_{\zeta_A}(\mathbf{k}) + \mathcal{P}_{\zeta_{\phi A}}(\mathbf{k}), \quad (28)$$

$$\mathcal{B}_\zeta(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3) = \mathcal{B}_{\zeta_\phi}(k_1, k_2, k_3) + \mathcal{B}_{\zeta_A}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3) + \mathcal{B}_{\zeta_{\phi A}}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3), \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_\zeta(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4) &= \mathcal{T}_{\zeta_\phi}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4) + \\ &+ \mathcal{T}_{\zeta_A}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4) + \\ &+ \mathcal{T}_{\zeta_{\phi A}}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4). \end{aligned} \quad (30)$$

La ecuación (25) y las definiciones (15), (17) y (19), permiten calcular los diferentes descriptores estadísticos para  $\zeta$  y

a cualquier orden deseado en teoría de perturbaciones. Una característica importante de la perturbación primordial en la curvatura  $\zeta$ , es que se puede escribir como una serie de Taylor en las perturbaciones de los campos (ver ecuación (25)). Por lo anterior y en virtud de las definiciones (15), (17) y (19), las funciones espectrales para  $\zeta$  pueden ser obtenidas en términos de series. Según lo anterior, y utilizando el lenguaje de la teoría cuántica de campos, es posible identificar correcciones a nivel árbol (o correcciones de primer orden), correcciones a un lazo (o correcciones de segundo orden), correcciones a dos lazos (o correcciones de tercer orden), etc., en cada una de las funciones espectrales (**Beltrán Almeida, Rodríguez & Valenzuela-Toledo, 2011; Boubekour & Lyth, 2006; Byrnes, Koyama, Sasaki, & Wands, 2007**), por lo cual se hace necesario definir cuáles de estos términos son los dominantes (**Cogollo, Rodríguez, & Valenzuela-Toledo, 2008; Rodríguez & Valenzuela-Toledo, 2010**).

Cuando se buscan los términos dominantes en las funciones espectrales es necesario tener en cuenta las restricciones observacionales. Como se mencionó en la Sección 3, si la anisotropía estadística existe, ésta vendría cuantificada en el nivel de anisotropía estadística  $g_\zeta$  en el espectro  $\mathcal{P}_\zeta$ ; sin embargo, observacionalmente se sabe que este nivel es muy pequeño y por lo tanto es necesario asegurar que las contribuciones provenientes de los vectores en el espectro sean más pequeñas que las provenientes de las perturbaciones en los campos vectoriales. Lo anterior se satisface fácilmente si se asume que la corrección a nivel árbol en el primer término de la ecuación (28) domina sobre todos los demás. Adicionalmente, en el presente trabajo se asumirá que en los demás términos las correcciones asociadas a los campos vectoriales dominan sobre las contribuciones de los campos escalares y sobre los términos mixtos; lo anterior con el fin de obtener niveles de no gaussianidad altamente anisótropos que son, hasta el momento, observacionalmente permitidos.

Con las anteriores consideraciones y tomando la serie para  $\zeta$  hasta orden dos, las ecuaciones (28), (29) y (30) se pueden separar de la siguiente manera:

$$\mathcal{P}_\zeta = \mathcal{P}_{\zeta_\phi} + \mathcal{P}_{\zeta_A}^{\text{arbol}} + \mathcal{P}_{\zeta_A}^{1\text{-lazo}}, \quad (31)$$

$$\mathcal{B}_\zeta = \mathcal{B}_{\zeta_A}^{\text{arbol}} + \mathcal{B}_{\zeta_A}^{1\text{-lazo}}, \quad (32)$$

$$\mathcal{T}_\zeta = \mathcal{T}_{\zeta_A}^{\text{arbol}} + \mathcal{T}_{\zeta_A}^{1\text{-lazo}}. \quad (33)$$

Finalmente, utilizando la ecuación (25) y las definiciones (15), (17) y (19), se obtienen los términos necesarios para la realización del presente trabajo:

#### a. Correcciones a nivel árbol:

<sup>#14</sup>Como se muestra en (**Dimopoulos, 2006**), debido a que la inflación hace homogéneo el campo vectorial ( $\partial_i A_\mu = 0$ ) su componente temporal se hace cero. Adicionalmente, si el campo vectorial no tiene masa, se puede hacer la componente temporal igual a cero mediante una escogencia del gauge.

$$\mathcal{P}_\zeta^{\text{arbol}}(\mathbf{k}) = N_\phi^2 \mathcal{P}_{\delta\phi}(k) + N_A^i N_A^j \mathcal{T}_{ij}(\mathbf{k}), \quad (34)$$

$$\mathcal{B}_{\zeta A}^{\text{arbol}}(\mathbf{k}, \mathbf{k}', \mathbf{k}'') = N_A^i N_A^k N_{AA}^{mn} \left[ \mathcal{T}_{im}(\mathbf{k}) \mathcal{T}_{kn}(\mathbf{k}') + \text{c.p.} \right], \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_{\zeta A}^{\text{arbol}}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4) &= N_A^i N_A^j N_{AA}^{kl} N_{AA}^{mn} \left[ \mathcal{T}_{ik}(\mathbf{k}_2) \times \right. \\ &\quad \left. \times \mathcal{T}_{jm}(\mathbf{k}_4) \mathcal{T}_{ln}(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2) + 11 \text{ p.} \right]. \end{aligned} \quad (36)$$

b. Correcciones a un lazo:

$$\mathcal{P}_{\zeta A}^{1\text{-lazo}}(\mathbf{k}) = \frac{1}{2} N_{AA}^{ij} N_{AA}^{kl} \mathcal{P}_A \delta_{ik} \mathcal{T}_{jl}(\mathbf{k}) \ln(kL), \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{B}_{\zeta A}^{1\text{-lazo}}(\mathbf{k}, \mathbf{k}', \mathbf{k}'') &= N_{AA}^{ij} N_{AA}^{kl} N_{AA}^{mn} \ln(kL) \mathcal{P}_A \times \\ &\quad \times \delta_{il} \mathcal{T}_{kn}(\mathbf{k}) \mathcal{T}_{jm}(\mathbf{k}'), \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_{\zeta A}^{1\text{-lazo}}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4) &= N_{AA}^{ij} N_{AA}^{kl} N_{AA}^{mn} N_{AA}^{op} \ln(kL) \times \\ &\quad \times \mathcal{P}_A \delta_{im} \mathcal{T}_{jk}(\mathbf{k}_1) \mathcal{T}_{np}(\mathbf{k}_3) \mathcal{T}_{lo}(\mathbf{k}_4 + \mathbf{k}_3), \end{aligned} \quad (39)$$

en donde

$$\mathcal{P}_A = 2\mathcal{P}_+ + \mathcal{P}_{\text{long}}, \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_{ij}(\mathbf{k}) &\equiv T_{ij}^{\text{even}}(\mathbf{k}) \mathcal{P}_+(k) + iT_{ij}^{\text{odd}}(\mathbf{k}) \mathcal{P}_-(k) \\ &\quad + T_{ij}^{\text{long}}(\mathbf{k}) \mathcal{P}_{\text{long}}(k), \end{aligned} \quad (41)$$

con

$$\begin{aligned} T_{ij}^{\text{even}}(\mathbf{k}) &\equiv \delta_{ij} - \hat{k}_i \hat{k}_j, & T_{ij}^{\text{odd}}(\mathbf{k}) &\equiv \epsilon_{ijk} \hat{k}_k, \\ T_{ij}^{\text{long}}(\mathbf{k}) &\equiv \hat{k}_i \hat{k}_j. \end{aligned} \quad (42)$$

En las anteriores expresiones  $\mathcal{P}_{\delta\phi}$  representa el espectro asociado a las perturbaciones en el campo escalar,  $\mathcal{P}_{\text{long}}$  representa el espectro para la polarización longitudinal del vector, y  $\mathcal{P}_+$  y  $\mathcal{P}_-$  representan los espectros que conservan y violan respectivamente la paridad:

$$\mathcal{P}_\pm \equiv \frac{1}{2} (\mathcal{P}_R \pm \mathcal{P}_L), \quad (43)$$

en donde  $\mathcal{P}_R$  y  $\mathcal{P}_L$  denotan los espectros asociados a las componentes transversales del espectro del vector, con polarización circular derecha ( $R$ ) y polarización circular izquierda ( $L$ ) respectivamente. La sigla c.p. significa permutaciones cíclicas, y la cantidad  $L$  es el tamaño de la caja sobre la cual se realizan las integraciones correspondientes a las correcciones a un lazo; excepto cuando se consideren multipolos bajos en la RCF, el tamaño de la caja debe ser fijado a  $L \simeq H_0$  (Kohri, Lyth, & Valenzuela-Toledo, 2010; Kumar, Leblond, & Rajaraman, 2010) (siendo  $H_0$  el parámetro de Hubble hoy en día), lo cual da  $\ln(kL) \sim 1$  para las escalas cosmológicas relevantes.

<sup>#15</sup>Escenarios en donde una función espectral es dominada por términos a nivel árbol mientras que otra es dominada por términos a un lazo carecen de autoconsistencia (Valenzuela-Toledo & Rodríguez, 2010; Valenzuela-Toledo, Rodríguez, & Lyth, 2009).

Es de anotar que se ha supuesto que la expansión es isotrópica: de esta manera los espectros asociados al campo escalar y a las diferentes polarizaciones del campo vectorial dependen únicamente del número de onda; adicionalmente, los correladores de dos puntos entre el campo escalar y alguna de las componentes del campo vectorial se hacen iguales a cero debido a la invariancia ante rotaciones espaciales.

## 5. Cálculo de los niveles de no gaussianidad

### $f_{\text{NL}}$ Y $\tau_{\text{NL}}$

En esta sección se estimarán los descriptores estadísticos  $f_{\text{NL}}$  y  $\tau_{\text{NL}}$ , conocidos en la literatura como niveles de no gaussianidad. Se asumirá que éstos son generados por la parte anisótropa de la perturbación primordial en la curvatura  $\zeta$  y se considerará que la parte no gaussiana de  $\zeta$  es producida únicamente por las perturbaciones en los campos vectoriales. En virtud de las ecuaciones (31), (32) y (33), se estudiarán las siguientes posibilidades autoconsistentes las cuales integran los resultados obtenidos en (Valenzuela-Toledo, Rodríguez, & Lyth, 2009) para el caso del biespectro y en (Valenzuela-Toledo & Rodríguez, 2010) para el caso del triespectro<sup>#15</sup>:

1. Espectro ( $\mathcal{P}_{\zeta A}$ ) y biespectro ( $\mathcal{B}_{\zeta A}$ ) de las perturbaciones en los campos vectoriales dominados por términos a nivel árbol.
2. Espectro ( $\mathcal{P}_{\zeta A}$ ) y biespectro ( $\mathcal{B}_{\zeta A}$ ) de las perturbaciones en los campos vectoriales dominados por términos a un lazo.
3. Espectro ( $\mathcal{P}_{\zeta A}$ ) y triespectro ( $\mathcal{T}_{\zeta A}$ ) de las perturbaciones en los campos vectoriales dominados por términos a nivel árbol.
4. Espectro ( $\mathcal{P}_{\zeta A}$ ) y triespectro ( $\mathcal{T}_{\zeta A}$ ) de las perturbaciones en los campos vectoriales dominados por términos a un lazo.

### 5.1. Espectro ( $\mathcal{P}_{\zeta A}$ ) y biespectro ( $\mathcal{B}_{\zeta A}$ ) de las perturbaciones en los campos vectoriales dominados por términos a nivel árbol.

En este caso el parámetro de no gaussianidad  $f_{\text{NL}}$  viene dado por la siguiente ecuación:

$$f_{\text{NL}} \simeq \frac{N_A^i N_A^k N_{AA}^{mn} [\mathcal{T}_{im}(\mathbf{k}) \mathcal{T}_{kn}(\mathbf{k}') + \text{c. p.}]}{[\mathcal{P}_\zeta(k) \mathcal{P}_\zeta(k') + \text{c. p.}]}. \quad (44)$$

Lo que se quiere en este artículo es obtener el orden de magnitud de los niveles de no gaussianidad, así que se asume, con una buena aproximación, que  $\mathcal{P}_{\text{long}}$ ,  $\mathcal{P}_+$ , y  $\mathcal{P}_-$  son todos del mismo orden de magnitud, además de considerar que el espectro es invariante de escala. Así,  $f_{\text{NL}}$  se puede escribir de la siguiente forma:

$$f_{\text{NL}} \simeq \frac{\mathcal{P}_A^2 N_A^2 N_{AA}}{\mathcal{P}_\zeta^2}, \quad (45)$$

en donde  $N_A = \sqrt{N_A^i N_A^j}$ , y  $N_{AA} = \sqrt{N_{AA}^{ij} N_{AA}^{ji}}$ .

Ahora, tomando  $\delta A = \sqrt{\mathcal{P}_A}$  y  $N_A \delta A > N_{AA} \delta A^2$  se tiene que  $\zeta_A \sim \sqrt{\mathcal{P}_{\zeta_A}} \sim N_A \sqrt{\mathcal{P}_A}$ , con lo cual  $f_{\text{NL}}$  toma la siguiente forma:

$$f_{\text{NL}} \lesssim \frac{\mathcal{P}_{\zeta_A}^{3/2}}{\mathcal{P}_\zeta^2}. \quad (46)$$

Finalmente, si se asume que  $g_\zeta \sim \mathcal{P}_{\zeta_A}/\mathcal{P}_\zeta$ , y tomando el valor observacional para  $\mathcal{P}_\zeta$ ,  $\mathcal{P}_\zeta^{1/2} \simeq 5 \times 10^{-5}$  (Bunn & White, 1997), se puede encontrar que:

$$f_{\text{NL}} \lesssim 10^3 \left( \frac{g_\zeta}{0,1} \right)^{3/2}. \quad (47)$$

El anterior resultado, da una cota superior para el valor de  $f_{\text{NL}}$  en términos del nivel de anisotropía estadística.

Se puede observar que nuestro resultado está de acuerdo con las más recientes cotas observacionales sobre  $f_{\text{NL}}$ , por ejemplo  $-10 < f_{\text{NL}}^{\text{local}} < 74$  (Komatsu *et. al.*, 2011), aunque podría llegar a excederlas.

## 5.2. Espectro ( $\mathcal{P}_{\zeta_A}$ ) y biespectro ( $\mathcal{B}_{\zeta_A}$ ) de las perturbaciones en los campos vectoriales dominados por contribuciones a un lazo.

En esta situación  $f_{\text{NL}}$  toma la forma:

$$f_{\text{NL}} \simeq \left\{ N_{AA}^{ij} N_{AA}^{kl} N_{AA}^{mn} \ln(kL) \mathcal{P}_A \delta_{il} [\mathcal{T}_{kn}(\mathbf{k}) \times \right. \\ \left. \times \mathcal{T}_{jm}(\mathbf{k}') + \text{c. p.}] \right\} / \left\{ [\mathcal{P}_\zeta(k) \mathcal{P}_\zeta(k') + \text{c. p.}] \right\}. \quad (48)$$

Nuevamente, asumiendo que las componentes del espectro son todas del mismo orden y además que son invariantes de escala, se tiene que:

$$f_{\text{NL}} \simeq \frac{\mathcal{P}_A^3 N_{AA}^3}{\mathcal{P}_\zeta^2}. \quad (49)$$

Como se está considerando que el espectro está dominado por correcciones a un lazo,  $\zeta_A \sim \sqrt{\mathcal{P}_{\zeta_A}} \sim N_{AA} \mathcal{P}_A$ . Así, se

puede encontrar que:

$$f_{\text{NL}} \sim \frac{1}{\sqrt{\mathcal{P}_\zeta}} \left( \frac{\mathcal{P}_{\zeta_A}}{\mathcal{P}_\zeta} \right)^{3/2} \sim 10^3 \left( \frac{g_\zeta}{0,1} \right)^{3/2}. \quad (50)$$

Esta ecuación muestra una relación directa entre el parámetro de no gaussianidad  $f_{\text{NL}}$  y el nivel de anisotropía estadística  $g_\zeta$ . Como un ejemplo, y aprovechando la incertidumbre acerca del valor de  $g_\zeta$ , se puede dar una cota superior para  $g_\zeta$  a partir de la actual cota superior para  $f_{\text{NL}}$ . Si  $f_{\text{NL}} < 74$ , entonces  $g_\zeta < 0,2$  en este escenario.

## 5.3. Espectro ( $\mathcal{P}_{\zeta_A}$ ) y triespectro ( $\mathcal{T}_{\zeta_A}$ ) de las perturbaciones en los campos vectoriales dominados por términos a nivel árbol.

En este caso el nivel de no gaussianidad  $\tau_{\text{NL}}$  en el triespectro se escribe como

$$\tau_{\text{NL}} \simeq \left\{ 2N_A^i N_A^j N_{AA}^{kl} N_{AA}^{mn} [\mathcal{T}_{ik}(\mathbf{k}_2) \mathcal{T}_{jm}(\mathbf{k}_4) \mathcal{T}_{ln}(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2) + \right. \\ \left. + 11 \text{ p.}] \right\} / \left\{ [\mathcal{P}_\zeta(k_1) \mathcal{P}_\zeta(k_2) \mathcal{P}_\zeta(|\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_4|) + \right. \\ \left. + 23 \text{ p.}] \right\}. \quad (51)$$

Si se asume que  $\mathcal{P}_{\text{long}}$ ,  $\mathcal{P}_+$ , y  $\mathcal{P}_-$  son todos del mismo orden de magnitud y además que el espectro es invariante de escala,  $\tau_{\text{NL}}$  toma una forma más simple,

$$\tau_{\text{NL}} \simeq \frac{\mathcal{P}_A^3 N_A^2 N_{AA}^2}{\mathcal{P}_\zeta^3}. \quad (52)$$

Ahora, utilizando el hecho de que  $N_A \delta A > N_{AA} \delta A^2$  y que  $\zeta_A \sim \sqrt{\mathcal{P}_{\zeta_A}} \sim N_A \sqrt{\mathcal{P}_A}$ , fácilmente se puede llegar a:

$$\tau_{\text{NL}} \lesssim \frac{\mathcal{P}_{\zeta_A}^2}{\mathcal{P}_\zeta^3}. \quad (53)$$

Finalmente, empleando  $g_\zeta \simeq \mathcal{P}_{\zeta_A}/\mathcal{P}_\zeta$ , se obtiene:

$$\tau_{\text{NL}} \lesssim 8 \times 10^6 \left( \frac{g_\zeta}{0,1} \right)^2. \quad (54)$$

La anterior expresión brinda una cota superior para el nivel de no-gaussianidad en el triespectro  $\mathcal{T}_\zeta$ , en función del nivel de anisotropía estadística en el espectro  $\mathcal{P}_\zeta$ . Este resultado puede fácilmente exceder la cota observacional sobre  $\tau_{\text{NL}}$ :  $-0,6 \times 10^4 < \tau_{\text{NL}} < 3,3 \times 10^4$  (Smidt *et. al.*, 2010).

#### 5.4. Espectro ( $\mathcal{P}_{\zeta_A}$ ) y triespectro ( $\mathcal{T}_{\zeta_A}$ ) de las perturbaciones en los campos vectoriales dominados por contribuciones a un lazo

En esta situación  $\tau_{\text{NL}}$  se escribe como:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{NL}} \simeq & \left\{ N_{AA}^{ij} N_{AA}^{kl} N_{AA}^{mn} N_{AA}^{op} \ln(kL) \mathcal{P}_A \delta_{im} \times \right. \\ & \times \left. [\mathcal{T}_{jk}(\mathbf{k}_1) \mathcal{T}_{np}(\mathbf{k}_3) \mathcal{T}_{lo}(|\mathbf{k}_4 + \mathbf{k}_3|)] \right\} / \\ & \left\{ [\mathcal{P}_{\zeta}(k_1) \mathcal{P}_{\zeta}(k_2) \mathcal{P}_{\zeta}(|\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_4|) + 23 \text{ perm.}] \right\}. \quad (55) \end{aligned}$$

Nuevamente, asumiendo que los espectros son del mismo orden de magnitud e invariantes de escala, se obtiene:

$$\tau_{\text{NL}} \simeq \frac{\mathcal{P}_A^4 N_{AA}^4}{\mathcal{P}_{\zeta}^3}. \quad (56)$$

Utilizando las consideraciones sobre el espectro de la perturbaciones vectoriales de la Subsección 5.2, se puede obtener la siguiente relación para  $\tau_{\text{NL}}$ :

$$\tau_{\text{NL}} \sim \frac{\mathcal{P}_{\zeta_A}^2}{\mathcal{P}_{\zeta}^3} \sim 8 \times 10^6 \left( \frac{g_{\zeta}}{0,1} \right)^2. \quad (57)$$

La anterior ecuación brinda una relación directa entre  $\tau_{\text{NL}}$  y el nivel de anisotropía estadística en el espectro.

Finalmente, combinando las ecuaciones (50) y (57), se obtiene:

$$\tau_{\text{NL}} \sim 8 \times 10^2 f_{\text{NL}}^{4/3}. \quad (58)$$

la cual brinda una relación de consistencia entre los niveles de no gaussianidad  $f_{\text{NL}}$  y  $\tau_{\text{NL}}$  para este escenario en particular. Las relaciones dadas por las ecuaciones (50), (57) y (58) se pueden utilizar en el futuro para poner bajo prueba este escenario frente a los resultados observacionales.

## 6. Conclusiones

Se estudió en este artículo el orden de magnitud de los niveles de no gaussianidad  $f_{\text{NL}}$  en el biespectro  $B_{\zeta}$  y  $\tau_{\text{NL}}$  en el triespectro  $T_{\zeta}$ , cuando se consideran violaciones a la isotropía estadística por la presencia de campos vectoriales en la dinámica inflacionaria. Se encontró que es posible obtener valores observables de los niveles de no gaussianidad que incluso pueden superar los actuales límites observacionales (para el máximo valor posible de  $g_{\zeta}$  de acuerdo a los análisis observacionales más recientes (Groeneboom, Ackerman, Wehus, & Eriksen, 2010; Groeneboom & Eriksen, 2009)). Además se encontraron algunas relaciones de consistencia entre los tres descriptores estadísticos: los niveles de no gaussianidad  $f_{\text{NL}}$  y  $\tau_{\text{NL}}$  y el nivel de anisotropía estadística en el espectro  $g_{\zeta}$ . Queremos enfatizar que tales

relaciones de consistencia se pueden utilizar en el futuro para poner bajo prueba este escenario frente a los resultados observacionales; ellas permiten fijar dos de los descriptores estadísticos a partir del tercero.

Como un subproducto del estudio realizado en este artículo, se presentó la definición del verdadero principio cosmológico: éste, como un producto de la observación y no de la filosofía, corresponde a la invarianza ante translaciones espaciales y rotaciones espaciales de la función de distribución de probabilidad que gobierna a la perturbación primordial en la curvatura  $\zeta$ . En otras palabras, la homogeneidad e isotropía a grandes escalas debe entenderse como la homogeneidad estadística y la isotropía estadística asociadas a  $\zeta$ .

## Agradecimientos

C.A.V.-T. agradece a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle. Y.R. cuenta con el apoyo financiero de COLCIENCIAS mediante proyecto de investigación número 1102-487-25992 CT-460-2009, y de la DIEF (UIS) mediante proyecto de investigación número 5177.

## Referencias

- Abramo L. R. & Pereira T. S., 2010. Testing gaussianity, homogeneity, and isotropy with the cosmic microwave background, *Adv. Astron.* **2010**, 378203.
- Ackerman L., Carroll S. M., & Wise M. B., 2007. Imprints of a primordial preferred direction on the microwave background, *Phys. Rev. D* **75**, 083502.
- Adler R. J., 1981. *The geometry of random fields*, John Wiley & Sons, Chichester - UK.
- Aihara H. *et. al.*, 2011. The eighth data release of the Sloan Digital Sky Survey: First data from SDSS-III, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **193**, 29.
- Alabidi L. & Huston I., 2010. An update on single field models of inflation in light of WMAP7, *JCAP* **1008**, 037 (2010).
- Alabidi L. & Lidsey J., 2008. Single field inflation after the WMAP five-year data, *Phys. Rev. D* **78**, 103519.
- Alabidi L. & Lyth D. H., 2006a. Inflation models after WMAP year three, *JCAP* **0608**, 013.
- Alabidi L. & Lyth D. H., 2006b. Inflation models and observation, *JCAP* **0605**, 016.
- Armendariz-Picon C., 2007. Creating statistically anisotropic and inhomogeneous perturbations, *JCAP* **0709**, 014.
- Armendariz-Picon C. & Pekowsky L., 2009. Bayesian limits on primordial isotropy breaking, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 031301.
- Bartolo N., Dimastrogiovanni E., Matarrese S., & Riotto A., 2009a. Anisotropic bispectrum of curvature perturbations from primordial non-Abelian vector fields, *JCAP* **0910**, 015.

- Bartolo N., Dimastrogiovanni E., Matarrese S. & Riotto A.**, 2009b. Anisotropic trispectrum of curvature perturbations induced by primordial non-Abelian vector fields, *JCAP* **0911**, 028.
- Beltrán Almeida J. P., Rodríguez Y. & Valenzuela-Toledo C. A.**, 2011. Feynman-like rules for calculating  $n$ -point correlators of the primordial curvature perturbation, in preparation.
- Böhmer C. G. & Mota D. F.**, 2008. CMB anisotropies and inflation from non-standard spinors, *Phys. Lett. B* **663**, 168.
- Boubekeur L. & Lyth D. H.**, 2006. Detecting a small perturbation through its non-gaussianity, *Phys. Rev. D* **73**, 021301(R).
- Bunn E. F. & White M. J.**, 1997. The four-year COBE normalization and large-scale structure, *Astrophys. J.* **480**, 6.
- Byrnes C. T., Koyama K., Sasaki M., & Wands D.**, 2007. Diagrammatic approach to non-gaussianity from inflation, *JCAP* **0711**, 027.
- Cogollo H. R. S., Rodríguez Y., & Valenzuela-Toledo C. A.**, 2008. On the issue of the  $\zeta$  series convergence and loop corrections in the generation of observable primordial non-gaussianity in slow-roll inflation. Part I: the bispectrum, *JCAP* **0808**, 029.
- Dimastrogiovanni E., Bartolo N., Matarrese S. & Riotto A.**, 2010. Non-gaussianity and statistical anisotropy from vector field populated inflationary models, *Adv. Astron.* **2010**, 752670.
- Dimopoulos K.** 2006. Can a vector field be responsible for the curvature perturbation in the Universe?, *Phys. Rev. D* **74**, 083502.
- Dimopoulos K.**, 2007. Supergravity inspired vector curvaton, *Phys. Rev. D* **76**, 063506.
- Dimopoulos K. & Karčiauskas M.**, 2008. Non-minimally coupled vector curvaton, *JHEP* **0807**, 119.
- Dimopoulos K., Karčiauskas M., Lyth D. H., & Rodríguez Y.**, 2009. Statistical anisotropy of the curvature perturbation from vector field perturbations, *JCAP* **0905**, 013.
- Dimopoulos K., Karčiauskas M., & Wagstaff J. M.**, 2010a. Vector curvaton with varying kinetic function, *Phys. Rev. D* **81**, 023522.
- Dimopoulos K., Karčiauskas M. & Wagstaff J. M.**, 2010b. Vector curvaton without instabilities, *Phys. Lett. B* **683**, 298.
- Dimopoulos K. & Wagstaff J. M.**, 2011. Particle production of vector fields: scale invariance is attractive, *Phys. Rev. D* **83**, 023523.
- Dulaney T. R. & Gresham M. I.**, 2010. Primordial power spectra from anisotropic inflation, *Phys. Rev. D* **81**, 103532.
- Germani C. & Kehagias A.**, 2009.  $p$ -form inflation, *JCAP* **0903**, 028.
- Golovnev A.**, 2010. Linear perturbations in vector inflation and stability issues, *Phys. Rev. D* **81**, 023514.
- Golovnev A., Mukhanov V., & Vanchurin V.**, 2008a. Gravitational waves in vector inflation, *JCAP* **0811**, 018.
- Golovnev A., Mukhanov V., & Vanchurin V.**, 2008b. Vector inflation, *JCAP* **0806**, 009.
- Golovnev A. & Vanchurin V.**, 2009. Cosmological perturbations from vector inflation, *Phys. Rev. D* **79**, 103524.
- 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.
- Gümürküoğlu A. E., Himmetoğlu B., & Peloso M.**, 2010. Scalar-scalar, scalar-tensor, and tensor-tensor correlators from anisotropic inflation, *Phys. Rev. D* **81**, 063528.
- Hansen F. K. et al.**, 2009. Power asymmetry in cosmic microwave background fluctuations from full sky to sub-degree scales: is the Universe isotropic?, *Astrophys. J.* **704**, 1448.
- Hanson D. & Lewis A.**, 2009. Estimators for CMB statistical anisotropy, *Phys. Rev. D* **80**, 063004.
- Hanson D., Lewis A. & Challinor A.**, 2010. Asymmetric beams and CMB statistical anisotropy, *Phys. Rev. D* **81**, 103003.
- Himmetoğlu B.**, 2010. Spectrum of perturbations in anisotropic inflationary Universe with vector hair, *JCAP* **1003**, 023.
- Himmetoğlu 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.
- Himmetoğlu B., Contaldi C. R., & Peloso M.**, 2009b. Instability of anisotropic cosmological solutions supported by vector fields, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 111301.
- Himmetoğlu B., Contaldi C. R., & Peloso M.**, 2009c. Ghost instabilities of cosmological models with vector fields nonminimally coupled to the curvature, *Phys. Rev. D* **80**, 123530.
- Hoftuft J. et al.**, 2009. Increasing evidence for hemispherical power asymmetry in the five-year WMAP data, *Astrophys. J.* **699**, 985.
- Kanno S., Kimura M., Soda J., & Yokoyama S.**, 2008. Anisotropic inflation from vector impurity, *JCAP* **0808**, 034.
- Karčiauskas M.**, 2011. The primordial curvature perturbation from vector fields of general non-abelian groups, [arXiv:1104.3629](https://arxiv.org/abs/1104.3629) [astro-ph.CO].
- Karčiauskas M., Dimopoulos K., & Lyth D. H.**, 2009. Anisotropic non-gaussianity from vector field perturbation, *Phys. Rev. D* **80**, 023509.
- Karčiauskas M. & Lyth D. H.**, 2010. On the health of a vector field with  $(RA^2)/6$  coupling to gravity, *JCAP* **1011**, 023.
- Karlin S. & Taylor H. M.**, 1975. A first course on stochastic processes, Academic Press, New York - USA.
- Koh S. & Hu B.**, 2009. Timelike vector field dynamics in the early Universe, [arXiv:0901.0429](https://arxiv.org/abs/0901.0429) [hep-th].
- Kohri K., Lyth D. H., & Valenzuela-Toledo C. A.**, 2010. On the generation of a non-gaussian curvature perturbation during preheating, *JCAP* **1002**, 023.
- Komatsu E.**, 2010. Hunting for primordial non-gaussianity in the cosmic microwave background, *Class. Quantum Grav.* **27**, 124010.
- Komatsu E. et al.**, 2011. Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: cosmological interpretation, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **192**, 18.
- Kumar J., Leblond L., & Rajaraman A.**, 2010. Scale dependent local non-gaussianity from loops, *JCAP* **1004**, 024.
- Lyth D. H. & Liddle A. R.**, 2009. The primordial density perturbation: cosmology, inflation, and the origin of structure, Cambridge University Press, Cambridge - UK.
- Lyth D. H., Malik K. A., & Sasaki M.**, 2005. A general proof of the conservation of the curvature perturbation, *JCAP* **0505**, 004.
- Lyth D. H. & Rodríguez Y.**, 2005. Inflationary prediction for primordial non-gaussianity, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 121302.

- Ma Y.-Z., Efstathiou G. & Challinor A.**, 2011. Testing a direction-dependent primordial power spectrum with observations of the cosmic microwave background, *Phys. Rev. D* **83**, 083005.
- Maleknejad A. & Sheikh-Jabbari M. M.**, 2011a. Gauge-flation: inflation from non-abelian gauge fields, [arXiv:1102.1513](https://arxiv.org/abs/1102.1513) [hep-ph].
- Maleknejad A. & Sheikh-Jabbari M. M.**, 2011b. Non-abelian gauge field inflation, [arXiv:1102.1932](https://arxiv.org/abs/1102.1932) [hep-ph].
- Mukhanov V.**, 2005. *Physical foundations of cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge - UK.
- Pullen A. R. & Kamionkowski M.**, 2007. Cosmic microwave background statistics for a direction-dependent primordial power spectrum, *Phys. Rev. D* **76**, 103529.
- Rodríguez Y. & Valenzuela-Toledo C. A.**, 2010. On the issue of the  $\zeta$  series convergence and loop corrections in the generation of observable primordial non-gaussianity in slow-roll inflation. Part II: the trispectrum, *Phys. Rev. D* **81**, 023531.
- Sachs R. K. & Wolfe A. M.**, 1967. Perturbations of a cosmological model and angular variations of the microwave background, *Astrophys. J.* **147**, 73.
- Samal P. K., Saha R., Jain P., & Ralston J. P.**, 2009. Signals of statistical anisotropy in WMAP foreground-cleaned maps, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **396**, 511.
- Sasaki M. & Stewart E. D.**, 1996. A general analytic formula for the spectral index of the density perturbations produced during inflation, *Prog. Theor. Phys.* **95**, 71.
- Sasaki M. & Tanaka T.**, 1998. Superhorizon scale dynamics of multiscalar inflation, *Prog. Theor. Phys.* **99**, 763.
- Smidt J. et al.**, 2010. A measurement of cubic-order primordial non-gaussianity ( $g_{\text{NL}}$  and  $\tau_{\text{NL}}$ ) with WMAP 5-year data, [arXiv:1001.5026](https://arxiv.org/abs/1001.5026) [astro-ph.CO].
- Starobinsky A. A.**, 1983. Isotropization of arbitrary cosmological expansion given an effective cosmological constant, *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **37**, 55 [*JETP Lett.* **37**, 66].
- Starobinsky A. A.**, 1985. Multicomponent de Sitter (inflationary) stages and the generation of perturbations, *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **42**, 124 [*JETP Lett.* **42**, 152].
- Valenzuela-Toledo C. A. & Rodríguez Y.**, 2010. Non-gaussianity from the trispectrum and vector field perturbations, *Phys. Lett. B* **685**, 120 (2010).
- Valenzuela-Toledo C. A., Rodríguez Y., & Lyth D. H.**, 2009. Non-gaussianity at tree and one-loop levels from vector field perturbations, *Phys. Rev. D* **80**, 103519.
- Wald R. M.**, 1983. Asymptotic behavior of homogeneous cosmological models in the presence of a positive cosmological constant, *Phys. Rev. D* **28**, R2118.
- Watanabe M.-a., Kanno S., & Soda J.**, 2009. Inflationary Universe with anisotropic hair, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 191302.
- Watanabe M.-a., Kanno S., & Soda J.**, 2010. The nature of primordial fluctuations from anisotropic inflation, *Prog. Theor. Phys.* **123**, 1041.
- Weinberg S.**, 1972. *Gravitation and cosmology: principles and applications of the general theory of relativity*, John Wiley & Sons, New York - USA.
- Weinberg S.**, 2008. *Cosmology*, Oxford University Press, Oxford - UK.
- Yokoyama S. & Soda J.**, 2008. Primordial statistical anisotropy generated at the end of inflation, *JCAP* **0808**, 005.

Recibido: marzo 23 de 2011.

Aceptado para su publicación: mayo 2 de 2011.





# PECES DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER, COLOMBIA

César A. Castellanos-Morales<sup>1,4</sup>, Laura L. Marino-Zamudio<sup>2,4</sup>,  
Lerney Guerrero-V.<sup>1</sup>, Javier A. Maldonado-Ocampo<sup>3</sup>

## Resumen

**Castellanos Morales C. A., L. L. Marino-Zamudio, L. Guerrero-V., J. A. Maldonado-Ocampo:** Peces del departamento de Santander, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (135): 189-212, 2011. ISSN 0370-3908.

Se presenta el estado actual del conocimiento de la diversidad de peces y su distribución por municipios y sistemas acuáticos en el departamento de Santander. Un total de 115 especies nativas distribuidas en ocho ordenes y 34 familias habitan en Santander. El orden taxonómico más diverso fue Siluriformes con 55 especies y 27 géneros, seguido por Characiformes con 40 especies y 28 géneros. Las familias con mayor número de especies fueron Characidae (22 especies), Loricariidae (14 especies). Los sistemas de los ríos Sogamoso y Lebrija presentaron la mayor diversidad (84 y 74 especies, respectivamente). Un total de 13 especies endémicas o restringidas al departamento de Santander fueron identificadas en este trabajo.

**Palabras clave:** peces diversidad, distribución, Colombia.

## Abstract

The biodiversity of fishes and their distribution by municipality and basin in the Santander Department are presented. A total of 115 native species distributed in eight orders and 34 families inhabit the Santander Department. The most diverse order is Siluriformes with 55 species and 27 genera, and Characiformes with 40 species and 28 genera. At the family level, Characidae (22 species) and Loricariidae (14 species) have the greatest numbers of species. The Río Sogamoso and Río Lebrija system show the highest diversity (84 and 74 species, respectively). A total of 13 endemic or restricted species in Santander were identified in this study.

**Key words:** fishes, diversity, distribution, Colombia.

1 Universidad Industrial de Santander, Escuela de Biología, Bucaramanga, Colombia. A.A. 678. Correo electrónico: cesarcas1a@gmail.com

2 Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga, Colombia.

3 Universidade Federal do Rio de Janeiro, Museu Nacional, Departamento de Vertebrados, Quinta da Boa Vista, 20940-040, Rio de Janeiro, R.J, Brazil.

4 Corporación de Investigaciones en Biodiversidad y Medio Ambiente de Santander, BIOMAS.

## Introducción

El departamento de Santander está localizado al nororiente de Colombia y cuenta con una extensión aproximada de 30.537 km<sup>2</sup>, equivalente al 2,7 % del territorio nacional. Su configuración altitudinal varía de occidente a oriente; inicia en 70 m. en el valle medio del río Magdalena, límites con el departamento de Antioquia, hacia el centro del departamento alcanza más de 3.300 m. en la Serranía de los Yarigües, posteriormente, desciende a menos de 300 m. por la depresión geológica del cañón del río Chicamocha; finalmente, se encuentran las zonas más altas que superan los 4.200 m. hacia la vertiente occidental de cordillera Oriental de los Andes, en los límites con el departamento de Norte de Santander (IGAG, 2003).

Santander es un departamento diverso geomorfológicamente, presentando paisajes de montaña, lomerío, piedemonte, planicie y valle. Entre sus formaciones se destacan: 1) El valle húmedo tropical en el margen derecho del río Magdalena, con 69 ciénagas de las cuales las de mayor tamaño son: (citadas de sur a norte) río Viejo, Chucurí, Opón, San Silvestre, El Llanito, Miramar, Corredor, Yarirí, de Paredes, Paturia y Guacamayo (CAS, 2006); 2) La formación de sabana entre los ríos Sogamoso y Lebrija; 3) La zonas áridas en la parte baja de los valles de los ríos Fonce, Suárez y Chicamocha; 4) La formación de páramos en el límite oriental del departamento; 5) La formación de serranía, ubicada en el Parque Nacional Natural Yarigües. Esta variabilidad geomorfológica es responsable en parte, de la diversidad de ecosistemas y especies que presenta el departamento, pues de las 22 zonas de vida (*sensu* Holdridge, 1977) presentes en Colombia, 19 de ellas se encuentran en Santander (Castellanos-Morales, 2001a, b).

Con respecto al sistema hidrográfico santandereano, el departamento exhibe una compleja red de subcuencas que corren en dirección sur-norte u oriente-occidente y desembocan directa o indirectamente en el río Magdalena. Las subcuencas de mayor importancia en el departamento son: Suarez, Chicamocha, Sogamoso, Carare, Opón, Lebrija y La Colorada (Fig. 1); de estas, las de mayor extensión corresponden a los ríos Sogamoso y Lebrija.

La subcuenca del río Sogamoso se origina por la confluencia de los ríos Chicamocha y Suárez. El río Chicamocha tiene dirección oriente - occidente y nace en el costado oriental de Santander en límites con Boyacá, entre sus principales afluentes están los ríos Nevado, Servitá y Guaca. El río Suárez tiene dirección sur - norte y nace en la laguna de Fúquene, en el límite de los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, siendo sus principales tributarios los ríos Tolotá, Oibita, Píenta, Taquiza y Fonce. La cuenca del río

Lebrija está formada por tres ríos principales: de Oro (que corre de sur a norte), Surata y Rionegro (que van en dirección oriente - occidente); todos ellos nacen dentro del departamento (IGAG, 2003).

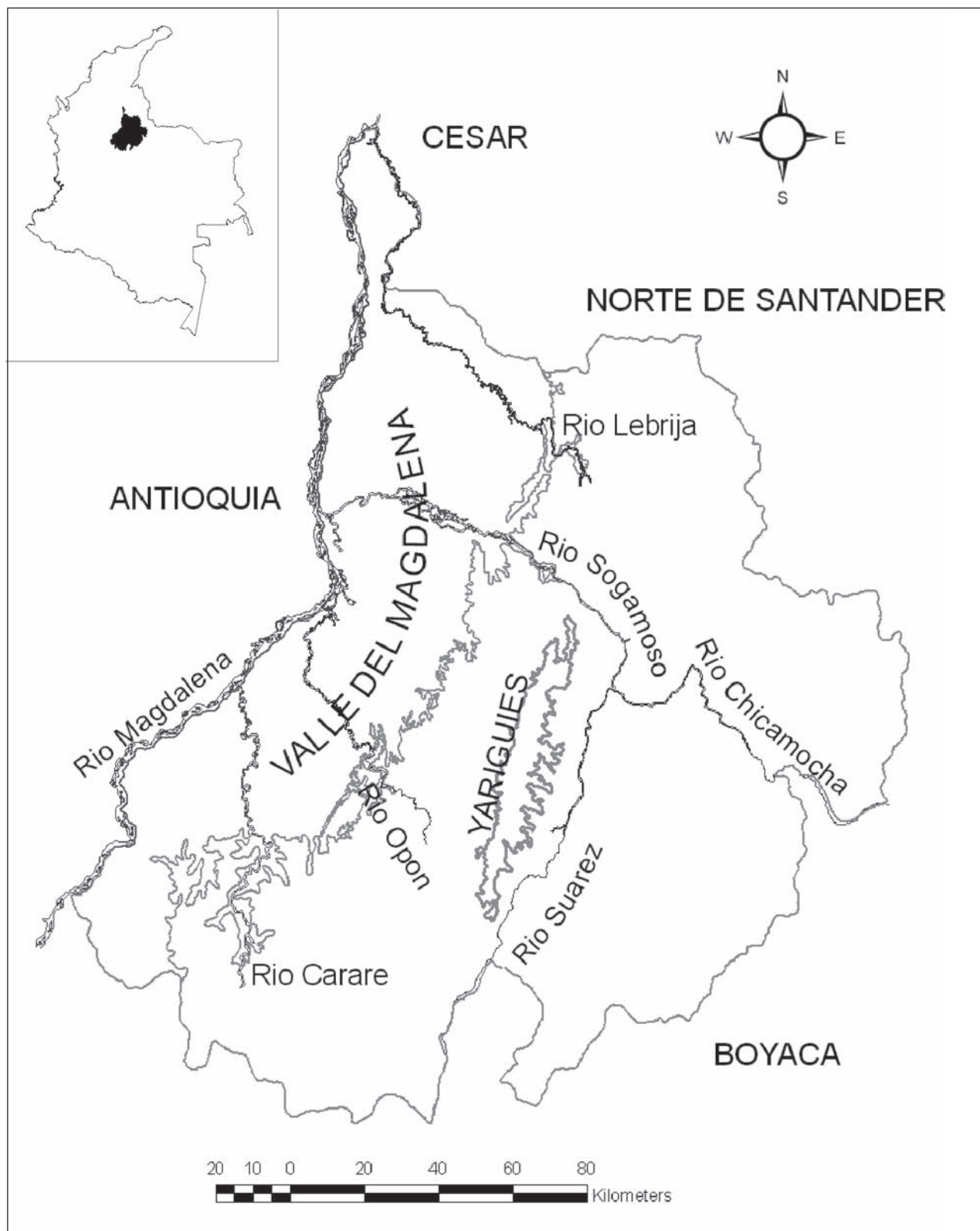
Numerosas publicaciones ictiológicas citan localidades y ejemplares recolectados en Santander. Estos trabajos se caracterizan por registrar nuevas especies o tratar aspectos relacionados a su distribución en las grandes cuencas colombianas. Sin embargo, trabajos enfocados en caracterizar la diversidad íctica dentro del departamento de Santander o sus cuencas hidrográficas son escasos. Actualmente se cuenta con un estudio técnico realizado en el año 2005 para la Corporación Autónoma para la Defensa de Bucaramanga CDMB en la cuenca superior del río Lebrija (Castellanos-Morales, 2005); recientemente Castellanos-Morales *et al.*, (2011) publican los peces de la cuenca alta del río Lebrija.

Los aportes más destacados sobre los peces de agua dulce de Santander provienen tanto de colecciones históricas realizadas principalmente por investigadores extranjeros: Steindachner (1902), Eigenmann (1916, 1917, 1918, 1919, 1922), Fowler (1943), Miles (1947), Dalh (1971); así como de estudios recientes adelantados por ictiólogos colombianos: Martínez-M (1973, 2008); Ardila-Rodríguez (1994, 2001, 2006, 2007a, 2007b), Román-Valencia & Ruiz-C (2007), Román-Valencia & Arcila-M (2010), Román-Valencia *et al.* (2008, 2009), Torres-Mejía & Vari (2005), Maldonado-Ocampo & Albert (2004), Maldonado-Ocampo *et al.* (2005), Castellanos-Morales (2005, 2007, 2008, 2010), Buitrago & Burr (2007), Castellanos-Morales *et al.* (2011).

Este trabajo presenta el estado actual del conocimiento de la diversidad de peces que habitan el departamento de Santander. Se incluyen además, datos relacionados a riesgos de extinción y distribución de especies por cuencas y municipios del departamento.

## Materiales y métodos

El listado de especies que habitan el departamento de Santander está basado en la revisión de literatura y la consulta de especímenes depositados en las siguientes colecciones ictiológicas: colección de peces de agua dulce del Instituto Alexander von Humboldt (IAvHP), Villa de Leyva; colección ictiológica del Instituto de Ciencias Naturales-Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional de Colombia (ICNMHN), Bogotá D.C.; colección ictiológica del Museo La Salle (MLS), Bogotá D.C.; colección ictiológica de la Universidad Industrial de Santander (UIS-T), Bucaramanga, y colección ictiológica César Castellanos



**Figura 1.** Ubicación y principales cuencas hidrográficas del departamento de Santander. Tomado de Castellanos *et al.* (2011).

- Corporación Autónoma para la Defensa de Bucaramanga (CAC-CDMB), Bucaramanga.

Los registros de localidades para cada especie se organizaron alfabéticamente por municipios. Los registros correspondientes a colecciones históricas se cotejaron con los mapas disponibles en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, en la ciudad de Bucaramanga, esto permitió identificar errores tipográficos en las publicaciones originales. La clasificación taxonómica adoptada para órdenes y familias es la propuesta por **Reis et al.** (2003). Las especies dentro de cada género se ordenaron alfabéticamente. Las especies con algún grado de amenaza se determinaron de acuerdo con **Mojica et al.** (2002).

## Resultados

### Diversidad

Se registra un total de 115 especies de peces que habitan los cuerpos de agua del departamento de Santander. Las especies están distribuidas en ocho órdenes y 34 familias; El orden más diverso a nivel de género (total 27) y especies (55/47,8%) fue Siluriformes, seguido de Characiformes con 28 géneros y 40 especies equivalentes al 34,7%. Los órdenes restantes contienen entre 1 y 8 especies. Las familias más ricas en especies son Characidae (22/19,1%) y Loricariidae (14/12,2%), seguidas por Trichomycteridae (13) y Astroblepidae (12). Las familias restantes presentan entre 1 y 4 especies (Anexo 1).

### Registros por municipios

De los 87 municipios que conforman el departamento de Santander, 40 cuentan con algún tipo de registro ictiológico, lo que significa que a la fecha sólo se ha explorado 46% del territorio departamental. Los municipios que presentan el mayor número de registros de especies son:

Lebrija (45 spp.), Barrancabermeja (39 spp.) y Sabana de Torres (28 spp.) los cuales están en el área de las cuencas de los ríos Lebrija (Lebrija y Sabana de Torres) y Sogamoso (Barrancabermeja). Otros municipios proporcionaron un significativo número de especies, entre ellos Girón (20), Piedecuesta (18), San Gil (16), Rionegro (14) y Suaita (11). Los registros aportados por estos municipios provienen de las subcuencas de los ríos de Oro (Girón), Chicamocha (Piedecuesta), Fonce (San Gil), Suárez (Suaita) y Lebrija (Rionegro).

### Registros por cuencas

La cuenca del río Sogamoso, que incluye las subcuencas Suárez y Chicamocha, y la del río Lebrija fueron las que aportaron el mayor número de registros ícticos para Santander. En el sistema del Sogamoso habitan 84 especies distribuidas en 56 géneros, 27 familias y 7 órdenes. Siluriformes fue el orden más diverso en la cuenca con 39 especies, seguido por Characiformes con 32 especies. En el sistema del río Lebrija se registra la existencia de 74 especies distribuidas en 57 géneros, 30 familias y 7 órdenes. El orden más diverso para esta cuenca fue Siluriformes con 36 especies, seguido por Characiformes con 25 especies. Los ordenes restantes contienen entre 1 y 4 especies. Por su parte, los sistemas de Carare y Opón sólo cuentan con 5 y 8 especies registradas cada uno. El sistema de la Colorada cuenta con 3 registros.

### Riesgos de extinción

El 9,5% de las especies aquí registradas para Santander están bajo alguna categoría de amenaza según **Mojica et al.**, (2002) (Tabla 1). De estas, la más amenazada a corto plazo es el bocachico (*Prochilodus magdalenae*, se encuentra en la categoría *crítica* -CR-). Es probable que situaciones como la excesiva explotación comercial, no

**Tabla 1.** Especies distribuidas en el departamento de Santander incluidas bajo diversas categorías de amenaza en el libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia (Mojica et al. 2002). CR = crítica; EN = en peligro; VU = vulnerable.

Familia	Especie	Categoría
Prochilodontidae	<i>Prochilodus magdalenae</i>	CR
	<i>Ichthyoelephas longirostris</i>	EN
Pimelodidae Pimelodidae	<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	EN
	<i>Sorubim cuspicaudus</i>	EN
	<i>Ageneiosus pardalis</i>	EN
Auchenipteridae	<i>Curimata mivarti</i>	VU
Curimatidae	<i>Abramites eques</i>	VU
Anostomidae	<i>Salminus affinis</i>	VU
Characidae	<i>Grundulus bogotensis</i>	VU
	<i>Apteronotus magdalenensis</i>	VU
Gymnotidae	<i>Plagioscion magdalenensis</i>	VU
Sciaenidae		

respetar las tallas mínimas e incumplir la normatividad vigente sobre las épocas de veda sugeridas, hayan provocado la dramática declinación poblacional de esta especie. Las especies restantes están catalogadas en las categorías *en peligro* (EN) y *vulnerable* (VU). Es importante resaltar como especies recientemente descritas de sistemas en el departamento de Santander, como *Gymnotus ardiai* Maldonado-Ocampo & Albert 2004, endémica de la cuenca del río de Oro, igualmente se encuentra bajo grave peligro por la alteración de su hábitat como resultado de la deforestación, contaminación y extracción de material del lecho del río.

### Listado de especies

Se presenta a continuación los registros de peces que habitan en los diferentes cuerpos de agua del departamento de Santander.

## ORDEN MYLIOBATIFORMES

### Familia Potamotrygonidae

#### 1. *Potamotrygon magdalenae* (Valenciennes, 1865)

=*Taeniura magdalenae* Valenciennes en Duméril, 1865. **Localidad tipo:** Colombia, río de la Magdalena. **Holotipo:** MNHN 2368. **Nombre común:** raya.

**Registros:** BARRANCABERMEJA: ciénaga El Llanito; ciénaga San Silvestre. **LEBRIJA:** Bodega Central, río Lebrija. **PUERTO WILCHES:** humedales de Puerto Wilches. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Paredes; caño Peruétano.

## ORDEN CLUPEIFORMES

### Familia Clupeidae

#### 2. *Opisthonema* sp.

**Registros:** SABANA DE TORRES: ciénaga de Paredes.

**Observaciones:** este es el primer registro de este género para el sistema del Magdalena.

## ORDEN CHARACIFORMES

### Familia Parodontidae

#### 3. *Parodon suborbitalis* (Valenciennes, 1850)

= *Parodon suborbitale* Valenciennes, en Cuvier & Valenciennes, 1850. **Localidad tipo:** Venezuela, Lago de Maracaibo. **Lectotipo:** MNHN 1807.

**Registros:** BARRANCABERMEJA: caño Juan Esteban. **GIRÓN:** río de Oro. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Paredes; caño Peruétano.

#### 4. *Saccodon dariensis* (Meek & Hildebrand, 1913)

= *Parodon dariensis* Meek & Hildebrand, 1913. **Localidad tipo:** Panamá, Cituro, río Cupe. **Holotipo:** FMNH 7587. **Nombre común:** rayado.

**Registros:** LEBRIJA: río Lebrija. **SURATA:** río Surata.

## Familia Curimatidae

#### 5. *Curimata mivartii* (Steindachner, 1878)

= *Curimatus mivartii* Steindachner, 1878. **Localidad tipo:** Colombia, río Magdalena. **Lectotipo:** NMW 68759. **Nombre común:** vizcaína.

**Registros:** BARRANCABERMEJA: humedales de Barrancabermeja; río Sogamoso. **LEBRIJA:** río Lebrija.

#### 6. *Cyphocharax magdalenae* (Steindachner, 1878)

= *Curimatus magdalenae* Steindachner, 1878. **Localidad tipo:** Colombia, río Magdalena. **Lectotipo:** NMW 68873. **Nombre común:** pincho.

**Registros:** BARRANCABERMEJA: ciénaga El Llanito; ciénaga San Silvestre; caño Juan Esteban; río Sogamoso. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Paredes.

## Familia Prochilodontidae

#### 7. *Ichthyoelephas longirostris* (Steindachner, 1879)

=*Prochilodus longirostris* Steindachner, 1879. **Localidad tipo:** Colombia, río Cauca. **Holotipo:** desconocido. **Nombre común:** hocicón, besote, pataló.

**Registros:** BARRANCABERMEJA: caño San Silvestre; río Sogamoso. **LEBRIJA:** quebrada La Angula; río Lebrija sector bocas. **MATANZA:** río Surata, sistema río de Oro. **SAN GIL:** río Fonce.

#### 8. *Prochilodus magdalenae* Steindachner, 1879

= *Prochilodus asper magdalenae* Steindachner, 1879. **Localidad tipo:** Colombia, río Magdalena. **Sintipos:** NMW 56627, 56624, 56625. **Nombre común:** bocachico.

**Registros:** BARRANCABERMEJA: ciénaga El Llanito; ciénaga San Silvestre; caño Juan Esteban.

**EL CARMEN DE CHUCURÍ:** río Cascajales, afluente del río La Colorada. **GIRÓN:** río de Oro; río Sogamoso; quebrada La Putana. **LANDAZURI:** río Horta, afluente río Carare. **LEBRIJA:** confluencia quebrada La Angula con el río Lebrija. **PIEDE-CUESTA:** río Chicamocha. **PUERTO PARRA:** río Opón. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Paredes. **SIMACOTA:** parte baja quebrada Santa Rosa, afluente del río Suárez.

#### Familia Anostomidae

##### 9. *Abramites eques* (Steindachner, 1878)

= *Leporinus eques* Steindachner, 1878. **Localidad tipo:** Colombia, río Magdalena. **Holotipo:** desconocido. **Nombre común:** bonito, viejo.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** ciénaga El Llanito. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Paredes; caño Peruétano.

##### 10. *Leporinus muyscorum* Steindachner, 1901

**Localidad tipo:** Colombia, departamento de Santander, río Lebrija. **Holotipo:** desconocido. **Nombre común:** comelón.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** ciénaga El Llanito; ciénaga San Silvestre; río Sogamoso. **GIRÓN:** río de Oro. **LEBRIJA:** río Lebrija; quebrada La Angula. **PIEDRECUESTA:** río Chicamocha. **PUERTO PARRA:** ríos del sistema Opón. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Paredes; caño Peruétano. **SOCORRO:** río Suárez.

#### Familia Crenuchidae

##### 11. *Characidium fasciatum* Reinhardt, 1867

**Localidad tipo:** Brasil, Minas, Soumidouro, cerca del Lago Santa. **Lectotipo:** ZMUCP 241103.

**Registros:** **SABANA DE TORRES:** quebrada La Gómez, tributario ciénaga de Paredes. **SUAITA:** vereda Pénjamo, quebrada La Batea, afluente río Suárez.

#### Familia Gasteropelecidae

##### 12. *Gasteropelecus maculatus* Steindachner, 1879

**Localidad tipo:** Panamá, Chepo, río Mamomi. **Sintipo:** NMW.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** quebradas del área rural. **SUAITA:** vereda Pénjamo, quebrada La

Batea, afluente río Suárez. **PUERTO PARRA:** ríos sistema Opón.

#### Familia Characidae

##### 13. *Astyanax bimaculatus* (Linnaeus, 1758)

= *Salmo bimaculatus* Linnaeus, 1758. **Localidad tipo:** América meridional. **Sintipo:** BMNH 1853. 11.12.34. **Nombre común:** sardina.

**Registros:** **SAN GIL:** ríos de San Gil, sistema río Fonce.

##### 14. *Astyanax magdalenae* Eigenmann & Henn, 1916

**Localidad tipo:** Colombia, Girardot. **Holotipo:** FMNH 57006. **Nombre común:** sardina.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** ciénaga El Llanito; ciénaga San Silvestre; caño Juan Esteban. **LEBRIJA:** río Lebrija. **PIEDRECUESTA:** río Chicamocha. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Paredes; caño Peruétano.

##### 15. *Bryconamericus arilepis* Román-Valencia, Vanegas-Ríos & Ruiz-C., 2008

**Localidad tipo:** Colombia, departamento de Santander, municipio Charalá, quebrada La Pontesuela. **Holotipo:** IUQ 1917.

**Registros:** **SAN GIL:** río Fonce; quebrada La Pontesuela, sistema río Suárez.

##### 16. *Bryconamericus fonsensis* Román-Valencia, Vanegas-Ríos & Ruiz-C., 2009

**Localidad tipo:** Colombia, departamento de Santander, municipio Charalá, vereda Los Chinitos, río Pienta. **Holotipo:** IUQ 1941.

**Registros:** **CHARALÁ:** quebradas La Potrera, El Barro, La Sanguina; río Fonce, San Gil; río Pienta, afluente río Fonce, sistema río Suárez. **MOGOTES:** quebrada Guayawata; río Mogoticos (no río Mogotes, Román-Valencia *et al.*, 2009), sistema río Suárez.

##### 17. *Bryconamericus plutarcoi* Roman-Valencia, 2001

**Localidad tipo:** Colombia, departamento de Santander, parte baja quebrada Santa Rosa, afluente del río Suárez. **Holotipo:** ICNMHN 4886.

**Registros:** **OCAMONTE:** quebrada Moraría, afluente río Fonce. **SIMACOTA:** parte baja quebrada Santa Rosa, afluente río Suárez.

**18. *Creagrutus affinis*** Steindachner, 1880

**Localidad tipo:** Colombia, río Cauca. **Lectotipo:** NMW 67120.1. **Nombre común:** sardina blanca.

**Registros:** **LEBRIJA:** sistema río Lebrija.

**19. *Creagrutus brevipinnis*** Eigenmann, 1913

**Localidad tipo:** Colombia, Piedra de Moler. **Holotipo:** FMNH 56095.

**Registros:** **SUAITA:** vereda Penjamo, quebrada La Batea, afluente río Suárez.

**20. *Creagrutus guanes*** Torres-Mejía & Vari, 2005

**Localidad tipo:** Colombia, departamento de Santander, municipio Valle de San José, río Fonce. **Holotipo:** ICNMHN 8520.

**Registros:** **VALLE DE SAN JOSÉ:** río Fonce; río Mogoticos, sistema río Suárez.

**21. *Creagrutus* sp.**

**Registros:** **SAN GIL:** ríos de San Gil.

**22. *Grundulus bogotensis*** (Humboldt, 1821)

= *Poecilia bogotensis* Humboldt 1821. **Localidad tipo:** Colombia, planicies de Bogotá. **Holotipo:** desconocido

**Registros:** **SUAITA:** quebrada de Suaita, afluente río Suárez.

**23. *Hemibrycon colombianus*** Eigenmann, 1914

**Localidad tipo:** Colombia, departamento de Santander, municipio San Gil, río Fonce (no río San Gil Eigenmann, 1914). **Holotipo:** FMNH 56653. **Nombre común:** golosa, sardina.

**Registros:** **CAPITANEJO:** río nevado, sistema río Chicamocha. **FLORIDABLANCA:** río Frío. **PIEDE-CUESTA:** río Manco; río Chicamocha. **PLAYÓN:** quebrada La Naranjera, afluente río Playón, sistema río Lebrija. **SAN GIL:** río Fonce, sistema río Suárez.

**Observaciones:** de acuerdo con el mapa de la lamina XXXVI en Eigenmann, 1922, la localidad río San Gil está ubicada en el río Fonce, por lo que este ultimo corresponde a la localidad tipo. Además, el río Fonce atraviesa el municipio de San Gil y es el río más importante de la región.

**24. *Hemibrycon dentatus*** (Eigenmann, 1913)

= *Bryconamericus dentatus* Eigenmann, 1913. **Localidad tipo:** Colombia, Piedra de Moler. **Holotipo:** FMNH 56095.

**Registros:** **LEBRIJA:** río Lebrija.

**25. *Hemibrycon tolimae*** (Eigenmann, 1913)

= *Bryconamericus tolimae* Eigenmann, 1913. **Localidad tipo:** Colombia, departamento de Tolima, Ibagué. **Holotipo:** FMNH 56257. **Nombre común:** sardina pintada.

**Registros:** **FLORIDABLANCA:** río Frío, sistema río de Oro. **PIEDRECUESTA:** río Chicamocha; río Manco. **RIONEGRO:** río Santa Cruz, sistema río Lebrija. **SAN GIL:** río Fonce. **VALLE DE SAN JOSE:** río Mogoticos.

**26. *Hemibrycon virolinica*** Román-Valencia & Arcila-Mesa, 2010

**Localidad tipo:** Colombia, departamento de Santander, municipio Charalá, riachuelo de Virolín, cuenca del río Cañaverales. **Holotipo:** ICNMHN 6704.

**Registros:** **CHARALÁ:** riachuelos Virolín y La Cristalda; río Luisito, afluente río Oibita, río Cañaverales, sistema río Suárez.

**27. *Hyphessobrycon proteus*** Eigenmann, 1913

**Localidad tipo:** Colombia, Quibdo. **Holotipo:** FMNH 56293.

**Registros:** **SUAITA:** vereda Penjamo, quebrada La Batea, sistema río Suárez.

**28. *Salminus affinis*** Steindachner, 1880

**Localidad tipo:** Colombia, Cauca. **Lectotipo:** NMW 78042.02. **Nombre común:** picuda

**Registros:** **CIMITARRA:** ríos de Cimitarra, sistema de los ríos Carare-Opón. **BARRANCABERMEJA:** río Sogamoso.

**29. *Triportheus magdalenae*** (Steindachner, 1878)

= *Chalcinus magdalenae* Steindachner, 1878). **Localidad tipo:** Colombia, Ciénaga, río Magdalena. **Sintipo:** NMW 69151-54. **Nombre común:** arenca.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** ciénaga El Llanito; caño San Silvestre; ciénaga San Silvestre;



río Sogamoso. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Paredes; caño Peruetano.

### Subfamilia Bryconinae

#### 30. *Brycon henni* Eigenmann, 1913

**Localidad tipo:** Colombia, Caldas. **Holotipo:** FMNH 56384. **Nombre común:** sabaleta, sardinata.

**Registros:** **BUCARAMANGA:** río Tonita, afluente río de Oro. **FLORIDABLANCA:** río La Esperanza, afluente río Lebrija. **PIEDRECUESTA:** río Chicamocha; río Manco. **PLAYÓN:** quebrada La Naranjera, afluente río Playón, sistema río Lebrija. **RIONEGRO:** quebrada el Aburrido, afluente río de Oro. **LEBRIJA:** río Santa Cruz, afluente río Lebrija. **SUAITA:** vereda Pénjamo, quebrada La Batea, afluente río Suárez.

#### 31. *Brycon labiatus* Steindachner, 1879

**Localidad tipo:** Colombia, río Cauca. **Holotipo:** NMW s.n. **Nombre común:** dorado.

**Registros:** **LEBRIJA:** Barrancas, río Lebrija.

#### 32. *Brycon moorei* Steindachner, 1878

**Localidad tipo:** Colombia, Ciénaga, río Magdalena. **Holotipo:** desconocido. **Nombre común:** dorada, mueluda.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA – SABANA DE TORRES:** sistema río Sogamoso. **Lebrija:** río Lebrija. **PUERTO WILCHES:** quebrada La Cayumba, afluente río Sogamoso.

### Subfamilia Characinae

#### 33. *Cynopotamus magdalenae* (Steindachner, 1878)

= *Anacyrtus (Cynopotamus) magdalenae* Steindachner, 1878. **Localidad tipo:** Colombia, río Magdalena. **Sintipo:** NMW 62501-01. **Nombre común:** chango.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** ciénaga El Llanito; río Sogamoso; **SABANA DE TORRES:** ciénaga de paredes, caño Peruetano.

#### 34. *Roeboides dayi* (Steindachner, 1878)

= *Anacyrtus (Rhaeboides) dayi* Steindachner, 1878. **Localidad tipo:** Colombia, río Magdalena. **Holotipo:** NMW 67132. **Nombre común:** sardina blanca.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** ciénaga El Llanito; caño San Silvestre; ciénaga San Silvestre;

río Sogamoso. **GIRÓN:** río de Oro. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Paredes. **SAN VICENTE DE CHUCURÍ:** río Chucurí, afluente río Sogamoso. **SUAITA:** vereda Pénjamo, quebrada La Batea, afluente río Suárez.

### Subfamilia Cheirodontinae

#### 35. *Saccoderma hastatus* (Eigenmann, 1913)

= *Odontostilbe hastatus* Eigenmann, 1913). **Localidad tipo:** Colombia, Soplaviento. **Holotipo:** FMNH 56383.

**Registros:** **SUAITA:** vereda Pénjamo, quebrada La Batea, afluente río Suárez.

### Subfamilia Glandulocaudinae

#### 36. *Argopleura magdalenensis* (Eigenmann, 1913)

= *Bryconamericus magdalenensis* Eigenmann, 1913. **Localidad tipo:** Colombia, Girardot. **Holotipo:** FMNH 56263. **Nombre común:** sardina.

**Registros:** **LEBRIJA:** río Lebrija.

#### 37. *Gephyrocharax melanocheir* Eigenmann, 1912

**Localidad tipo:** COLOMBIA, quebrada Bernal. **Holotipo:** FMNH56383

**Registros:** **SUAITA:** vereda Pénjamo, quebrada La Batea, afluente río Suárez.

### Familia Erythrinidae

#### 38. *Hoplias malabaricus* (Bloch, 1794)

= *Esox malabaricus* Bloch, 1794. **Localidad tipo:** Sur América, probablemente Surinam. **Holotipo:** desconocido. **Nombre común:** moncholo, guabina, perra loca.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** ciénaga El Llanito, ciénaga San Silvestre; caño Juan Esteban; río Sogamoso. **GIRÓN:** río de Oro. **LEBRIJA:** río Lebrija. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Paredes; quebrada La Gómez.

### Familia Lebiasinidae

#### 39. *Lebiasina chucuriensis* Ardila-Rodríguez, 2001

**Localidad tipo:** Colombia, departamento de Santander, municipio San Vicente de Chucurí, quebrada La Carbonera, afluente del río La Llana, cuenca del río de la Magdalena. **Holotipo:** CAR 150424. **Nombre común:** sardina.

**Registros:** SAN VICENTE DE CHUCURÍ: quebrada La Carbonera y quebrada Agua Linda, afluyente río Oponcito, sistema La Colorada.

**40. *Lebiasina floridablancarensis*** Ardila-Rodríguez, 1994

**Localidad tipo:** Colombia, departamento de Santander, municipio Floridablanca, quebrada El Gaque, tributario del río Aranzoque, cuenca superior del río Lebrija. **Holotipo:** CAR 150401. **Nombre común:** volador.

**Registros:** BOLÍVAR: arrollo del río Horta, afluyente río Carare. FLORIDABLANCA: quebradas El Gaque, las Pavas, Mariposas y río Aranzoque, sistema río Lebrija. GIRÓN: quebrada El Palmar, sistema río Lebrija. RIONEGRO: río Rionegro, afluyente río Lebrija.

**41. *Piabucina pleurotaenia*** Regan, 1903

**Localidad tipo:** Venezuela, Mérida. **Sintipo:** BMNH 1902.7.29.91-91. **Nombre común:** volador.

**Registros:** BUCARAMANGA: río en Bucaramanga.

**Familia Ctenoluciidae**

**42. *Ctenolucius hujeta*** (Valenciennes, 1850)

= *Xiphostoma hujeta* Valenciennes, 1850. **Localidad tipo:** Venezuela, Rivières de Maracaïbo basin. **Lectotipo:** MNHN 4231. **Nombre común:** agujeta.

**Registros:** BARRANCABERMEJA: humedales de Barrancabermeja; ciénaga El Llanito; caño San Silvestre; río Sogamoso. SABANA DE TORRES: ciénaga de Paredes.

**ORDEN SILURIFORMES**

**Familia Cetopsidae**

**43. *Cetopsis othonops*** (Eigenmann, 1912)

= *Hemicetopsis othonops* Eigenmann, 1912. **Localidad tipo:** Colombia, Girardot. **Holotipo:** FMNH 56040. **Nombre común:** ciegitó

**Registros:** BARRANCABERMEJA: río Sogamoso. LEBRIJA: río Lebrija.

**Familia Aspredinidae**

**44. *Dupouyichthys sapito*** Schultz, 1944

**Localidad tipo:** Venezuela, río Motatán, hacia el Puente, 22 km al norte de Motatán. **Holotipo:** USNM 121072.

**Registros:** LEBRIJA: río Lebrija. SAN VICENTE DE CHUCURÍ: río La Cascajera, sistema La Colorada.

**Familia Trichomycteridae**

**45. *Paravandellia phaneronema*** (Miles, 1943)

= *Branchioica phaneronema* Miles, 1943 **Localidad tipo:** alto río Cauca. **Holotipo:** desaparecido.

**Registros:** LEBRIJA: río Lebrija. SOCORRO: río Suárez.

**46. *Trichomycterus bogotensis*** (Eigenmann, 1912)

= *Pygidium bogotense* Eigenmann, 1912. **Localidad tipo:** Colombia, departamento de Cundinamarca, puente de Suba, planicies de Bogotá a una elevación cercana a los 9000 pies. **Holotipo:** FMNH 56030.

**Registros:** CHARALÁ: quebrada de Charalá, afluyente río Fonce, sistema río Suárez.

**47. *Trichomycterus latistriatus*** (Eigenmann, 1917)

= *Pygidium latistriatum* Eigenmann, 1917. **Localidad tipo:** Colombia, departamento de Santander, municipio Pinchote, quebrada de Pinchote. **Holotipo:** FMNH 58449.

**Registros:** GIRÓN: río de Oro. PINCHOTE: quebrada de Pinchote, afluyente río Fonce. RIONEGRO: río Santa Cruz, afluyente río Lebrija.

**48. *Trichomycterus nigromaculatus*** Boulenger, 1887

**Localidad tipo:** Andes de Colombia. **Sintipos:** BMNH 1880.2.26.16-17 (2).

**Registros:** CAPITANEJO: quebrada de Capitanejo y quebrada de Cachivó, sistema río Chicamocha.

**49. *Trichomycterus ruitoquensis*** Ardila-Rodríguez, 2007

**Localidad tipo:** Colombia, departamento de Santander, municipio Floridablanca, río Frío, sector "La Clausen", cuenca del río Lebrija. **Holotipo:** CAR 340. **Nombre común:** lauchas.

**Registros:** FLORIDABLANCA: río Frío, quebrada las Guayanas y río Aranzoque, sistema río de Oro. PIEDECUESTA: río El Hato, afluyente río Lebrija.

**50. *Trichomycterus sandovali*** Ardila-Rodríguez, 2006

**Localidad tipo:** Colombia, departamento de Santander, municipio Zapatoca, Cueva de Don Juan. **Holotipo:** CAR 116.

**Registros:** ZAPATOCA: Cueva de Don Juan, sistema río Suárez.

**51. *Trichomycterus santanderensis*** Castellanos-Morales, 2007

**Localidad tipo:** Colombia, departamento de Santander, municipio Lebrija, cueva El Puente, cuenca superior del Río Lebrija. **Holotipo:** CAC-CDMB 035.

**Registros:** LEBRIJA: vereda Portugal, cueva El Puente, sistema río Lebrija.

**52. *Trichomycterus sketi*** Castellanos-Morales, 2010

**Localidad:** Colombia, Santander, municipio La Paz, cuenca superior río Opón. **Holotipo:** CAC-CDMB 104.

**Registros.** LA PAZ: río en la Paz, sistema río Opón.

**53. *Trichomycterus straminus*** (Eigenmann, 1917)

= *Pygidium straminium* Eigenmann, 1917. **Localidad tipo:** Colombia, departamento de Santander, municipio Piedecuesta, río Manco (no quebrada El Mango, Eigenmann 1917; no quebrada El Manco, Maldonado-Ocampo *et al.* 2005). **Holotipo:** FMNH 58105.

**Registros:** PIEDECUESTA: río Manco, sistema río Chicamocha. **SAN GIL:** río en San Gil. **OCA-MONTE:** quebrada de Ocamonte (no quebrada Deocamonte, Eigenmann 1917), sistema río Suárez.

**54. *Trichomycterus striatus*** (Meek & Hildebrand, 1913)

= *Pygidium striatum* Meek & Hildebrand, 1913. **Localidad tipo:** Panamá, río Cana en el canal de Panamá. **Holotipo:** FMNH 7579.

**Registros:** PIEDECUESTA: río Chicamocha. **SAN BENITO:** quebrada Ropero (no quebrada de la Ropera, Eigenmann 1918) **SAN GIL:** río Fonce y Mogoticos, sistema río Suárez.

**55. *Trichomycterus transandianus*** (Steindachner, 1915)

= *Pygidium taenia transandianum* Steindachner, 1915. **Localidad Tipo:** Colombia, Cordillera Central,

arroyo de montaña en el cañón del Gallo, río Combeima. **Sintipo:** NMW 44475.

**Registros:** LANDAZURI: río Horta, sistema río Carare.

**Observaciones:** Este es el primer registro que se conoce de esta especie para el medio Magdalena.

**56. *Trichomycterus uisae*** Castellanos-Morales, 2008

**Localidad Tipo:** Colombia, Santander, municipio Los Santos, Cueva El Misterio, cuenca superior del río Sogamoso. **Holotipo:** CAC-CDMB 072. **Nombre común:** trepador.

**Registros:** LOS SANTOS: vereda Mesa de Los Santos, Cueva El Misterio, cuenca superior del río Sogamoso.

**Observaciones:** esta especie se encuentra actualmente en prensa.

**57. *Trichomycterus* sp.**

**Registros.** VELEZ: ríos del municipio, sistema río Suárez.

**Familia Astroblepidae****58. *Astroblepus chapmani*** (Eigenmann, 1912)

= *Cyclopium chapmani* Eigenmann, 1912. **Localidad tipo:** Colombia, Boquía. **Holotipo:** FMNH 56071.

**Registros:** PIEDECUESTA: río Manco; río Chicamocha.

**59. *Astroblepus chotae*** (Regan, 1904)

= *Arges chotae* Regan, 1904. **Localidad tipo:** Ecuador, norte, Valle de Chota. **Holotipo:** BMNH 1898.11.4.22.

**Registros:** LEBRIJA: río Lebrija. **CHARALÁ:** corregimiento Virolín. **MATANZA:** quebrada en la vereda Santa Bárbara, sistema río Lebrija. **OIBA:** quebrada Las Lajas, sistema río Suárez. **SIMACOTA:** quebrada Guamaca, afluente río Suárez

**60. *Astroblepus cyclopus*** (Humboldt, 1805)

= *Pimelodus cyclopus* Humboldt, 1805. **Localidad tipo:** Ecuador, cuenca del río Esmeraldas, aguas subterráneas de los andes de Quito. **Holotipo:** desconocido.

**Registros:** CHARALÁ: ríos de Charalá. **LEBRIJA:** quebrada El Roble, sistema río Lebrija. **MATANZA:**

quebrada en la vereda Santa Bárbara, sistema río Lebrija. **SAN GIL:** río en San Gil. **SIMACOTA:** quebrada Guamaca, afluente río Suárez

**61. *Astroblepus frenatus*** Eigenmann, 1918

**Localidad tipo:** Colombia, Santander, quebrada de San Joaquín. **Holotipo:** FMNH 58384.

**Registros:** **SAN JOAQUÍN:** río San Joaquín (no quebrada de San Joaquín, Eigenmann 1918), sistema río Chicamocha.

**62. *Astroblepus grixalvii*** Humboldt, 1805

**Localidad tipo:** Colombia, departamento del Cauca, río Palacé cerca a Popayán. **Holotipo:** desconocido.

**Registros:** **CHARALÁ:** ríos de Charalá, sistema río Fonce, afluente del río Suárez.

**63. *Astroblepus guentheri*** (Boulenger, 1887)

= *Stygogenes guentheri* Boulenger, 1887. **Localidad tipo:** Colombia. **Sintipo:** BMNH 1880.2.26.18-25.

**Registros:** **PLAYÓN:** quebrada La Naranjera, afluente río Playón – Cáchira del Sur, sistema río Lebrija.

**64. *Astroblepus homodon*** (Regan, 1904)

= *Arges homodon* Regan, 1904. **Localidad tipo:** Colombia, municipio de Cundinamarca, Villeta, 3500 ft. **Holotipo:** BMNH 1902.5.15.27.

**Registros:** **BARICHARA:** río Suárez; **SAN GIL:** sistema río Fonce.

**65. *Astroblepus latidens*** (Eigenmann, 1918)

**Localidad tipo:** Colombia. Piperel. **Holotipo:** FMNH58366.

**Registros:** **SAN GIL:** río Fonce; río Suárez.

**66. *Astroblepus longifilis*** (Steindachner, 1882)

= *Arges longifilis* Steindachner, 1882. **Localidad tipo:** Perú, río Huambo y de Tortora. **Sintipos:** NMW.

**Registros:** **CHARALÁ:** pozo Luisito; quebrada La Guariela. **CHIMA:** quebrada El Rodeo, sistema Suárez **GUAPOTÁ:** ríos del municipio de Guapotá, sistema río Suárez. **MOGOTES:** quebradas de Mogotes, sistema río Fonce. **SAN GIL:** río Fonce. **SIMACOTA:** Quebrada La India, afluente río Suárez.

**67. *Astroblepus micrescens*** Eigenmann, 1918

= *Astroblepus grixalvii micrescens* Eigenmann, 1918. **Localidad Tipo:** Colombia, Santander, quebrada de Agua Larga. **Holotipo:** FMNH 58376.

**Registros:** **CAPITANEJO:** río Nevado, sistema río Chicamocha. **CHARALA:** quebrada la Guariela, sistema río Fonce; río Luisito, afluente río Oibita, sistema río Suárez. **ENCINO:** quebrada de Encino (no Densino, Eigenmann, 1918). **ONZAGA:** quebrada de potrero, afluente río Susa. **PIEDRECUESTA:** finca El Diviso, sistema río de Oro. **SAN JOAQUÍN:** río San Joaquín (no quebrada de San Joaquín, Eigenmann 1918); quebrada de Agua Larga, quebrada de la Pelada. **SIMACOTA:** río Guamaca, sistema río Suárez.

**68. *Astroblepus orientalis*** (Boulenger, 1903)

= *Arges orientalis* Boulenger, 1903. **Localidad tipo:** Venezuela, Mérida, ríos Albirregas y Milla. 3500 m. **Sintipos:** BMNH 1903.6.30.81–89, USNM 133142.

**Registros:** **SANTANDER:** Cuenca Medio Magdalena, sin localidad precisa.

**69. *Astroblepus santanderensis*** Eigenmann, 1918

= *Astroblepus cyclopus santanderensis* Eigenmann, 1918 **Localidad tipo:** Colombia, Santander, quebrada de Guapota. **Lectotipo:** FMNH 58433.

**Registros:** **CHARALÁ:** quebrada de Charalá (no de Chavala Eigenmann, 1918); quebrada de la Pelada; quebrada de Variri. **GUADALUPE:** quebrada Guadalupe. **GUAPOTA:** río Guapotá. **MOGOTES:** río Mogoticos (no río Mogotes, Eigenmann, 1918). **PIEDRECUESTA;** río Umpalá, sistema río Chicamocha. **RONEGRO:** río Santa Cruz, afluente río Lebrija. **SAN GIL:** San Gil.

**Familia Callichthyidae**

**70. *Callichthys oibaensis*** Ardila-Rodríguez, 2007

**Localidad Tipo:** Colombia, Santander, vereda Las Monjas, río Oibita, afluente del río Suárez, altitud: 1450 m. **Holotipo:** CAR 250. **Nombre común:** roncho o runcho.

**Registros:** **OIBA:** río Oibita, sistema del río Suárez,

**Familia Loricariidae**

**Subfamilia Loricariinae**

**71. *Dasylicaria filamentosa*** (Steindachner, 1878)

= *Loricaria filamentosa* (Steindachner, 1878). **Localidad tipo:** Colombia, río Magdalena. **Lectotipo:** NMW 44874.

**Registros:** BARRANCABERMEJA: río Sogamoso. **SABANA DE TORRES:** caño peruétano

**72. *Rineloricaria magdalena*** (Steindachner, 1879)

= *Loricaria magdalena* Steindachner, 1879. **Localidad tipo:** Colombia, río Magdalena. **Lectotipo:** NMW 45080. **Nombre común:** baralcalde.

**Registros:** LEBRIJA: río Lebrija.

**73. *Spatuloricaria* cf. *gymnogaster*** (Eigenmann & Vance, 1912)

= *Loricaria gymnogaster* Eigenmann & Vance, in Eigenmann, 1912

**Holotipo:** CAS 28773 [ex IU 12691].

**Nombre común:** clinejo.

**Registros:** SABANA DE TORRES: ciénaga de Pa-redes; caño Peruétano.

**74. *Sturisoma aureum*** (Steindachner, 1900)

= *Loricaria aurea* Steindachner, 1900. **Localidad tipo:** Colombia, Bodega central, río Magdalena. **Holotipo:** NMW ?. **Nombre común:** capitanejo.

**Registros:** LEBRIJA: río Lebrija-río Magdalena.

**75. *Sturisoma panamense*** (Eigenmann & Eigenmann, 1889)

= *Loricaria panamensis* Eigenmann & Eigenmann, 1889. **Localidad tipo:** Panamá. **Holotipo:** MCZ 8126. **Nombre común:** clinejo.

**Registros:** BARRANCABERMEJA: sistema río Sogamoso. **LEBRIJA:** río Lebrija

**Subfamilia Hypostominae**

**76. *Hypostomus hondae*** (Regan, 1912)

= *Plecostomus hondae* Regan, 1912. **Localidad tipo:** Colombia, Honda, (300–400 ft). **Sitios:** BMNH 1909.7.23.43–44 (2).

**Registros:** LEBRIJA: caño Tigre, sistema río Lebrija. **BARRANCABERMEJA:** sistema río Sogamoso.

**77. *Pterygoplichthys undecimalis*** (Steindachner, 1878)

= *Chaetostomus undecimalis* Steindachner, 1878. **Localidad tipo:** Colombia, ciénaga grande de Santa

Marta, 40 km al este de Barranquilla. **Lectotipo:** NMW 47224. **Nombre común:** coroncoro.

**Registros:** LEBRIJA: río Lebrija.

**Subfamilia Ancistrinae**

**78. *Chaetostoma fischeri*** (Steindachner, 1879)

= *Chaetostomus fischeri* Steindachner, 1879. **Localidad tipo:** Panamá, Istmo de Panamá. **Sitios:** NMW 47170, 47171, 47172. **Nombre común:** choca.

**Registros:** GIRÓN: río de Oro. **LEBRIJA:** río Lebrija; quebrada La Honda. **PIEDRECUESTA:** sistema río Chicamocha. **RIONEGRO:** quebrada El Aburrido, afluente río de Oro.

**79. *Chaetostoma leucomelas*** Eigenmann, 1918

**Localidad tipo:** Colombia, río Patía, a mitad de camino entre los ríos Magui y Telembi. **Holotipo:** CAS 60167.

**Registros:** GIRÓN: río de Oro. **LEBRIJA:** río Lebrija; quebrada La Honda. **RIONEGRO:** vereda San Jorge, río Rionegro, tributario río Lebrija.

**80. *Chaetostoma milesi*** Fowler, 1941

**Localidad tipo:** Colombia, Honda. **Holotipo:** ANSP 69330. **Nombre común:** choca.

**Registros:** GIRÓN: río de Oro. **LEBRIJA:** río Lebrija; quebrada La Honda.

**81. *Chaetostoma thomsoni*** Regan, 1904

**Localidad tipo:** Colombia, Villeta, cuenca del Magdalena. **Sitios:** BMNH1902.5.15.28-30.

**Registros:** CHARALÁ: ríos de Charalá. **GIRÓN:** río de Oro. **PIEDRECUESTA:** río Chicamocha. **RIONEGRO:** río Santacruz y quebrada el Aburrido, sistema río Lebrija.

**82. *Chaetostoma* sp.**

**Registros:** SAN GIL: río Fonce.

**83. *Dolichancistrus carnegiei*** (Eigenmann, 1916)

= *Pseudancistrus carnegiei* Eigenmann, 1916 **Localidad tipo:** Colombia, departamento de Santander, municipio San Gil, río Fonce (no río San Gil, Eigenmann, 1916). **Holotipo:** FMNH 58350.

**Registros:** FLORIDABLANCA: río Frío, afluente río de Oro. **GIRÓN:** río de Oro. **LEBRIJA:** pozo de

la dicha; río Lebrija. **PIEDRECUESTA:** río Chicamocha; río Manco. **RIONEGRO:** quebrada El Aburrido, sistema río Lebrija. **SAN GIL:** río Fonce (no río San Gil Eigenmann, 1916); río Suárez. **SURATÁ:** río Suratá.

**Observaciones:** de acuerdo con el mapa de la lamina XXXVI en Eigenmann, 1922, la localidad río San Gil está ubicada en el río Fonce, por lo que este último corresponde a la localidad tipo.

**84. *Lasiancistrus caucanus*** Eigenmann, 1912

**Localidad tipo:** Colombia, Cartago, Cauca. **Holotipo:** FMNH 56034.

**GIRÓN:** río de Oro. **RIONEGRO:** río Santa Cruz, tributario río Lebrija. **LEBRIJA:** río Lebrija. **PIEDRECUESTA:** río Chicamocha. **SAN VICENTE DE CUCURÍ:** cuerpos de agua del municipio.

**Familia Pseudopimelodidae**

**85. *Batrochoglanis acanthochiroides*** (Günther, 1942)

= *Pseudopimelodus acanthochiroides* Günther, 1942. **Localidad tipo:** Santander. **Sintipo:** NMBA 5277-78.

**Registros:** **SOCORRO** y **SIMACOTA:** río Suárez (*Com. Pers.* P. Cala).

**86. *Pseudopimelodus bufonius*** (Valenciennes, 1840)

= *Pimelodus Bufonius* Valenciennes, en Cuvier & Valenciennes, 1840. **Localidad tipo:** Cayenne. **Holotipo:** desaparecido.

**Registros:** Magdalena medio del departamento de Santander y río Sogamoso. **LEBRIJA:** río Lebrija.

**Familia Heptapteridae**

**87. *Cetopsorhamdia nasus*** Eigenmann & Fisher, 1916

= *Cetopsorhamdia nasus* Eigenmann & Fisher, 1916. **Localidad tipo:** Colombia, Honda. **Holotipo:** FMNH 58126.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** río Sogamoso.

**88. *Imparfinis nemacheir*** (Eigenmann y Fisher, 1916)

= *Nannorhamdia nemacheir* Eigenmann y Fisher, **Localidad tipo:** Colombia, Girardot. **Registros:** **Agres.** **Holotipo:** FMNH 58127. **Nombre común:** bagresito.

**Registros:** **PUERTO PARRA:** quebrada La Dorada, sistema río Opón.

**89. *Pimelodella chagresi*** (Steindachner, 1876)

= *Pimelodus (Pseudorhamdia) Chagresi* Steindachner, 1876. **Localidad tipo:** Panamá, río Chagres. **Sintipos:** NMW ?. **Nombre común:** Kin-kin.

**Registros:** **GIRÓN:** río de Oro. **LEBRIJA:** río Lebrija. **RIONEGRO:** río Santacruz, tributario río Lebrija.

**90. *Rhamdia quelen*** (Quoy & Gaimard, 1824)

= *Pimelodus quelen* Quoy & Gaimard, 1824. **Localidad tipo:** Perú, Departamento Loreto, lado derecho de la quebradita, tributario del río Samiria entre Caño Pastos y Hamburgo. **Neotipo:** NRM 1609. **Nombre común:** aliso, capitán.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** ciénaga El Llanito, sistema río Sogamoso. **FLORIDABLANCA:** río Frío, afluente río de Oro. **GIRÓN:** río de Oro. **LEBRIJA:** río Lebrija. **RIONEGRO:** río Lebrija; río Santacruz, **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Paredes.

**Familia Pimelodidae**

**91. *Pimelodus blochii*** Valenciennes, 1840

**Localidad tipo:** Surinam. **Lectotipo:** MNHN b-0072, ZMB 2995. **Nombre común:** barbudo.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** río Sogamoso. **LEBRIJA:** río Lebrija.

**92. *Pimelodus grosskopfii*** Steindachner, 1879

**Localidad tipo:** Cauca, río Cauca. **Sintipos:** NMW 45781-82. **Nombre común:** barbudo.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** río Sogamoso. **LEBRIJA:** río Lebrija. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Paredes.

**93. *Pseudoplatytoma magdaleniatum*** Buitrago-Suárez & Burr, 2007

**Localidad tipo:** Colombia, departamento de Bolívar, Soplaviento, ciudad sobre el dique de Cartagena carretera a Calamar, río Magdalena. **Holotipo:** CAS 19165. **Nombre común:** bagre.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** río Sogamoso; ciénaga El Llanito; caño San Silvestre. **LEBRIJA:** río Lebrija. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Paredes; caño Peruétano; río Lebrija; ciénaga de Pita-Limón.

**94. *Sorubim cuspicaudus*** Littmann, Burr & Nass, 2000

**Localidad tipo:** Colombia, Departamento de Tolima, río Magdalena, hacia el Puerto Soplaviento. **Holotipo:** FMNH 56223. **Nombre común:** blanquillo.

**Registros:** BARRANCABERMEJA: río Sogamoso. **LEBRIJA:** río Lebrija. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Pita-Limón.

**Familia Auchenipteridae****95. *Ageneiosus pardalis*** Lütken, 1874

**Localidad tipo:** Venezuela, Caracas. **Holotipo:** ZMUCP 29664. **Nombre común:** doncella.

**Registros:** BARRANCABERMEJA: río Sogamoso; ciénaga El Llanito; caño san Silvestre. **LEBRIJA:** río Lebrija. **SABANA DE TORRES:** río Lebrija; ciénaga de Paredes.

**96. *Trachelyopterus insignis*** (Steindachner, 1878)

= *Auchenipterus insignis* Steindachner, 1878: **Localidad tipo:** Colombia, río Magdalena. **Sintipos:** NMW?

**Registros:** BARRANCABERMEJA: ciénaga El Llanito, ciénaga San Silvestre, río Sogamoso. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Paredes; caño Peruétano.

**Familia Doradidae****97. *Centrochir crocodili*** (Humboldt, 1821)

= *Doras crocodili* Humboldt, 1821. **Localidad tipo:** Colombia, río Magdalena, Nouvelle Granade, entre Ponto et Mompoxyenne. **Holotipo:** desconocido.

**Registros:** SABANA DE TORRES: ciénaga de Paredes; caño Peruétano.

**ORDEN GYMNOTIFORMES****Familia Gymnotidae****98. *Gymnotus ardilai*** Maldonado-Ocampo & Albert, 2004

**Localidad tipo:** Colombia, Santander, río de Oro. **Holotipo:** IAvHP 3477. **Nombre común:** lamprea.

**Registros:** GIRÓN: río de Oro.

**Familia Apterodontidae****99. *Apterodontus eschmeyereri*** Santana, Maldonado-Ocampo, Severi & Mendes, 2003

**Localidad tipo:** Colombia, departamento de Cundinamarca, río Bogotá en la vía Girardot. **Holotipo:** CAS7 2115. **Nombre común:** mayupa.

**Registros:** BARRANCABERMEJA: río Sogamoso.

**100. *Apterodontus magdalenensis*** (Miles, 1945)

= *Ubidia magdalenensis* Miles, 1945. **Localidad tipo:** Colombia, Honda, río Magdalena. **Paratipos:** BMNH 1947.7.1.138, USNM 123795.

**Registros:** PUERTO WILCHES: ríos de Puerto Wilches, Puerto Cayumba, sistema río Sogamoso.

**101. *Apterodontus mariae*** (Eigenmann & Fisher, 1914)

= *Stenarchus mariae* (Eigenmann & Fisher, 1914). **Localidad tipo:** Colombia, Girardot. **Holotipo:** FMNH 56774.

**Registros:** BARRANCABERMEJA: río Sogamoso.

**102. *Apterodontus rostratus*** (Meek & Hildebrand, 1913)

= *Stenarchus rostratus* (Meek & Hildebrand, 1913). **Localidad tipo:** Panamá, río Grande, cerca del Canal de Panamá. **Holotipo:** FMNH 7592. **Nombre común:** perrito.

**Registros:** BARRANCABERMEJA: río Sogamoso.

**Familia Sternopygidae****103. *Eigenmannia cf. virescens*** (Valenciennes, 1836)

= *Sternarchus virescens* Valenciennes, 1836. **Localidad tipo:** Sur América. **Holotipo:** desconocido.

**Registros:** GIRÓN: río de Oro. **SABANA DE TORRES:** Quebrada La Gómez; ciénaga de Paredes; caño Peruétano

**104. *Sternopygus aequilabiatus*** (Humboldt, 1805)

= *Gymnotus aequilabiatus* Humboldt, 1805. **Localidad tipo:** Colombia, río Magdalena. **Holotipo:** desconocido.

**Registros:** GIRÓN: río de Oro. **LEBRIJA:** río Lebrija. **BARRANCABERMEJA:** río Sogamoso.

**Familia Hypopomidae****105. *Brachyhypopomus occidentales*** (Regan, 1914)

= *Hypopomus occidentalis* Regan, 1914 **Localidad tipo:** Colombia, río Condoto, vertiente pacífica de Colombia. **Syntipos:** BMNH 1914.5.18.94-98.

**Registros:** BARRANCABERMEJA: sistema río Sogamoso.

**ORDEN CYPRINODONTIFORMES****Familia Rivulidae**

106. *Rivulus magdalenae* Eigenmann & Henn, 1916

**Localidad tipo:** Colombia. Ibagué. **Holotipo:** FMNH 56997.

**Registros:** **LEBRIJA:** río Lebrija.

**Familia Poeciliidae**

107. *Poecilia caucana* (Steindachner, 1880)

= *Goramdomis caucana* Steindachner, 1880. **Localidad tipo:** Colombia, río Cauca. **Sintipo:** NMW 81128. **Nombre común:** piboncita.

**Registros:** **GIRÓN:** río de Oro. **RIONEGRO:** río Santacruz - cuenca río Lebrija. **PIEDECUESTA:** río Frio y quebrada La Iglesia, afluente río de Oro; río Manco; río Chicamocha. **LOS SANTOS:** quebrada La Cañada, sistema río Sogamoso. **LEBRIJA:** quebrada El Arenero, sistema río Lebrija.

108. *Poecilia reticulata* Peters, 1859

**Localidad tipo:** Venezuela, Caracas, Sintipo: BMNH 1866.6.6.3. **Nombre común:** guppy.

**Registros:** **GIRÓN:** río de Oro.

109. *Priapichthys caliensis* (Eigenmann & Henn, 1916)

= *Gambusia caliensis* Eigenmann & Henn, 1916. **Localidad tipo:** Colombia, Cali. **Holotipo:** FMNH 57721.

**Registros:** **SUAITA:** vereda Pénjamo, quebrada La Batea, afluente río Suárez.

**ORDEN SYNBRANCHIFORMES****Familia Synbranchidae**

110. *Synbranchus marmoratus* (Bloch, 1795)

**Localidad tipo:** Surinam. **Holotipo:** desconocido.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** caño San Silvestre. **LEBRIJA:** río Lebrija. **PUERTO PARRA:** ríos del sistema Opón.

**ORDEN PERCIFORMES****Familia Cichlidae**

111. *Andinoacara latifrons* (Steindachner, 1878)

= *Aequidens latifrons* Steindachner, 1878. **Localidad tipo:** Colombia, Ciénaga, río Magdalena. **Sintipo:** NMW?.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** ciénaga El Llanito; ciénaga Miramar; caño Juan Esteban; río Sogamoso. **BUCARAMANGA:** Bucaramanga. **GUAPOTÁ:** quebrada en Guapotá. **LEBRIJA:** quebrada El Arenero, sistema río Lebrija. **LOS SANTOS:** quebrada La Cañada, sistema río Sogamoso. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Paredes. **SUAITA:** vereda Pénjamo, quebrada La Batea, sistema río Suárez.

112. *Caquetaia kraussii* (Steindachner, 1878)

= *Petenia kraussii* Steindachner, 1878. **Localidad tipo:** Colombia, Ciénaga, río Magdalena. **Sintipo:** NMW 7539. **Nombre común:** mojarra amarilla.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** ciénaga El Llanito; ciénaga San Silvestre; río Sogamoso. **LEBRIJA:** río Lebrija. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de Paredes; caño Peruétano. **PUERTO PARRA:** ríos sistema Opón.

113. *Caquetaia umbrifera* (Meek y Hildebrand, 1913)

= *Cichlasoma umbriferum* Meek y Hildebrand, 1913. **Localidad tipo:** Panamá, Cituro, río Cupe. **Holotipo:** FMNH 7598. **Nombre común:** mojarra negra.

**Registros:** **PUERTO PARRA:** campo Capote, sistema río Opón

114. *Geophagus steindachneri* Eigenmann & Hildebrand, 1922

**Localidad tipo:** cuenca del Magdalena. **Holotipo:** NMW 23298.90. **Nombre común:** moarra mula.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** Caño Juan Esteban. **LOS SANTOS:** quebrada La cañada. **PIEDECUESTA:** río Chicamocha; río Manco. **RÍONEGRO:** vereda San Jorge, río Santacruz, afluente río Lebrija. **SANGIL:** río Curití. **SUAITA:** vereda Pénjamo, quebrada La Batea, tributaria río Suárez.

**Familia Sciaenidae**

115. *Plagioscion magdalenensis* (Steindachner, 1878).

= *Sciaene magdalenae* Steindachner, 1878. **Localidad tipo:** Colombia, río Magdalena. **Holotipo:** desaparecido. **Nombre común:** curvinata, pácora.

**Registros:** **BARRANCABERMEJA:** ciénaga El Llanito; río Sogamoso. **LEBRIJA:** río Lebrija. **PUERTO PARRA:** ríos Carare y Opón. **SABANA DE TORRES:** ciénaga de paredes.



## Discusión

La diversidad ictiológica de Santander documentada en este trabajo registra la existencia de 115, de las 213 especies registradas por **Maldonado-Ocampo et al.**, (2008) para la cuenca del Magdalena-Cauca, lo que corresponde al 53,5% del total. De este total, **Castellanos-Morales et al.**, (2011) reportó 58 especies para la cuenca superior del río Lebrija (50,9%). De forma similar, **Mojica et al.**, (2006) registraron 129 especies para el valle medio del río Magdalena, lo que significa que el 89,1% de las especies reportadas por estos autores se distribuyen en Santander.

Tan sólo tres especies han sido registradas para ambientes subterráneos en Colombia, todas provenientes del departamento de Santander. Estas especies pertenecen al género *Trichomycterus* y han sido colectadas y descritas entre el 2006 y 2010 habitando las cuevas de El Puente (*Trichomycterus santanderensis*), Don Juan (*T. sandovali*) y El Misterio (*T. uisae*). Las especies citadas anteriormente exhiben características troglomórficas como reducción en la pigmentación y el tamaño de los ojos en comparación con sus congéneres epigeos, y presencia de pliegues cutáneos alrededor del cuerpo. Estos caracteres son indicadores de su condición troglobítica (**Castellanos-Morales**, 2010).

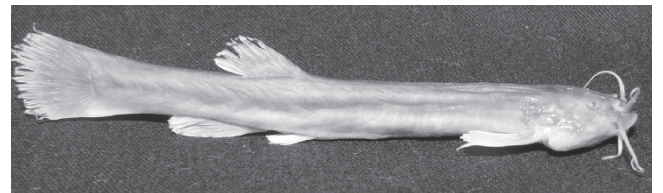
Del total de 73 especies descritas para las aguas continentales de Colombia en la última década, 33 han sido de la cuenca del Magdalena-Cauca; de éstas, 13 (39,4%), de las cuencas que drenan por el departamento de Santander: *Creagrutus guanes* **Torres-Mejía & Vari**, 2005 (Fig. 2); *Bryconamericus arilepis* **Román-Valencia, Vanegas-Ríos & Ruiz-C**, 2008; *Bryconamericus foncensis* **Román-Valencia, Vanegas-Ríos & Ruiz-C** 2009; *Bryconamericus plutarcoi* **Román-Valencia**, 2001; *Hemibrycon virolinica* **Román-Valencia & Arcila-Mesa**, 2010; *Lebiasina chucu-*

*riensis* **Ardila-Rodríguez**, 2001; *Trichomycterus ruitoquensis* **Ardila-Rodríguez**, 2007; *Trichomycterus sandovali* **Ardila-Rodríguez**, 2006; *Trichomycterus santanderensis* **Castellanos-Morales**, 2007 (Fig. 3); *Trichomycterus uisae* **Castellanos-Morales**, 2008 (Fig. 4); *Trichomycterus sketi* **Castellanos-Morales**, 2010; *Callichthys oibaensis* **Ardila-Rodríguez**, 2007; *Gymnotus ardilai* **Maldonado-Ocampo & Albert**, 2004 (Fig. 5). Esto en algún grado representa el poco conocimiento que se tiene sobre la ictiofauna del departamento, que con seguridad con nuevas exploraciones ictiológicas y la revisión de material depositado en colecciones seguirá permitiendo la descripción de nuevas especies para ésta región.

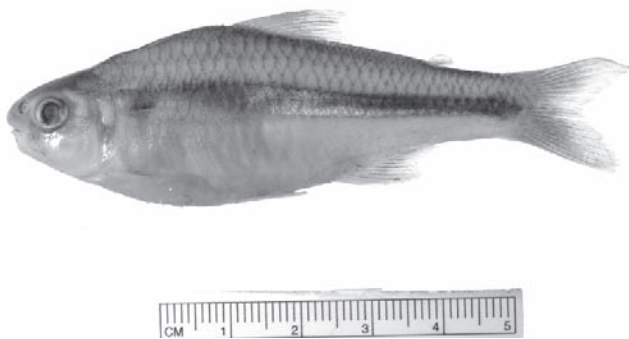
Comparando la información que proviene de diferentes reportes nacionales se concluye que 14 especies de peces son endémicas o aparentemente están restringidas al departamento de Santander. Ocho especies pertenecen a la



**Figura 3.** *Trichomycterus santanderensis* sistema río Lebrija. Holotipo.



**Figura 4.** *Trichomycterus sketi* sistema río Opón. Holotipo.



**Figura 2.** *Creagrutus guanes*, sistema río Suárez. Holotipo. Foto cortesía Mauricio Torres.



**Figura 5.** *Gymnotus ardilai* sistema río de Oro. Paratipo.

cuenca del río Sogamoso (*Bryconamericus arilepis*, *B. foncensis*, *B. Plutarcoi*, *Creagrutus guanes*, *Hemibrycon virolinica*, *Lebiasina chucuriensis*, *Trichomycterus sandovali*, *Callichthys oibaensis*), cinco a la cuenca del río Lebrija (*Lebiasina floridablancaensis*, *Trichomycterus ruitoquensis*, *T. santanderensis*, *T. uisae*, *Gymnotus ardilai*) y una a la cuenca del río Opón (*Trichomycterus sketi*). Como ya fue señalado, estas especies fueron descritas en los últimos 10 años por lo que, el estatus de endémico debe confirmarse con futuros trabajos de campo.

Las colecciones históricas para Santander fueron realizadas principalmente por Steindachner a finales del siglo XIX recorriendo la cuenca del río Lebrija y el Magdalena Medio. Eigenmann y su colaborador Manuel Gonzales realizaron innumerables colectas a principios del siglo XX por la ruta Cundinamarca – Mogotes en la cuenca del río Suárez. Desafortunadamente en ninguna de las colecciones colombianas se encuentra este material, ni sus duplicados, así como tampoco ninguno de los diferentes ejemplares tipo colectado por estos investigadores. Debe reconocerse que en este aspecto, los únicos registros históricos que reposan en colecciones colombianas fueron realizados por los Hermanos Lasallistas en la cuenca del río Suárez, bajo la dirección del Hermano Apolinar y el Hermano Nicéforo María; duplicados de los ejemplares enviados al exterior reposan en el Museo La Salle – Universidad de La Salle en Bogotá (**Espitia et al.**, 2010).

Los resultados de este trabajo indican que no se dispone de información de la ictiofauna en tres cuencas importantes de Santander (Carare, Opón y La Colorada). De igual forma, no se encontraron registros en ecosistemas estratégicos del departamento como el Parque Nacional Natural Serranía de los Yarigüies, el Santuario de Flora y Fauna Guanentá Alto Río Fonce y sistema alto-andino – páramo en límites con el departamento del Norte de Santander. Futuros trabajos ictiológicos deberán enfocarse en la exploración de las zonas anteriormente señaladas.

### Agradecimientos

Los autores expresan sus sinceros agradecimientos a las siguientes personas e instituciones que apoyaron nuestro trabajo. A los pescadores tanto de la ciénaga El Llanito en Barrancabermeja, como a los de la ciénaga de Paredes en Sabana de Torres, especialmente a Manuel Zapata “Morita” por su gentil orientación y cooperación durante la faenas de pesca. Martha Patricia Ramírez y Mauricio Torres-Mejía de la Colección Ictiológica de la Universidad Industrial Santander UIS nos permitieron

acceder a la información del museo y aportaron sugerencias. Claudia Medina administradora de colecciones del Instituto Alexander von Humboldt y el Hermano José Edilson Espitia director del Museo de Historia Natural MLS - Universidad de la Salle por facilitar la consulta y prestamos de ejemplares. Especial agradecimiento al Dr. Plutarco Cala-Cala por la revisión crítica del manuscrito y por proporcionar valiosas sugerencias. La ONG **BIOMAS** (Corporación de Investigaciones en Biodiversidad y Medio Ambiente de Santander) financió los desplazamientos de los dos primeros autores a los diferentes museos. JAMO agradece el soporte dado por el programa de becas de postgrado TWAS-CNPq- durante la elaboración de este trabajo.

### Bibliografía

- Agudelo-Zamora, H., P. Villamil-Pelayo, L. E. Ochoa-Orrego & L. F. Jiménez-Segura.** 2009. Fish, Gymnotiformes, Apterontidae, *Apterontus magdalenensis* (Miles, 1945): Distribution extension of an endangered endemic knifefish, in northern Colombia. *Checklist* 5(4):879-881.
- Ardila-Rodríguez, C. A.** 1994. *Lebiasina floridablancaensis*, una nueva especie de pez para Colombia (Teleostei: Characiformes). *Rev.Unimetro* 10(19):1-12.
- . 2001. *Lebiasina chucuriensis*, una nueva especie de pez para Colombia (Teleostei: Characiformes, Lebiasinidae). *Rev. Unimetro (Separata especial núm. 3)*, 13(27-29):1-18.
- . 2006. *Trichomycterus sandovali*, (Siluriformes, Trichomycteridae) una nueva especie de pez cavernícola para el departamento de Santander-Colombia. *Peces del departamento de Santander* 2:16 p.
- . 2007a. *Callichthys oibaensis* (Siluriformes: Callichthyidae), una nueva especie de pez, Río Oibita, sistema Río Suárez, cuenca del Río Magdalena, Colombia. *DAHLIA* 9:3-12.
- . 2007b. *Trichomycterus ruitoquensis*, (Siluriformes, Trichomycteridae) una nueva especie de pez de la cuenca alta del río Lebrija, departamento de Santander-Colombia. *Peces del departamento de Santander* 3:1-16.
- Buitrago-Buárez, U.A., & B. M. Burr.** 2007. Taxonomy of the catfish genus *Pseudoplatystoma* Bleeker (Siluriformes: Pimelodidae) with recognition of eight species. *Zootaxa* 1512: 1-38.
- Castellanos-Morales, C. A.** 2001a. Los ecosistemas de humedales en Colombia. *Luna Azul*, Universidad de Caldas 7(13):45-52.
- . 2001b. Ecosistemas y diversidad biológica en Santander, conservación y riesgos de extinción. Corporación Autónoma de Santander, CAS. *Huellas* 2:18-19.
- . 2005. Valoración preliminar del recurso ictiológico en la cuenca superior del río Lebrija, Santander, Colombia. Reporte técnico. Corporación Autónoma Regional para la defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB. 40 p.

- \_\_\_\_\_. 2007. *Trichomycterus santanderensis*: A new species of troglomorphic catfish (Siluriformes, Trichomycteridae) from Colombia. *Zootaxa* 1541:49-55.
- \_\_\_\_\_. 2008. *Trichomycterus uisae*: a new species of hypogean catfish (Siluriformes: Trichomycteridae) from the northeastern Andean Cordillera of Colombia. *Neotropical Ichthyology* 6(3): 307-314.
- \_\_\_\_\_. 2010. A new species of subterranean catfish from the Andean Cordillera of Colombia (Siluriformes: Trichomycteridae). En prensa.
- \_\_\_\_\_, **L. J. Monsalve-Rodríguez, N. Acero-Rivera, J. A. Pinzón & L. L. Marino-Z.** 2011. Fishes of the upper part of Río Lebrija basin, department of Santander, Colombia. *Dahlia* (Rev. Asoc. Colomb. Ictiol.) 11:35-42.
- Corporación Autónoma Regional de Santander CAS.** 2006. Plan de manejo de los humedales del Magdalena Medio santandereano. *CAS – Gobernación de Santander*. 160 p.
- Dahl, G.**, 1971. Los Peces del Norte de Colombia. Ministerio de Agricultura, Instituto de Desarrollo de los Recursos Naturales Renovables INDERENA. Bogotá, Colombia. 391 p.
- Eigenmann, C.H.**, 1915. The Cheirodontinae, a subfamily of minute characid fish of South America. *Mem. Carnegie Mus* 7(1):1-99.
- \_\_\_\_\_. 1916. New and rare fishes from South American rivers. *Ann. Carnegie Mus.* 10:77-86, pls. 13-16.
- \_\_\_\_\_. 1917. Eighteen new species of fishes from northwestern South America. *Proc. Am. Philos. Soc.* 56(7):673-689.
- \_\_\_\_\_. 1918. The Pygidiidae, a family of South American catfishes. *Mem. Carnegie Mus* 7(5):259-398.
- \_\_\_\_\_. 1919. Peces colombianos de las cordilleras y los llanos al oriente de Bogotá, Parte II. *Bol. Soc. Colomb. Cienc. Nat* (62-65):191-199.
- \_\_\_\_\_. 1922. The fishes of western South America, part I. The Fresh-water fishes of northwestern South America, including Colombia, Panama, and the Pacific slopes of Ecuador and Peru, together with an appendix upon the fishes of the Río Meta in Colombia. *Mem. Carnegie Mus.* 9(1):1-346.
- \_\_\_\_\_. 1927. The American Characidae. *Mem. Mus. Comp. Zoo.* 43(4):311-428.
- \_\_\_\_\_, **A. Henn & C. Wilson.** 1914. New fishes from Western Colombia, Ecuador and Peru. *Ind. Univ. Studies* 19:1-15.
- Espitia-Barrera, J.E., Castellanos-Morales, C.A. & Bonilla-L, E. C.** 2010. Colección ictiológica del Museo de La Salle de Ciencias Naturales (MLS) Bogotá. Colombia. *Boletín Científico del Museo de La Salle* (en prensa).
- Fowler, H. W.** 1943. A collection of fresh-water fishes from Colombia, Obtained chiefly by brother Nicéforo María. *Proc. Acad. Nat. Scien. Phila* 45:223-266.
- Holdridge, L. R.** 1977. Ecología basada en zonas de vida. Trad. H. Jiménez Saa. San José, CR. IICA, 216 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).** 2003. Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Santander. IGAG, versión electrónica (CD).
- Maldonado-Ocampo, J. A. & J. S. Albert.** 2004. *Gymnotus ardilai*: a new species of Neotropical electric fish (Ostariophysi: Gymnotidae) from the Río Magdalena Basin of Colombia. *Zootaxa* 759:1-10.
- \_\_\_\_\_, **Vari, R.P. & Usma, J.S.**, 2008. Checklist of the freshwater fishes from Colombia. *Biota Colombiana* 9(2):143-237.
- \_\_\_\_\_, **A. Ortega-Lara, J. S. Usma-O., G. Galvis-V., F. A. Villa-Navarro, L. Vásquez-G., S. Prada-Pederos, & C. A. Ardila-Rodríguez.** 2005. Peces de los Andes de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos "Alexander Von Humboldt". Bogotá, D.C. Colombia. 346 p.
- Martínez-M. A.** 1973. Distribución de los principales géneros y especies de peces deportivos de agua dulce en Colombia. *Rev. U. Industrial de Santander* 5:5-32.
- \_\_\_\_\_. 2008. Peces deportivos de Colombia. Agua dulce. Editorial SIC. Bucaramanga. Versión CD.
- Miles C.** 1947. Los peces del río Magdalena. Ministerio de Economía Nacional. Sección de Piscicultura, Pesca y Caza. Editorial El Gráfico, Bogotá. 214 p.
- \_\_\_\_\_. 1945. Some newly recorded fishes from the Magdalena River system. *Caldasia* 3(15):453-464.
- Mojica J. I., C. Castellanos, S. Usma, & R. Álvarez-León.** (eds). 2002. Libro Rojo de Peces dulceacuícolas de Colombia. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente, Bogotá D.C. 346 p.
- \_\_\_\_\_, **G. Galvis, P. Sanchez-D., C. Castellanos, F. Villa-Navarro.** 2006. Peces del valle medio del río Magdalena, Colombia. *Biota Colombiana* 7(1):23-38.
- Reis, R., Kullander, S. O. & Ferraris, C.J.** 2003. Check list of the freshwater fishes of South and Central América. Porto Alegre: EDUIPUCRS. 742 p.
- Román-Valencia, C.** 2001. Descripción de una nueva especie de *Bryconamericus* (Osteophysi, Characidae) del Alto Río Suárez, cuenca del Magdalena. *Bol. Mus. Reg. Sci. Nat. Torino* 18(2):469-476.
- \_\_\_\_\_, **& R. I. Ruiz-C.** 2007. Una nueva especie de pez del género *Hembrycon* (Characiformes: Characidae) del Alto Río Atrato, Noroccidente de Colombia. *Caldasia* 29(1):121-131.
- \_\_\_\_\_, **& D. K. Arcila-Mesa.** 2010. Five new species of *Hembrycon* (Characiformes: Characidae) from the Río Magdalena basin, Colombia. *Rev. Biol. Trop* 58(1):339-356.
- \_\_\_\_\_, **J. A. Vanegas-Ríos, & R. I. Ruiz-C.** 2008. Una nueva especie del género *Bryconamericus* (Ostariophysi: Characidae) del río Magdalena, con una clave para las especies de Colombia. *Rev. Biol. Trop* 56(4):1749-1763.
- \_\_\_\_\_, **J. A. Vanegas-Ríos, & R. I. Ruiz-C.** 2009. Especie nueva del género *Bryconamericus* (Teleostei: Characidae) del río

- Fonce, sistema río Magdalena, Colombia. *Rev. Mex. Biodiversidad* 80:455-463.
- Steindachner, F.**, 1902. Herpetologische und ichthyologische Ergebnisse einer Reise nach Südamerika mit einer Einleitung von Therese Prinzessin von Bayern, Akademie der Wissenschaften, Mathematisch- Naturwissenschaftlichen 62:89-148.
- Torres-Mejía M. & R. P. Vari.** 2005. New species of *Creagrutus* (Teleostei: Characiformes) from the Rio Magdalena basin-Colombia. *Copeia* 4:812-817.

Recibido: noviembre 23 de 2010.

Aceptado para su publicación: junio 1 de 2011.



## Continuación Anexo 1. Listado de peces del departamento de Santander y museos y/o referencias consultadas.

NOMBRE CIENTÍFICO	CUENCAS							Colección / Referencia
	Le	So	Ch	Su	Ca	Op	Co	
<i>Hemibrycon tolimae</i> (Eigenmann, 1913)	X		X	X				IAvHP 4301, 4302, 4303; UIS-T-0197, 289, 1033.
<i>Hemibrycon virolinica</i> Román-Valencia & Arcila-Mesa, 2010				X				<b>Román-Valencia &amp; Arcila-Mesa, 2010</b>
<i>Hyphessobrycon proteus</i> (Eigenmann & Ogle, 1907)				X				IAvHP 8187, 7665.
<i>Salminus affinis</i> Steindachner, 1880		X			X	X		<b>Martínez-M, 1973, 2008.</b>
<i>Triportheus magdalenae</i> (Steindachner, 1878).	X	X						CAC-CDMB 118.
<b>Subfamilia Bryconinae</b>								
<i>Brycon henni</i> Eigenmann, 1914	X		X	X				CAC-CDMB 033, 053; IAvHP 4304, 4355, 8184; ICNMHN 16029; UIS-T-1482,1485; <b>Castellanos-Morales et al., 2011; Martínez-M, 2008.</b>
<i>Brycon labiatus</i> Steindachner, 1879	X							<b>Steindachner, 1902.</b>
<i>Brycon moorei</i> Steindachner, 1878	X	X						<b>Castellanos-Morales et al., 2011; Martínez-M, 1973, 2008.</b>
<b>subfamilia Characinae</b>								
<i>Cynopotamus magdalenae</i> (Steindachner, 1878)	X	X						<b>Martínez-M, 2008. CCM o.p.</b>
<i>Roebooides dayi</i> (Steindachner, 1878)	X	X		X				CAC-CDMB 020, 078, 142, 148; IAvHP 7666.
<b>Familia Cheirodontinae</b>								
<i>Saccoderma hastatus</i> (Eigenmann, 1913)				X				IAvHP 7664.
<b>Familia Glandulocaudinae</b>								
<i>Argopleura magdalenensis</i> (Eigenmann, 1913)	X							IAvHP 10574; <b>Castellanos-Morales et al., 2011.</b>
<i>Gephyrocharax melanocheir</i> Eigenmann, 1912				X				IAvHP 7667.
<b>Familia Erythrinidae</b>								
<i>Hoplias malabaricus</i> (Bloch, 1794)	X	X						CAC-CDMB 008; 80; IAvHP 4305, 4306, 8188; <b>Maldonado-Ocampo et al., 2005; Steindachner, 1902.</b>
<b>Familia Lebiasinidae</b>								
<i>Lebiasina chucuriensis</i> Ardila-R, 2001							X	IAvHP 4729 <b>Ardila-Rodríguez, 2001;</b>
<i>Lebiasina floridablancaensis</i> Ardila-R, 1994	X				X			CAC-CDMB 031, 121; IAvHP 4730, 10576; <b>Ardila-Rodríguez, 1994; Castellanos-Morales et al., 2011.</b>
<i>Piabucina pleurotaenia</i> Regan, 1903	X							<b>Miles, 1945.</b>
<b>Familia Ctenoluciidae</b>								
<i>Ctenolucius hujeta</i> (Valenciennes, 1850)	X	X						MLS 971; UIS-T-1599.
<b>Familia Cetopsidae</b>								
<i>Cetopsis othonops</i>	X	X						CCM o.p.
<b>Familia Aspredinidae</b>								
<i>Dupouyichthys sapito</i> Schultz, 1944	X						X	UIS-T-1491; <b>Maldonado-Ocampo et al., 2005; Miles 1945.</b>
<b>Familia Trichomycteridae</b>								
<i>Paravandellia phaneronema</i> (Miles, 1943)	X			X				CAC-CDMB 116, 117; MLS 1255; MILES, 1945.
<b>Subfamilia Trichomycterinae</b>								
<i>Trichomycterus bogotensis</i> (Eigenmann, 1912)				X				IAvHP 4340, 4341; <b>Eigenmann, 1918, 1922.</b>
<i>Trichomycterus latistriatus</i> (Eigenmann, 1918)	X			X				<b>Eigenmann, 1917.</b>

## Continuación Anexo 1. Listado de peces del departamento de Santander y museos y/o referencias consultadas.

NOMBRE CIENTÍFICO	CUENCAS							Colección / Referencia
	Le	So	Ch	Su	Ca	Op	Co	
<i>Trichomycterus nigromaculatus</i> Boulenger, 1887			X					Eigenmann, 1917.
<i>Trichomycterus ruitoquensis</i> Ardila-R, 2007	X							IAvHP 4342, 4344, 11113; <b>Ardila-Rodríguez</b> , 2007.
<i>Trichomycterus sandovali</i> Ardila-R, 2006				X				<b>Ardila-Rodríguez</b> , 2006.
<i>Trichomycterus santanderensis</i> Castellanos-Morales 2007	X							CAC-CDMB 035; <b>Castellanos-Morales</b> , 2007;
<i>Trichomycterus sketi</i>						X		CAC 104; <b>Castellanos-Morales</b> , 2010
<i>Trichomycterus straminus</i> (Eigenmann, 1918)			X	X				<b>Eigenmann</b> , 1922; <b>Fowler</b> , 1943.
<i>Trichomycterus striatus</i> (Meek & Hildebrand, 1913)			X	X				CDMB 101, 111; MLS 11; <b>Fowler</b> 1943; <b>Maldonado-Ocampo et al.</b> , 2005.
<i>Trichomycterus transandianus</i> (Steindachner, 1915)					X			CDMB 123, 124
<i>Trichomycterus uisae</i> Castellanos-Morales, 2008		X						CAC-CDMB 072 ;MLS 1254; <b>Castellanos-Morales</b> 2008.
<i>Trichomycterus</i> sp.				X				IAvH 523
<b>Familia Astroblepidae</b>								
<i>Astroblepus chapmani</i> (Eigenmann, 1912)			X					IAvHP 4322, 4323.
<i>Astroblepus chotae</i> (Regan, 1904)	X			X				ICNMHN 14434, 2125, 2497; MLS 504.
<i>Astroblepus cyclopus</i> (Humboldt, 1805)	X			X				ICNMHN 14431, 14433, 2199, 2309, 2497; <b>Maldonado-Ocampo et al.</b> , 2005.
<i>Astroblepus frenatus</i> Eigenmann, 1918			X					<b>Eigenmann</b> , 1922; <b>Eigenmann</b> , 1918.
<i>Astroblepus grivalvii</i> Humb. ldt, 1805				X				<b>Miles</b> , 1945.
<i>Astroblepus guentheri</i> (Boulenger, 1887)	X							ICNMHN 14436
<i>Astroblepus homodon</i> (Regan, 1904)				X				ICNMHN 2310; MLS 451, 488, 492
<i>Astroblepus latidens</i> (Eigenmann, 1918)				X				<b>Maldonado-Ocampo et al.</b> , 2005.
<i>Astroblepus longifilis</i> (Steindachner, 1882)				X				ICNMHN 1843, 2093, 2097, 2300; <b>Maldonado-Ocampo et al.</b> , 2005.
<i>Astroblepus micrescens</i> Eigenmann, 1918	X		X	X				CDMB 048; ICNMHN 756, 771, 2134, 16909; <b>Eigenmann</b> , 1918, 1922; <b>Maldonado-Ocampo et al.</b> 2005.
<i>Astroblepus orientalis</i> (Boulenger, 1903)	X	X						MLS 493.
<i>Astroblepus santanderensis</i> Eigenmann, 1918	X		X	X				IAvHP 4333, 4339; <b>Eigenmann</b> , 1918; <b>Maldonado-Ocampo et al.</b> , 2005.
<b>Familia Callichthyidae</b>								
<i>Callichthys oibaensis</i> Ardila-R, 2007				X				IAvHP 5730; <b>Ardila-Rodríguez</b> , 2007.
<b>Familia Loricariidae</b>								
<b>Subfamilia Loricariinae</b>								
<i>Dasyloricaria filamentosa</i>	X	X						CAC-CDMB 174; CCM o.p.
<i>Rineloricaria magdalenae</i> (Steindachner, 1879)	X							CAC-CDMB 063; <b>Castellanos-Morales et al.</b> , 2011.
<i>Spatuloricaria</i> cf. <i>gymnogaster</i> (Eigenmann & Vance, 1912)	X							CAC-CDMB 156
<i>Sturisoma aureum</i> (Steindachner, 1900)	X							<b>Steindachner</b> , 1902.
<i>Sturisoma panamense</i> (Eigenmann & Eigenmann, 1889)	X	X						MLS 571; <b>Castellanos-Morales et al.</b> , 2011.

## Continuación Anexo 1. Listado de peces del departamento de Santander y museos y/o referencias consultadas.

NOMBRE CIENTÍFICO	CUENCAS							Colección / Referencia
	Le	So	Ch	Su	Ca	Op	Co	
<b>Subfamilia Hypostominae</b>								
<i>Hypostomus hondae</i> (Regan, 1912)	X	X						<b>Maldonado-Ocampo et al., 2005.</b>
<i>Pterygoplichthys undecimalis</i> (Steindachner, 1878)	X							<b>Maldonado-Ocampo et al., 2005;</b> <b>Steindachner, 1902</b>
<b>Subfamilia Ancistrinae</b>								
<i>Chaetostoma fischeri</i> (Steindachner, 1879)	X		X					CACDDB 029, 068, 055; MLS 792; <b>Castellanos-Morales et al., 2011.</b>
<i>Chaetostoma leucomelas</i> Eigenmann, 1918	X							CACDDB 027, 95; IAvHP 8189.
<i>Chaetostoma milesi</i> Fowler, 1941	X							CACDDB 04, 28; IAvHP 4334, 10579.
<i>Chaetostoma thomsoni</i> Regan, 1904	X		X	X				CACDDB 002, 056, 067; IAvHP 4335, 4336, 4337, 4338; MLS 599.
<i>Chaetostoma</i> sp.	X							MLS 787.
<i>Dolichancistrus carnegiei</i> (Eigenmann, 1916)	X		X	X				CACDDB 006, 034, 054; IAvHP 4329, 4330, 4331, 7836; MLS 534, 550; <b>Eigenmann, 1916, Maldonado-Ocampo et al., 2005.</b>
<i>Lasiancistrus caucanus</i> (Eigenmann, 1912)	X	X	X					CACDDB 022, 040, IAvHP 4324, 4325, 4326, 4327, 4328 MLS 548.
<b>Familia Pseudopimelodidae</b>								
<i>Batrochoglanis acanthochiroides</i>				X				<b>Cala</b> com. per; ICNMHN s.n.
<i>Pseudopimelodus bufonis</i> (Valenciennes, 1840)	X	X						CCM o.p.
<b>Familia Hptapteridae</b>								
<i>Cetopsorhamdia nasus</i> Eigenmann & Fisher, 1916		X						<b>Dahl, 1971.</b>
<i>Imparfinis nemacheir</i> (Eigenmann & Fisher, 1916)						X		ICNMHN 16978
<i>Pimelodella chagresi</i> (Steindachner, 1877)	X							CAC-CDDB 005, 044; IAvHP 4311, 4312, 4313, 4314, 4315, 10582.
<i>Rhamdia quelen</i> (Quoy & Gaimard, 1824)	X	X						CAC-CDDB 011, 016, 039; IAvHP 4316, 4317, 4318, 4319, 4320, 4321, 10583 10584; ICNMHN 16006, 454; <b>Castellanos-Morales et al., 2011.</b>
<b>Familia Pimelodidae</b>								
<i>Pimelodus blochii</i> Valenciennes, 1840	X	X						<b>Steindachner, 1902.</b>
<i>Pimelodus grosskopfii</i> (Steindachner, 1879)	X	X						<b>Castellanos-Morales et al., 2011.</b>
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i> Buitrago-Suárez & Burr, 2007	X	X						<b>Martínez-M, 2008; Steindachner, 1902.</b>
<i>Sorubim cuspicaudus</i> Littmann, Burr & Nass, 2000	X	X						<b>Martínez-M, 2008.</b>
<b>Familia Auchenipteridae</b>								
<i>Ageneiosus pardalis</i> Lütken, 1874	X	X						<b>Martínez-M, 2008.</b>
<i>Trachelyopterus insignis</i> (Steindachner, 1878)	X	X						CAC-CDDB 012, 081; IAvHP 10585.
<b>Familia Doradidae</b>								
<i>Centrochir crocodili</i>	X							CAC-CDDB 153; CCM o.p.
<b>Familia Gymnotidae</b>								
<i>Gymnotus ardilai</i> Maldonado-Ocampo & Albert, 2004	X							IAvHP 3477, 4001. <b>Maldonado-Ocampo &amp; Albert, 2004;</b>



## Continuación Anexo 1. Listado de peces del departamento de Santander y museos y/o referencias consultadas.

NOMBRE CIENTÍFICO	CUENCAS						Op	Co	Colección / Referencia
	Le	So	Ch	Su	Ca				
<b>Familia Apterontidae</b>									
<i>Apteronotus eschmeyer</i> Santana, Maldonado-Ocampo, Severi & Mendes, 2003		X							CAC-CDMB 135;
<i>Apteronotus magdalenensis</i> (Miles, 1945)	X	X							UIS-T sin catalogar; <b>Agudelo-Zamora et al.</b> 2009
<i>Apteronotus mariae</i> (Eigenmann & Fisher, 1914)		X							CAC-CDMB 131
<i>Apteronotus rostratus</i> (Meek & Hildebrand, 1913)		X							CAC-CDMB 131-b
<b>Familia Sternopygidae</b>									
<i>Eigenmannia cf. virescens</i> (Valenciennes, 1836)	X								IAvHP 7747, 8193-8195
<i>Sternopygus aequilabiatus</i> (Humboldt, 1811)	X	X							CAC-CDMB 049, 139; <b>Castellanos-Morales et al.</b> , 2011.
<b>Familia Hypopomidae</b>									
<i>Brachyhypopomus occidentalis</i>		X							CAC-CDMB 129.
<b>Familia Rivulidae</b>									
<i>Rivulus magdalenae</i> (Eigenmann & Henn, 1916)	X								ICNMHN 16011.
<b>Familia Poeciliidae</b>									
<i>Poecilia caucana</i> (Steindachner, 1880)	X	X	X						CAC-CDMB 036, 047, 070; IAvH 4351, 4353, 4354; ICNMHN 16013; <b>Castellanos-Morales et al.</b> 2011.
<i>Poecilia reticulata</i> Peters, 1859	X								IAvHP 4352.
<i>Priapichthys caliensis</i> (Eigenmann & Henn, 1916)				X					IAvHP 8192.
<b>Familia Synbranchidae</b>									
<i>Synbranchus marmoratus</i> (Bloch, 1795)	X						X		CAC-CDMB 057; ICNMHN 16910; MLS 702; <b>Castellanos-Morales et al.</b> , 2011.
<b>ORDEN PERCIFORMES</b>									
<b>Familia Cichlidae</b>									
<i>Andinoacara latifrons</i> (Steindachner, 1878)	X	X		X					CAC-CDMB 038, 071, 074, 085; IAvHP 3062, 3143 8198, 8199; ICNMHN 1501; <b>Castellanos-Morales et al.</b> , 2011.
<i>Caquetaia kraussii</i> (Steindachner, 1878)	X	X					X		CAC-CDMB 079; ICNMHN 1561, 16973; <b>Martinez-M</b> , 2008; <b>Steindachner</b> , 1902.
<i>Caquetaia umbrifera</i> (Meek y Hildebrand, 1913)							X		ICNMHN 16953,16073.
<i>Geophagus steindachneri</i> (Eigenmann & Hildebrand, 1922)		X	X	X					CAC-CDMB 046, 073; IAvHP 4357, 4362, 8196, 8197, 8213; UIS-T 709, 0710, 0711, 0712.
<b>Familia Sciaenidae</b>									
<i>Plagioscion magdalena</i> (Steindachner, 1878)	X	X				X	X		<b>Martinez-M</b> , 2008.

# INFLUENCIAS DE UN RELLENO SANITARIO SOBRE LA COMPOSICIÓN, ABUNDANCIA Y DISPERSIÓN DIURNA DE LOS PECES EN LA QUEBRADA EL VENADO, CORREGIMIENTO DE CÓRDOBA, MUNICIPIO DE BUENAVENTURA (VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA)

Carlos E. Fernández M.<sup>1</sup>, Maicol Ramírez<sup>2</sup>, Efraín A. Rubio R.<sup>3</sup>

## Resumen

**Fernández M. C. E., M. Ramírez, E. A. Rubio R.:** Influencias de un relleno sanitario sobre la composición, abundancia y dispersión diurna de los peces de la quebrada El Venado, corregimiento de Córdoba, municipio de Buenaventura (Valle del Cauca, Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (135): 213-224, 2011. ISSN 0370-3908.

En 2009, se estudió la composición, abundancia y dispersión diurna de los peces presentes en la quebrada El Venado, localizada en el corregimiento de Córdoba, municipio de Buenaventura, Valle del Cauca, Colombia. La quebrada es uno de los afluentes del río Dagua que desemboca en la Bahía de Buenaventura, en la costa Pacífica de Colombia. Se realizaron 6 muestreos mensuales con la técnica de electropesca (Lagler, 1956), identificándose 37 especies de peces hasta nivel de especie y 9 morfotipos hasta género. Los órdenes Characiformes (Familia Characidae) y Siluriformes (Familia Loricariidae) dominaron entre los peces en la quebrada durante el estudio, especialmente en las estaciones cercanas al basurero. En la estación 3 el número de especies ( $n = 23$ ), familias ( $n = 13$ ) y órdenes ( $n = 4$ ) fue relativamente bajo en comparación con las otras estaciones. Por lo general, los peces registraron mejores comunidades antes del basurero. Por sus características adaptativas, algunos peces soportaron las condiciones de las aguas después del basurero mejor (Familia Loricariidae) que otras (Familia Characidae).

**Palabras clave:** composición, abundancia, dispersión, peces continentales, quebrada El Venado, Valle del Cauca, Colombia.

<sup>1</sup> Universidad del Valle sede Pacífico, Buenaventura, Colombia. Correo electrónico: cafe10marpacol@yahoo.com

<sup>2</sup> Universidad del Valle sede Pacífico, Buenaventura, Colombia. Correo electrónico: michaeir\_1983@yahoo.es

<sup>3</sup> Universidad del Valle, sección Biología Marina, Cali, Colombia. Correo electrónico: erubior@gmail.com

### Abstract

The composition, abundance and dispersion of the present fish during the day in the El Venado stream, located in the locality of Córdoba, municipality of Buenaventura, Valle del Cauca, Colombia, was studied during 2009. The stream is one of the tributaries of the Dagua river that ends in the Buenaventura Bay, in the Pacific coast of Colombia. Six monthly samplings were done with the electrofishing technique (Lagler, 1956), identifying 37 species of fish until species level and 9 morphotypes until genera. The orders Characiformes (Family Characidae) and Siluriformes (Family Loricariidae) dominated among the fish in the stream during the study, mainly at the stations nearby the landfill site. On the station 3 the number of species ( $n = 23$ ), families ( $n = 13$ ) and orders ( $n = 4$ ) was low in relation to the other stations. In general, the fish registered better communities before the landfill site. Due to their adapting features, some fish stand better (Family Loricariidae) water qualities after the landfill station than other fish (Family Characidae).

**Key words:** composition, abundance, dispersal, continental fish, El Venado stream, Valle del Cauca, Colombia.

### Introducción

Los ríos y quebradas son ecosistemas que tienen una organización característica de las aguas epicontinentales. Sus poblaciones naturales de fauna y flora habitan estos sistemas de transporte (Margalef, 2002) eficiente y continuamente, constituyéndose en un ecosistema dinámico con variaciones locales de velocidad del agua, estructura del fondo, profundidad, anchura, transparencia, pH, temperatura del agua, y composición de la flora y fauna. Cada riachuelo, quebrada y río aporta beneficios a otros en su recorrido hacia la zona de desembocadura. Con ello, la estructura biótica de estos ecosistemas se fortalece y estabiliza dinámicamente, permitiendo una homeostasis de salud ambiental.

Colombia es uno de los países más ricos en sistemas hídricos con 6 regiones hidrográficas reconocidas: Caribe, Orinoco, Amazonas, Pacífico, Magdalena-Cauca y Catatumbo (IDEAM, 2004, citado por Maldonado *et al.*, 2006). La zona del Pacífico Colombiano, epicentro del presente estudio, se encuentra en la región del Chocó Biogeográfico, la cual ha sido reconocida a nivel mundial por su gran y poco conocida biodiversidad natural en el planeta. En esta región, como en muchas otras, el desarrollo de las actividades humanas para el aprovechamiento constante y creciente de los recursos naturales con fines comerciales, ha ocasionado la transformación de ecosistemas, y la disminución, o desaparición, de poblaciones de muchas especies animales y vegetales (Mojica *et al.*, 2002), en la mayoría de los ecosistemas acuáticos aprovechados. El número de fuentes hídricas en una región puede ayudar a mitigar la degradación de estos ecosistemas hasta cierto nivel. Pero frecuentemente, los efectos de la intervención antrópica es mayor que la capacidad natural de restauración y remediación de los ecosistemas afecta-

dos. Muchos de estos afluentes son aprovechados variablemente por comunidades humanas, incluyéndolos como sitios para deposición de desechos. El manejo inadecuado de los residuos sólidos puede provocar la contaminación de las aguas superficiales, inicialmente, por su presencia directa y de los lixiviados, productos de ellos, en ríos, quebradas y otros cuerpos de agua. La falta de control adecuado de los residuos y lixiviados en el basurero de Buenaventura, ha permitido que estos contaminantes lleguen al cauce de la quebrada El Venado, donde se ha evidenciado un olor y color atípico en el agua de la quebrada.

Según Bermúdez y Ortega (2004), la escasa información existente sobre las especies biológicas, su estructura poblacional y sus relaciones comunitarias y ecosistémicas en estos afluentes naturales, magnifica el problema de desconocer la oferta real de sus recursos y servicios ambientales. Bajo esas condiciones, las pautas apropiadas para su conservación y manejo sostenible y responsable son difíciles de desarrollar.

Las condiciones conocidas localmente de los pequeños afluentes desconocidos para la ciencia, en el corregimiento de Córdoba, Municipio de Buenaventura, incentivó a realizar un primer estudio de trabajo de grado en la Universidad del Valle sede Pacífico en 2005 en la quebrada El Venado. Esta quebrada se encuentra dentro de una reserva nacional natural, con cierto nivel de actividad turística controlada. En 2008, las directivas de este plantel de educación superior propusieron una extensión del tema de investigación desarrollado. La meta del nuevo estudio era conocer la composición y estructura de las comunidades de peces de la quebrada El Venado, a diferentes distancias del basurero local. Las limitaciones presupuestales obligaron a establecer una investigación

biológica y ecológica de los peces en la quebrada El Venado con relación al basurero municipal de Buenaventura para 6 meses de trabajo de campo. Estas investigaciones buscan establecer las condiciones actuales de las poblaciones de peces en esta quebrada afectada por la cercanía de un relleno sanitario municipal. De acuerdo con la literatura revisada, estos son los primeros estudios científicos sobre las relaciones biológico-ecológicas de los peces con un medio dulceacuícola afectado por un relleno sanitario en esta zona, aunque los habitantes de la región conocen y le tienen nombres vernaculares a muchos de las especies estudiadas. Esta investigación biológico-ecológica presentó su propuesta en 2008, e inició sus actividades de campo y laboratorio en 2009.

La presente publicación divulga algunos de los resultados del trabajo científico en la quebrada El Venado. Los objetivos de la investigación fueron: (1) Establecer la composición, diversidad y densidad, en el tiempo y el espacio, de los peces presentes en la quebrada El Venado, con respecto a su ubicación y distancia al basurero municipal de Buenaventura; (2) determinar las condiciones ambientales y físico-químicas del hábitat en la quebrada; (3) relacionar los aspectos bióticos de los peces estudiados con variables físico-químicas y ambientales de la quebrada El Venado; (4) visualizar el estado de la quebrada El Venado a diferentes distancias del basurero municipal de Buenaventura, en relación con la influencia de basuras y lixiviados en sus aguas sobre las poblaciones de peces. El estudio busca conocer algunos aspectos ecológicos básicos de las poblaciones de peces diurnos en la que-

brada El Venado, enfatizando la variación grupal en las diferentes estaciones en relación a la localización del basurero municipal de Buenaventura.

### Material y métodos

La quebrada El Venado, uno de los tributarios del río Dagua que desemboca en la bahía de Buenaventura, está localizada en una reserva natural nacional boscosa costera, en el corregimiento de Córdoba, municipio de Buenaventura. La zona presenta una pluviosidad alta (6.000-7.000 mm de precipitación anual) en un ambiente tropical húmedo. Se estudiaron los peces presentes en 5 estaciones a lo largo de la quebrada El Venado, durante 6 salidas de campo (Tabla 1). Se realizó una salida de campo mensual, desde las 8:00 a.m. hasta las 5:00 p.m., entre los meses de Abril y Octubre de 2009. La estación 3 se ubicó en inmediaciones al basurero municipal de Buenaventura, y dos estaciones se establecieron antes y dos después del sitio (Tablas 1 y 3).

**Tabla 1.** Fechas y horario de trabajo de campo en la quebrada El Venado.

Salida	Fechas	Horas
1	28 de abril de 2009	8:47 - 15:45
2	6 de junio de 2009	8:52 - 16:37
3	26 de junio de 2009	8:26 - 17:00
4	28 de agosto de 2009	9:00 - 15:37
5	22 de septiembre de 2009	9:05 - 15:45
6	9 de octubre de 2009	8:42 - 15:54

**Tabla 2.** Variables registradas en la quebrada El Venado.

Peces	Físicas y químicas	Ambientales	Otras
Taxonomía*	Temperatura H <sub>2</sub> O*	Pluviosidad	Fauna acuática
Conteo*	Velocidad corriente*	Nubosidad	Flora acuática
Longitud total	pH*	Protección vegetal	Flora de orilla
	Oxígeno disuelto*	Estabilidad de bordes	Presencia antrópica
	Turbidez H <sub>2</sub> O*		
	Profundidad H <sub>2</sub> O*		
	Ancho de quebrada*		
	Material de fondo*		

**Tabla 3.** Datos GPS sobre las estaciones en la quebrada El Venado. (Altitud en metros sobre nivel del mar, m.s.n.m.; coordenadas en valores geográficos).

Estación	Altitud	Latitud N	Longitud W
1	20	03°52'07.5"	76°54'35.5"
2	26	03°52'06.6"	76°54'43.2"
3	23	03°52'01.3"	76°54'47.8"
4	21	03°51'55.2"	76°54'53.6"
5	21	03°52'02.2"	76°55'03.3"

En cada salida de campo, se registraron varios datos físicos, químicos y ambientales (Tabla 2) en las 5 estaciones de muestreo (Tabla 3). En este estudio, se analizaron algunas de estas variables (\*) del total considerado en el proyecto de investigación (Tabla 2). La estación 1 correspondió a la zona de la quebrada más alejada del río Dagua y la estación 5 es la más cercana a su desembocadura (Tabla 3). La estación 3 fue el punto de referencia para comparar la condición biológico-ecológica de los peces en la quebrada El Venado. La velocidad de la corriente del agua se calculó una sola vez en cada estación, durante las diferentes salidas de campo, siguiendo la metodología de **Lagler** (1956). Adicionalmente, se midió la temperatura y pH del agua, y el ancho y profundidad máxima y mínima de la quebrada. La turbidez no se midió ya que el fondo de la quebrada siempre estuvo visible, con diferente nivel de claridad.

Los ejemplares de las especies de peces estudiadas, se capturaron usando un equipo portátil de electropesca adaptado. Corriente abajo del área donde se usó el equipo de electropesca, se colocó un trasmallo con ojo de malla de 2 cms., a lo ancho de la quebrada para atajar los peces que se escapaban o aquellos afectados por la electricidad. Cada actividad de pesca duró 1 hora, en un tramo aleatorio de 100 metros de longitud y ancho variable de la quebrada, con profundidades frecuentemente menores a 1 metro. Todos los ejemplares capturados fueron agrupados en morfotipos, medidos en su longitud total y fotografiados en el campo, antes de seleccionar al menos 1 individuo de cada especie reconocible que se preservó y transportó al laboratorio en solución de formol al 9%, para su identificación y confirmación taxonómica, y la formación de una colección de referencia. El resto de los ejemplares fueron regresados vivos a la quebrada. El análisis taxonómico se logró hasta el nivel de especie, en la mayoría de los ejemplares, con la utilización de descripciones y claves conocidas (**Eigenmann & Eigenmann** 1890, **Eigenmann & Ward** 1905, **Boulenger** 1911, **Eigenmann** 1912, 1913, 1917, 1922, **Regan** 1912, 1913, 1914, **Myers** 1930, **Fowler** 1939, 1943, 1945, 1950, **Miles** 1943, 1971, **Schultz** 1944, 1944b, **Fernández-Yepez & Martin** 1952, **Nijssen & Isbrucker** 1968, **Dahl** 1971, **Gery** 1977, **INDERENA** 1978, **Mendes dos Santos et al.** 1984, **Britski et al.** 1988, **Rubio** 1988, 2007, 2008, **Swing & Ramsey** 1989, **Severy & Azevedo de Maura** 1994, **Galvis et al.** 1997, **Rubio & Angulo** 2003, **Ortega-Lara** 2006). Varias especies fueron confirmadas por ictiólogos especialistas internacionales. Se identificaron y midieron un total de 1.450 especímenes, reservando 214 individuos para una colección de referencia. Los ejemplares preservados, representantes de las diferentes especies y morfotipos capturados, forman parte de la Colección

Zoológica de referencia de la Universidad del Valle y del Museo Departamental de Ciencias Naturales Federico Carlos Lehmann Valencia (INCIVA).

La densidad y distribución de los peces se estableció para los órdenes, familias y especies de peces con base en la totalidad de los individuos capturados en las salidas. Los órdenes y familias de los peces capturados se organizaron en los análisis, de acuerdo a lo propuesto por Academia de Ciencias de California en 2010, para el ordenamiento de las taxas por desarrollo evolutivo y relaciones sistemáticas. Los resultados cuantitativos se expresan como cantidades y abundancia relativa entre las estaciones de campo, así como en forma integrada para los órdenes, familias, géneros, especies y estaciones estudiadas.

## Resultados y discusión

La zona de la quebrada El Venado presenta un ambiente de bosque tropical con poca variabilidad de clima, prevaleciendo una atmósfera húmeda cálida con lluvias ocasionales en el día. La parte más alta de la quebrada presentó aguas claras transparentes y frías con fondos pedregosos y fangosos. En las secciones bajas, los fondos estuvieron menos fangosos con aguas ligeramente turbias (Tabla 4). En esta zona, existe una mayor presencia de turistas y visitantes ocasionales. Adicionalmente, el basurero municipal se encuentra a corta distancia, corriente abajo, de sus localizaciones (Tabla 3).

Durante el estudio, hubo épocas de días lluviosos y secos en la quebrada, notándose por la condición del cauce y la captura de los peces en cada salida de campo. El único aguacero significativo se presentó durante la tercera salida de campo (26 de junio) en la última estación de trabajo (EST 5). En la salida 4 (28 de agosto) llovió con menor intensidad hacia el final de la tarde, en la estación 5; durante el resto del tiempo de las salidas, la pluviosidad fue mínima o no existió. Sólo en la última salida de campo (9 de octubre), hubo una cobertura de 100% en las primeras horas de la mañana, mientras que durante el resto de las actividades de campo, la nubosidad fue inferior al 50%. La mitad del tiempo de las salidas estuvo soleado, aunque la cobertura vegetal en la quebrada mitigaba los efectos de los rayos solares sobre el área de trabajo, en parte facilitando el desarrollo de las actividades de investigación.

El área promedio de las estaciones muestreadas en la quebrada fue muy similar, aunque sus profundidades variaron con las condiciones climáticas de los días anteriores a las salidas de campo. Sólo en una ocasión, en la salida del 26 de junio, la profundidad máxima de la quebrada se registró hasta unos 2 metros, en la estación 1 (Tabla 4) por

**Tabla 4.** Condiciones físicas promedio de las 5 estaciones en la quebrada El Venado. (Superficie en metros; profundidad en centímetros; ancho en metros).

Estación	Superficie	Profundidad	Ancho	Material del fondo
1	732.8	8-183	3.7-13.5	Arena, canto, grava, limo, roca
2	730.4	4-150	3.5-13.2	Arena, canto, grava, roca
3	745.1	9-100	7.7-13.5	Arena, canto, grava, roca
4	690.3	9-160	3.2-16.5	Arena, canto, grava, roca
5	772.5	6-100	6.2-14.7	Arena, canto, grava, roca

una intensa lluvia el día y la noche anterior. Estas condiciones de pluviosidad también afectan el ancho húmedo de la quebrada, permitiendo alcanzar un máximo de unos 16 metros en la estación 4 durante la salida del 28 de abril. El fondo de estas estaciones se compone de los mismos elementos rocosos degradados, excepto en la estación 1 que tiene adicionalmente limo (Tabla 4). La estación 1, durante la salida del 9 de octubre, con la menor área muestreada (525 m<sup>2</sup>), tuvo una velocidad de corriente promedio (0,3 metros/metro) con una concentración de oxígeno disuelto bajo (6,2 mg/l), pH alto (7,7) y temperaturas del agua bajas (25,4°C) (Tabla 5). En promedio, la temperatura del agua no varió significativamente. El pH promedio del agua, con un mayor nivel de turbiedad, estuvo ligeramente más ácido en las estaciones 4 y 5 (Tabla 5). El pH y la velocidad de la corriente media de la quebrada fueron las variables que fueron más homogéneas durante el estudio.

**Tabla 5.** Condiciones fisicoquímicas promedio en las estaciones de la quebrada El Venado. (Corriente del agua en m/seg.; temperatura en °C; OD (oxígeno disuelto) en mg/l).

Estación	Corriente	Temperatura	pH	OD	Turbidez
1	0,3	27,4	7,2	6,9	Ninguna; baja
2	0,3	27,7	7,3	7,4	Baja; media
3	0,3	28,6	7,2	6,8	Baja; media
4	0,6	27,5	7,1	6,0	Media
5	0,3	27,9	7,1	6,8	Ninguna; alta

El nivel relativo de oxígeno disuelto fue normal en las primeras estaciones de la quebrada, ya que el agua va incrementándolo a medida que aumenta su orden, por acumulación de gases y variación de productores primarios. Por factores que requerirían de estudios adicionales, la concentración promedio de oxígeno disminuyó significativamente a partir de la estación 3 (Tabla 5) donde la turbidez del agua fue más evidente. La velocidad de la corriente del agua fue bastante similar a lo largo de la quebrada (0,3 m/s). La estación 3 registró el mayor nivel de temperatura del agua (Tabla 5). Antes de este punto de muestreo, el oxígeno disuelto mostró concentraciones al-

tas (7,3 y 6,2 mg/l) así como del pH (7,3 y 7,2). Hacia la sección baja de la quebrada, luego de la estación 3, la temperatura, pH y oxígeno disuelto tienden a disminuir sus concentraciones, especialmente en la estación 4 (Tabla 5). La turbidez empieza a aumentar significativamente a partir de la estación 4 hacia su desembocadura. Solo en la estación 1, en la zona alta de la quebrada, el agua es clara cristalina. En la estación 3, la existencia de material en degradación bajo tierra, en el basurero municipal, puede causar un flujo de material líquido contaminante por sus concentraciones, hacia las aguas de la quebrada. En las estaciones más alejadas del basurero municipal, la presencia de áreas recreativas y turistas directamente aumentan los niveles de material en suspensión y diluidos en el agua de la quebrada, modificando su condición normal. La incorporación de elementos físicos, variación en la presencia de fauna y flora, y los cambios en las condiciones del agua por los anteriores factores, entre otros, permite que la transparencia de un afluente cambie, usualmente alcanzando mayores niveles de turbiedad.

De los 1.450 peces capturados, se identificaron un total de 37 especies pertenecientes a 29 géneros de 19 familias de peces dulceacuícolas y marinos (Tablas 6 y 7). Sin embargo, 9 morfotipos de esos peces fueron identificados hasta el nivel de género (Tabla 7). Cuantitativamente, se incluyen tanto las especies identificadas como los morfotipos determinados, en los análisis de abundancia, cantidad y distribución espacio-temporal de especies e

**Tabla 6.** Número de órdenes, familias, géneros y especies estudiadas en las estaciones de la quebrada.

Estación	Núm. órdenes	Núm. familias	Núm. géneros	Núm. especies
1	4	14	18	23
2	5	15	21	28
3	4	13	20	23
4	5	15	20	26
5	5	16	20	24
<b>Total</b>	6	19	29	46

**Tabla 7.** Listado de las especies de peces presentes en la quebrada El Venado durante las horas diurnas.

ORDEN CHARACIFORMES	
Familia CURIMATIDAE	
1	<i>Pseudocurimata lineopunctata</i> (Boulenger, 1911)
Familia ERYTHRINIDAE	
2	<i>Hoplias malabaricus</i> (Bloch, 1794)
Familia LEBIASINIDAE	
3	<i>Lebiasina multimaclata</i> Boulenger, 1911
4	<i>Piabucina festae</i> Boulenger, 1899
Familia CHARACIDAE	
5	<i>Astyanax fasciatus</i> (Cuvier, 1819)
6	<i>Astyanax ruberrimus</i> Eigenmann, 1913
7	<i>Astyanax</i> sp. 1
8	<i>Astyanax</i> sp. 2
9	<i>Brycon henni</i> Eigenmann, 1913
10	<i>Brycon oligolepis</i> Regan, 1913
11	<i>Brycon</i> sp. 1
12	<i>Bryconamericus caucanus</i> Eigenmann, 1913
13	<i>Bryconamericus emperador</i> (Eigenmann & Ogle, 1907)
14	<i>Bryconamericus</i> sp. 1
ORDEN SILURIFORMES	
Familia PSEUDOPIMELODIDAE	
15	<i>Cruciglanis pacifici</i> Ortega-Lara & Lehmann, 2006
Familia HEPTAPTERIDAE	
16	<i>Pimelodella eutaenia</i> Regan, 1913
17	<i>Pimelodella</i> sp. 1
18	<i>Rhamdia quelen</i> (Quoy & Gaimard, 1894)
Familia CETOPSIDAE	
19	<i>Cetopsis amphiloza</i> (Eigenmann, 1914)
Familia TRICHOMYCTERIDAE	
20	<i>Trichomycterus caliensis</i> (Eigenmann, 1912)
21	<i>Trichomycterus spilosoma</i> (Regan, 1913)
22	<i>Trichomycterus striatus</i> (Meek & Hildebrand, 1913)
23	<i>Trichomycterus taenia</i> Kner, 1863
Familia LORICARIIDAE	
24	<i>Ancistrus centrolepis</i> Regan, 1913
25	<i>Chaetostoma fischeri</i> Steindachner, 1879
26	<i>Chaetostoma leucomelas</i> Eigenmann, 1918
27	<i>Chaetostoma</i> sp. 1
28	<i>Chaetostoma</i> sp. 2
29	<i>Cordylancistrus daguae</i> (Eigenmann, 1912)
30	<i>Cordylancistrus</i> sp. 1
31	<i>Cordylancistrus</i> sp. 2
32	<i>Spatuloricaria c.f. gymnogaster</i> (Eigenmann & Vance, 1912)
ORDEN GYMNOTIFORMES	
Familia STERNOPYGIDAE	
33	<i>Sternopygus macrurus</i> (Bloch & Schneider, 1801)
Familia APTERONOTIDAE	
34	<i>Apteronotus leptorhynchus</i> (Ellis, 1912)
Familia HYPOPOMIDAE	
35	<i>Brachyhypopomus occidentalis</i> (Regan, 1914)
Familia GYMNOTIDAE	
36	<i>Gymnotus carapo</i> Linnaeus, 1758
37	<i>Gymnotus henni</i> Crampton & Maldonado, 2003
ORDEN BELONIFORMES	
Familia BELONIDAE	
38	<i>Strongylura scapularis</i> (Jordan & Gilbert, 1882)
ORDEN SYNBRANCHIFORMES	
Familia SYNBRANCHIDAE	
39	<i>Synbranchus marmoratus</i> Bloch, 1795
ORDEN PERCIFORMES	
Familia MUGILIDAE	
40	<i>Agonostomus monticola</i> (Bancroft, 1834)
Familia CICHLIDAE	
41	<i>Cichlasoma atromaculatum</i> Regan, 1912
Familia ELEOTRIDAE	
42	<i>Eleotris picta</i> Kner, 1863
43	<i>Gobiomorus maculatus</i> (Gunther, 1859)
44	<i>Hemieleotris latifasciata</i> Meek & Hildebrand, 1912
Familia GOBIIDAE	
45	<i>Awaous banana</i> (Valenciennes, 1837)
46	<i>Sicydium hildebrandi</i> Eigenmann, 1918

individuos, dando por resultado 46 especies tentativas. La estaciones inmediatamente antes y después del basurero municipal tuvieron la mayor variedad de peces (28 y 26 especies, respectivamente); las 2 estaciones más alejadas del basurero (núms. 1 y 5) tuvieron cantidades similares con 23 y 24 especies cada una (Tabla 6). La zona del basurero mostró una baja cantidad de familias y especies de peces, como es característico en zonas altas de los afluentes. Idealmente, las poblaciones de peces aumenta relativamente, en individuos y especies, a medida que se avanza por la quebrada o río hacia su desembocadura. En

general, la estación 3 correspondiente al basurero municipal, presentó una cantidad reducida de especies con respecto a su entorno aguas arriba y debajo de su localización (Tabla 6). Sin embargo, la cantidad de órdenes, familias y géneros particulares fue bastante homogénea, aunque no en los ictiotipos de cada nivel taxonómico.

El orden Siluriformes tuvo la mayor representatividad integral de peces en la quebrada El Venado con 18 especies (39,1%), seguido por el orden Characiformes con 14 especies (30,4%), entre los 6 órdenes estudiados. Les si-

guieron los órdenes Perciformes y Gymnotiformes con 7 y 5 especies, respectivamente. El ejemplar migratorio de origen marino de la familia Belonidae (Orden Beloniformes) solo registró 1 especie (2,2%) (Tablas 8 y 9). Los 4 órdenes menos representativos de los peces (Gymnotiformes, Beloniformes, Synbranchiformes y Perciformes), en las estaciones de la quebrada, suma alrededor del 30% de especies, juntos. Todos los órdenes de peces de quebrada, excepto los ejemplares Beloniformes y Synbranchiformes, registraron cantidades similares de familias ( $n = 4-5$ ).

**Tabla 8.** Cantidad de familias, géneros y especies de los 6 órdenes de peces presentes en la quebrada.

Orden	Familias	Géneros	Especies	% de especies
Characiformes	4	7	14	30,4
Siluriformes	5	9	18	39,1
Gymnotiformes	4	4	5	10,9
Beloniformes	1	1	1	2,2
Synbranchiformes	1	1	1	2,2
Perciformes	4	7	7	15,2
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>29</b>	<b>46</b>	<b>100</b>

El pez aguja del orden Beloniformes se encontró en la estación 2, evidenciando un largo trayecto de migración temporal desde el mar. El orden Siluriformes, que fue el más diverso en especies (Tabla 8), mostró una composición bastante homogénea en las primeras tres estaciones, siendo mayor en la estación 4 ( $n = 12$ ) y menor en la estación 5 ( $n = 6$ ) (Tabla 9). El segundo orden, Characiformes, con una gran cantidad de especies, registró, sin embargo, un número de especies ligeramente menor (Tabla 8), siendo significativamente bajo en la estación 1 y 4 ( $n = 5$ ), y alto en la estación 5 ( $n = 9$ ) (Tabla 9). En la estación 4, donde el orden Siluriformes tuvo una cantidad mayor ( $n = 12$ ), los peces Characiformes tuvieron una menor ( $n = 5$ ), mientras que en la estación 5 donde el orden Characiformes mostró

una mayor cantidad de especies ( $n = 9$ ), el orden Siluriformes fue menor ( $n = 6$ ) (Tabla 9). Sólo en la estación 3, la cantidad de especies de estos 2 órdenes fue el mismo ( $n = 8$ ). El orden Perciformes fue el más homogéneo con alrededor de 5 especies por estación. Los órdenes Characiformes y Siluriformes tienden a aumentar sus especies hacia la estación 3, excepto el segundo, que continua aumentando hacia la estación 4, posterior al basurero. En ese tramo, entre el basurero y la estación 4, los peces Characiformes disminuyen. Los ejemplares Gymnotiformes tendieron a disminuir su especies en las zonas previas al basurero, aumentándolas en las estación posteriores. Únicamente los representantes Perciformes mantuvieron la cantidad de especies a lo largo del trayecto estudiado (Tabla 9).

Integralmente, el orden Characiformes fue el más abundante con 746 individuos capturados, frente al orden Siluriformes con 539 peces (Tabla 10). El orden Characiformes mostró su mayor presencia en la estación 3, mientras que el grupo de los bagres (Siluriformes) predominó en la siguiente estación 4, seguida por la estación 1, donde las sardinas de río (Characiformes) fueron muy escasas (Tabla 10). El orden Synbranchiformes registró un número bajo de especies ( $n = 1$ ) (Tablas 8 y 9), la mayor cantidad de ejemplares, superior a la del orden Gymnotiformes y en parte a los Perciformes, se capturó en la estación 5 ( $n = 18$ ) frente a 1 pez en la estación 4.

Los órdenes con menos cantidad de ejemplares capturados (Gymnotiformes, Beloniformes, Synbranchiformes y Perciformes) aportaron sólo un 10% de los individuos en la quebrada (Tabla 10). En la estación 3 predominó significativamente el orden Characiformes ( $n = 224$ ) seguido por los peces Siluriformes ( $n = 45$ ) y Perciformes ( $n = 32$ ) (Tabla 10). Muchas de sus especies tienen facultades para sobrevivir en aguas con condiciones adversas, como bajos niveles de oxígeno, turbiedad del agua, temperaturas cálidas, entre otras. Los Characiformes y Perciformes

**Tabla 9.** Número de especies de peces presentes en las 5 estaciones estudiadas en la quebrada El Venado.

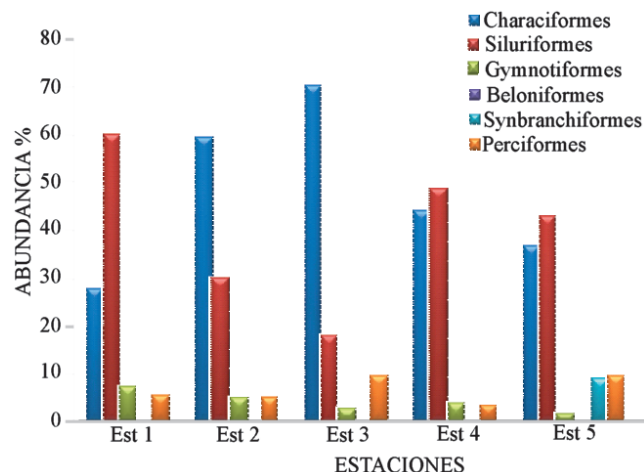
Orden	Est. 1		Est. 2		Est. 3		Est. 4		Est. 5	
	Spp.	%	Spp.	%	Spp.	%	Spp.	%	Spp	%
Characiformes	5	21,7	8	28,6	8	34,8	5	19,2	9	37,5
Siluriformes	9	39,1	9	32,1	8	34,8	12	46,2	6	25,0
Gymnotiformes	4	17,4	5	17,9	2	8,7	4	15,4	3	12,5
Synbranchiformes							1	3,8	1	4,2
Beloniformes			1	3,6						
Perciformes	5	21,7	5	17,9	5	21,7	4	15,4	5	20,8
<b>Total</b>	<b>23</b>	<b>100</b>	<b>28</b>	<b>100</b>	<b>23</b>	<b>100</b>	<b>26</b>	<b>100</b>	<b>24</b>	<b>100</b>



aumentaron la cantidad de peces en las estaciones anteriores al basurero municipal, la cual disminuyó en las estaciones posteriores al relleno sanitario. Contrariamente, los peces Siluriformes y Gymnotiformes tuvieron una reducción en la cantidad de peces capturados en las estaciones anteriores al basurero, para aumentar en el trayecto hacia la estación 4 y disminuir de nuevo hacia el último sitio de trabajo de campo (Tabla 10).

Los datos analizados evidencian una considerable abundancia de peces en los órdenes Characiformes y Siluriformes, en cada una de las 5 estaciones estudiadas, aportando un máximo de 70% de individuos a la comunidad de peces (Figura 1). Mientras la mayor abundancia de los Siluriformes ocurrió en la estación 1 (60%), los Characiformes tuvieron una densidad promedio similar en la estación 2 que estaba cercana al basurero, disminuyendo sus niveles en las últimas dos localidades. Los peces Characiformes dominaron significativamente en la estación 3, con un 70% de la comunidad. La densidad de las sardinias de río en la estación 1 fue la más baja, cercana al 30%; la abundancia de los peces Siluriformes registró menos del 20% en la estación 3 (Figura 1). El orden Characiformes mostró más de 20% de abundancia en todas las estaciones, mientras que los peces Siluriformes registraron una abundancia similar excepto en la estación 3 que fue del 17,9%. Para el resto de los órdenes, la abundancia fue menor al 10%.

En las estaciones (4 y 5) más cercanas a la desembocadura de la quebrada, los órdenes Characiformes y Siluriformes mostraron una abundancia similar entre 40-50%. El orden Gymnotiformes dominó en las primeras estaciones (1 y 2), disminuyendo su densidad a más de la mitad en la estación 3 (Figura 1). Parece que los órdenes Characiformes y Perciformes mantuvieron abundancias relativamente altas en relación con el resto de las estaciones, del 50 y 9%, respectivamente, en la estación del basurero. En las estación siguientes antes y después del lugar, la densidad de los Characiformes disminuyó ligeramente, pero la de los Perciformes disminuyó a casi la mitad (unos 5%) (Figura 1). Únicamente los órdenes Beloniformes y Synbranchiformes



**Figura 1.** Distribución de la abundancia de los órdenes de peces en las 5 estaciones de la quebrada El Venado.

no tuvieron presencia de peces en cada una de las estaciones estudiadas. La estación 1 y 3 tuvieron la menor cantidad de órdenes de peces ( $n = 4$ ); el resto de las agrupaciones mostró una cantidad ligeramente mayor ( $n = 5$ ). En relación con la abundancia de los peces en sus respectivos órdenes, su variación fue muy similar a la registrada con la cantidad de peces capturados (Figura 1, Tabla 10).

La familia Characidae estuvo muy abundante en todas las estaciones, seguida por la familia Loricariidae, excepto en las estaciones 2 y 3, donde tuvieron niveles de 10 y 20%, como los niveles de la familia Cetopsidae en las estaciones 1 y 2 (Figura 2). El resto de las familias presentaron menos de 10% de abundancia en sus poblaciones. Ninguna estación tuvo representantes de cada una de las familias estudiadas (Figura 2). Sin embargo, 9 familias estuvieron presentes en todas las estaciones. Las familias Erythrinidae y Belonidae fueron encontradas en una sola estación, E5 y E2, respectivamente, con mínimas densidades de 0,4% y 0,2% cada una. La estación 3 en el basurero registró el menor número de familias de peces, y la estación 5 la mayor cantidad (Figura 2).

**Tabla 10.** Cantidad relativa de peces capturados en la quebrada El Venado.

Orden	Est. 1	Est. 2	Est. 3	Est. 4	Est. 5	Total general
Characiformes	73	170	224	169	110	746
Siluriformes	132	90	45	157	115	539
Gymnotiformes	14	13	7	10	5	49
Beloniformes		1				1
Synbranchiformes				1	18	19
Perciformes	10	14	32	20	20	96
<b>Total general</b>	<b>229</b>	<b>288</b>	<b>308</b>	<b>357</b>	<b>268</b>	<b>1450</b>

FAMILIA	Est 1	Est 2	Est 3	Est 4	Est 5
Curimatidae			0,2	0,1	0,5
Erythrinidae					0,4
Lebiasinidae		0,3	0,8		1,9
Characidae	27,4	59,1	69,0	44,1	34,1
Pseudopimelodidae	2,6	0,5	0,6	0,1	0,9
Heptapteridae	1,9	4,0	2,7	0,6	0,6
Cetopsidae	18,4	11,0	1,6	0,4	
Trichomycteridae	3,2	1,5	0,9	7,2	5,3
Loricariidae	34,0	13,1	12,1	40,0	36,1
Sternopygidae	0,7	1,4	0,5	0,6	0,9
Apteronotidae	5,8	0,8		2,5	0,5
Hypopomidae	0,3	1,8	2,2	0,1	0,4
Gymnotidae	0,3	0,9		0,6	
Belonidae		0,2			
Synbranchidae				0,1	8,9
Mugilidae	1,2		0,2		4,7
Cichlidae	0,8	0,8	1,4	0,2	0,8
Eleotridae	3,2	3,3	7,8	1,6	2,3
Gobiidae	0,2	1,1		1,7	1,7

Figura 2. Distribución espacial de la abundancia, en porcentaje, de las familias de peces presentes en la quebrada El Venado.

La estación 3 mostró la menor cantidad de familias presentes (n = 13), aumentando su número en las estaciones localizadas antes (n =14 y 15) y después (n = 15 y 16) del basurero, siendo mayor hacia la zona de la desembocadura de la quebrada El Venado (Figura 2). Las familias de los peces en la estaciones anteriores al basurero mostraron algunas diferencias; la cantidad de peces y la abundancia relativa aumentó en el sector inmediatamente anterior al relleno, mientras que la cantidad de especies disminuyó. En la zona más alejada del relleno (Est. 1-2) el número de especies y de peces aumentó, mientras que su abundancia disminuyó. Notoriamente, la abundancia, número de especies y de peces aumentó en la sección inmediatamente posterior a la estación del relleno, y disminuyó hacia la estación 5 (Figura 2).

La especie *Spatuloricaria c.f. gymnogaster* tuvo una considerable presencia, mayor al 10% en todas las estaciones, seguida por *Brycon emperador* (en 4 estaciones), *Cetopsis amphiloza* y *Brycon oligolepis* (en 2 estaciones), y *Astyanax ruberrimus*, *Astyanax* sp 1 y *Brycon* sp 1 (en 1 estación). El resto de las especies contribuyeron, cada una, con menos de 9% de la densidad poblacional en las estaciones (Figura 3). Solo 11 especies de 47 taxas identificadas estuvieron presentes en cada una de las estaciones; 13 especies ocurrieron en 1 sola estación durante todo el estudio (Figura 3). La estación del basurero (Est. 3) registró la menor cantidad de especies (n = 23), mientras que las dos estaciones más cercanas, a cada lado de la esta-

ción 3, mostraron el mayor número (n = 28 y 26, arriba y debajo del basurero). En la estación 1 y 5, la cantidad de especies fue similar a la estación 3 (Figura 3).

No se encontraron estudios publicados que pudieran apoyar los resultados de la presente investigación en la quebrada El Venado, desde la perspectiva biológico-ecológica de poblaciones y comunidades afectadas por lixiviados de rellenos sanitarios, en el espacio y tiempo. La mayoría trata de las características de los rellenos sanitarios y guías para la mejora de su manejo, así como informes sobre análisis de impacto en comunidades de fauna dulceacuícola. **James (1977)** encontró que los efectos de los lixiviados no se limitan al agua que se consume directamente, sino también a su desplazamiento a través de las cadenas tróficas al ser consumidas por organismos de la fauna y la flora en sus procesos fisiológicos naturales. Esto hace que estas sustancias se acumulen en organismos transportadores, se desarrollen enfermedades, intoxicaciones y muerte de individuos. Adicionalmente, los efectos de aguas servidas sin tratamiento de poblaciones humanas, agentes patógenos, metales pesados y bacterias sobre la vida natural en varios cursos de agua dulceacuícola se evidenciaron en un estudio realizado por **León (2003)**. Tanto los individuos adultos como los juveniles y larvas de peces expuestos a contaminantes orgánicos de rellenos sanitarios pueden desarrollar problemas severos de salud, fisiología y anatomía (**Alkassasbeh et al. 2009**).

ESPECIE	Est 1	Est 2	Est 3	Est 4	Est 5
<i>Pseudocurimata lineopunctata</i>			0,2	0,1	0,5
<i>Hoplias malabaricus</i>					0,4
<i>Lebiasina multifasciata</i>		0,3	0,7		
<i>Piabucina festae</i>			0,1		1,9
<i>Astyanax fasciatus</i>		0,7			
<i>Astyanax ruberrimus</i>	3,9	2,2	36,1	1,8	6,1
<i>Astyanax sp 1</i>	0,2	7,9	13,7	6,2	0,6
<i>Astyanax sp 2</i>	4,0				
<i>Brycon henni</i>		1,4			
<i>Brycon oligolepis</i>	17,0	9,4	1,3		14,9
<i>Brycon sp 1</i>		22,0			
<i>Bryconamericus caucanus</i>			0,9	0,4	0,5
<i>Bryconamericus emperador</i>	2,5	15,4	17,0	35,9	10,2
<i>Bryconamericus sp 1</i>					1,8
<i>Cruciglanis pacifici</i>	2,6	0,5	0,6	0,1	0,9
<i>Pimelodella eutaenia</i>	1,9	3,7	2,3	0,4	0,6
<i>Pimelodella sp 1</i>				0,1	
<i>Rhamdia quelen</i>		0,4	0,4	0,2	
<i>Cetopsis amphiloza</i>	18,4	11,0	1,6	0,4	
<i>Trichomycterus calianse</i>	0,2	0,8		0,1	
<i>Trichomycterus pilosoma</i>	2,6	0,7	0,7	6,8	4,6
<i>Trichomycterus striatus</i>	0,4			0,3	
<i>Trichomycterus taenia</i>			0,2		0,7
<i>Ancistrus centrolepis</i>				0,1	
<i>Chaetostoma fischeri</i>				0,1	0,2
<i>Chaetostoma leucomelas</i>		0,9			
<i>Chaetostoma sp 1</i>				0,1	
<i>Chaetostoma sp 2</i>		0,3			
<i>Cordylancistrus daguae</i>			0,6		
<i>Cordylancistrus sp 1</i>	0,2				
<i>Cordylancistrus sp 2</i>	2,4				
<i>Spatuloricaria gymnogaster</i>	31,5	12,0	11,5	39,8	36,0
<i>Sternopygus macrurus</i>	0,7	1,4	0,5	0,6	0,9
<i>Apteronotus leptorhynchus</i>	5,8	0,8		2,5	0,5
<i>Brachyhypopomus occidentalis</i>	0,3	1,8	2,2	0,1	0,4
<i>Gymnotus carapo</i>	0,3	0,6			
<i>Gymnotus henni</i>		0,4		0,6	
<i>Strongylura scapularis</i>		0,2			
<i>Synbranchus marmoratus</i>				0,1	8,9
<i>Agonostomus monticola</i>	1,2		0,2		4,7
<i>Cichlasoma atromaculatum</i>	0,8	0,8	1,4	0,2	0,8
<i>Eleotris picta</i>			0,7	0,4	1,0
<i>Gobiomorus maculatus</i>	1,7	2,5	4,2	1,3	1,3
<i>Hemieleotris latifasciata</i>	1,5	0,8	2,9		
<i>Awaous banana</i>	0,2	0,9		1,7	1,7
<i>Sievdium hildebrandi</i>		0,2			

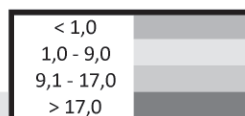


Figura 3. Distribución espacial de la abundancia, en porcentaje, de las especies de peces presentes en la quebrada El Venado.

## Conclusiones

Las variaciones ambientales y fisicoquímicas de las aguas en la quebrada El Venado son leves. La temperatura del agua y el oxígeno disuelto son las variables que fueron afectadas por el entorno natural. Esta homogeneidad del afluente no parece tener una gran afectación

sobre el comportamiento poblacional y comunitario de los peces entre las diferentes estaciones de trabajo. Algunos estudios se han realizado en algunas fuentes hidrológicas cercanas a la quebrada, incluyendo el río Dagua (Peña *et al.*, 2001; Vásquez *et al.*, 2001, 2001b), analizando las condiciones ambientales de las aguas y la estructura trófica.

Dos agrupaciones constantes dominaron por número de individuos o porcentaje en las estaciones de la quebrada El Venado: Characiformes – Characidae – *Bryconamericus emperador* y Siluriformes – Loricariidae – *Spatuloricaria c.f. gymnogaster*. Su dominancia se mantuvo en relación con su abundancia relativa, número de especies y cantidad de individuos. Otras especies de la familia Characidae y de la familia Cetopsidae también codominaron a menor escala las aguas de la quebrada (Figura 3).

La especie *Spatuloricaria c.f. gymnogaster* de la familia Loricariidae tuvo un mejor desempeño en la zona posterior al basurero, mientras que las especies de la familia Characidae parecen requerir de aguas con mejor cualidades. Por lo general, la abundancia de la mayoría de las especies presentes después del relleno sanitario fue baja, contrario a las áreas anteriores al basurero. La cantidad de especies tolerantes fue mínima.

Integralmente, las especies, familias y ordenes presentes en la estación 3 tuvieron un porcentaje menor que las presentes en las otras 4 estaciones del estudio. A medida que se incrementaba la distancia corriente abajo de la zona del basurero, el porcentaje aumentaba notoriamente.

Aunque existe cierta constancia sobre cambios en las poblaciones y comunidades de los peces en las diferentes estaciones, con relación a la estación 3, donde la abundancia, número de especies e individuos descendió significativamente, los efectos del basurero sobre ellas son inconclusos ya que persisten numerosas variables que deberían considerarse. No siempre una sola variable es responsable por un efecto observado; a medida que aumentan las variables objeto, el análisis adquiere una correspondiente dificultad y que puede llevar a la respuesta más correcta.

No se evidenció ningún efecto fisiológico o morfológico en los peces capturados, incluidos los de la estación 3 y 4, que serían los más afectados por el basurero.

### Agradecimientos

Deseamos agradecer a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle por la financiación y manejo del proyecto “Composición y estructura de la ictiofauna de la quebrada El Venado como bioindicador del impacto ambiental del basurero del municipio de Buenaventura” (CI núm. 7771); a los funcionarios de la Universidad del Valle sede Pacífico por su apoyo logístico; a los profesores Gustavo Isaza y Efraín Rubio, de la Universidad del Valle sede Pacífico y Universidad del Valle, respectivamente,

por su colaboración y gestión científica en el proyecto; a los estudiantes de la Universidad del Valle sede Pacífico y a varios habitantes del corregimiento de Córdoba, por gran asistencia y participación en las actividades de campo y laboratorio. Adicionalmente reconocemos la invaluable ayuda de James Albert, Will Crampton, Sven Kullander, John G. Lundberg y Marilyn Weitzman durante la identificación de los peces.

### Bibliografía

- Alkassasbeh, Jaffar T; Y. M., Lee Yook Heng y Salmijah Surif.** 2009. Toxicity testing and the effect of landfill leachate in Malasya on behavior of common carp (*Cyprinus carpo* L., 1758; Pisces, Cyprinidae). *American Journal of Environmental Sciences* 5(3):209-217.
- Bermúdez, R. & A. Ortega.** 2004. Composición y estructura de las comunidades de peces de la cuenca alta del río Patía, Departamento del Cauca. Corporación Autónoma Regional del Cauca.
- Boulenger, G. A.** 1911. Descriptions of three new Characinid fishes from South-Western Colombia. *Ann. Mag. Nat. Hist., Series 8,* 7:212-213.
- Britski, Heraldo A., Yoshimi Sato & Albert B. S. Rosa.** 1988. Manual de indentificaoa de peixes da regioa de Tres Mariás. Ministerio da Irrigacao, CODEVASF, Brasilia.
- Dahl, George.** 1971. Los peces del norte de Colombia. Inderena, Bogotá, Colombia.
- Eigenmann, Carl H.** 1912. Some results from an ichthyological reconnaissance of Colombia, South America. *Indiana Univ. Studies* (8):1-27.
- . 1913. Some results from an ichthyological reconnaissance of Colombia, South America. Part II. *Indiana Univ. Studies* 18(131):1-30.
- . 1917. Eighteen new species of fishes from northwestern South America. *Proc. Amer. Phil. Soc* 56:673-689.
- . 1922. The fishes of western South America. Part I. The fresh-water fishes of northwestern South America, including Colombia, Panama and the Pacific slope of Ecuador and Peru, together with an appendix upon the fishes of the rio Meta in Colombia. *Mem. Carnegie Mus* 9(1):1-218.
- . & **David Perkins Ward.** 1905. The gymnotidae. *Proc. Wash. Acad. of Sci* 7:157-186.
- . & **Rosa S. Eigenmann.** 1890. A revision of South American Nematognathi or cat-fishes. *California Academy of Sciences, Occasional Papers* 1.
- Fernández-Yepe, Agustín & Felipe Martín S.** 1952. Notas sobre la fauna ictiológica de la región Baruta-El Hatillo. *Mem. Soc. Cienc. Nat. La Salle. Tomo II* (31):31-44.
- Fowler, Henry W.** 1939. Fishes from the Pacific slope of Colombia, Ecuador and Peru. *Notulae Naturae* (33):1-7.
- . 1941. Notes on Colombian fresh-water fishes with descriptions of four new species. *Notulae Naturae* (73):1-10.

- \_\_\_\_\_. 1943. A collection of fresh-water fishes from Colombia, obtained chiefly by Brother Niceforo Maria. Proc. Acad. Nat. Sc. Phil 95:223-266.
- \_\_\_\_\_. 1945. Colombian zoological survey. Part I. The fresh-water fishes obtained in 1945. Proc. Acad. Nat. Sci. Phil 97:93-135.
- \_\_\_\_\_. 1950. Colombian zoological survey. Part IV. Fishes obtained at Totumo, Colombia, with descriptions of two new species. Notulae Naturae (222):1-8.
- Galvis, Germán, José Iván Mojica & Mauricio Camargo.** 1997. Peces del Catatumbo. Asociación Cravo Norte, Santafé de Bogotá.
- Gery, Jacques.** 1977. Characoids of the world. T. F. H. publications, Inc. Ltd., USA.
- INDERENA.** 1978. Catálogo de peces Colombianos. Aguas continentales. INDERENA, Bogotá.
- James, Stephen C.** 1977. Metals in municipal landfill leachate and their health effects. AJPB May 67(5):429-432.
- Lagler, Karl.** 1956. Freshwater fishery biology. W. M. C. Brown Company Publishers (2<sup>a</sup> edición), 421 pp.
- León, Roberto de.** 2003. Análisis de contaminación de peces en el río Montagua (contaminación de peces y lesiones gastrointestinales y dermatológicas). Informe, Guatemala.
- Maldonado, O. J., N. F. Villa, A. Ortega, S. Prada, U. Jaramillo, A. Claro, S. Usma, T. S. Rivas, W. C. Salazar, J. F. Cuestas & J. E. García.** 2006. Peces del río Atrato. Zona hidrográfica del Caribe, Colombia. Revista Biota Colombiana 7(1):14-152.
- Margalef, R.** 2002. Teoría de los sistemas ecológicos. Alfa Omega Editores (2da edición), Universidad de Barcelona, España.
- Mendes dos Santos, Geraldo, Michel Jegú & Bernard de Merona.** 1984. Catalogo de peixes comerciais do Baixo Rio Tocantins. Projeto Tucuruí, Electronorte, CNPq & INPA, Manaus.
- Miles, Cecil W.** 1943. Estudio económico y ecológico de los peces de agua dulce del Valle del Cauca. Secretaría de Agricultura y Fomento del Departamento, Cali, Valle 19-65.
- \_\_\_\_\_. 1971. Los peces del Río Magdalena. UT Ediciones, Ibagué, 214 pp.
- Mojica, J. I., C. Castellanos, S. Usma & R. Álvarez (Eds.).** 2002. Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia. La serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente, Bogotá, Colombia, 285 pp.
- Myers, George S.** 1930. Fishes from the upper río Meta basin, Colombia. Proc. Biol. Soc. Wash 43:65-72.
- Nijssen, H. & I. J. H. Isbrucker.** 1968. *Gymnotus carapo* and *G. anguillaris* (syn.: *G. coropinae*), two often confused species of gymnotid fishes (Pisces, Cypriniformes). Beaufortia 15(203):161-167.
- Ortega-Lara, Armando & Pablo Lehmann A.** 2006. *Cruciglanis*, a new genus of Pseudopimelodid catfish (Ostariophysi: Siluriformes) with description of a new species from the Colombian Pacific coast. Neotrop. Ichthyol 4(2):147-156.
- Peña, Enrique J., Jaime R. Cantera y Carlos Orozco.** 2001. Relaciones tróficas en el estuario del río Dagua, Costa Pacífica Colombiana. IX Congreso Latinoamericano sobre ciencias del mar, San Andrés Islas, Colombia.
- Regan, C. Tate.** 1912. Descriptions of new cichlid fishes from South America in the British Museum. Ann. & Mag. N. Hist. Ser. 8, 9:505-507.
- \_\_\_\_\_. 1913. The fishes of the San Juan River, Colombia. Ann. & Mag. N. Hist., Ser. 8, 12:462-473.
- \_\_\_\_\_. 1914. Fishes from the Condoto river, Colombia, collected by Dr. H.G.F. Spurrell. Ann. & Mag. N. Hist. Ser. 8, 14:31-33.
- Rubio R., Efraín A.** 1988. Peces de importancia comercial para el Pacífico Colombiano. Centro de Publicación de la Facultad de Ciencias, Universidad del Valle, Cali.
- \_\_\_\_\_. 2007. Introducción a los peces marinos de Colombia y sus áreas adyacentes. Unidad de Artes Gráficas, Universidad del Valle, Cali.
- \_\_\_\_\_. 2008. Introducción a los peces dulceacuícolas de Colombia. Unidad de Artes Gráficas, Universidad del Valle, Cali.
- \_\_\_\_\_. & **Jorge A. Angulo S.** 2003. Peces coralinos del Pacífico Colombiano (incluye especies deportivas y comerciales). Unidad de Artes Gráficas, Universidad del Valle, Cali.
- Schultz, Leonard P.** 1944. The catfishes of Venezuela, with descriptions of thirty-eight new forms. Proc. U.S. Nat. Mus 94(3172):173-237.
- \_\_\_\_\_. 1944b. The fishes of the family Characinidae from Venezuela, with descriptions of seventeen new forms. Proc. U.S. Nat. Mus 95(3181):235-367.
- Severi, William & Adelinyr Azevedo de Maura C.** 1994. Catalogo de peixes da Bacia do Rio Iguacu. Curitiba IAP/GTZ, 128 pp.
- Swing, C. Kelly & John S. Ramsey.** 1989. A field key to fish families reported from South American fresh waters. Ocass. Pap. Mus. Nat. Hist (61):1-73.
- Vásquez Z., G. L., A. M. Navarrete, J. C. Ramírez L., J. R. Cantera K. y E. J. Peña S.** 2001. Estructura trófica de la ictiofauna predominante en el estuario del río Dagua, Bahía de Buenaventura, Departamento del Valle del Cauca. IX Congreso Latinoamericano sobre ciencias del mar, San Andrés Islas, Colombia.
- \_\_\_\_\_. **J. C. Ramírez L., I. C. Romero T., E. J. Peña S. y J. R. Cantera K.** 2001. Caracterización de la calidad de agua del estuario del río Dagua, Bahía de Buenaventura, Departamento del Valle del Cauca, Colombia. IX Congreso Latinoamericano sobre ciencias del mar, San Andrés Islas, Colombia.

Recibido: agosto 9 de 2010.

Aceptado para su publicación: febrero 28 de 2011.

# TRÁFICO DE MONOS NOCTURNOS *AOTUS* SPP. EN LA FRONTERA ENTRE COLOMBIA, PERÚ Y BRASIL: EFECTOS SOBRE SUS POBLACIONES SILVESTRES Y VIOLACIÓN DE LAS REGULACIONES INTERNACIONALES DE COMERCIO DE FAUNA ESTIPULADAS POR CITES

Ángela M. Maldonado Rodríguez<sup>1</sup> MSc. PhD.

## Resumen

**Maldonado Rodríguez, A. M.:** Tráfico de monos nocturnos *Aotus* spp. en la frontera entre Colombia, Perú y Brasil: efectos sobre sus poblaciones silvestres y violación de las regulaciones internacionales de comercio de fauna estipuladas por CITES. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (135): 225-242, 2011. ISSN 0370-3908.

Este estudio reporta altos niveles de tráfico de monos nocturnos (*Aotus nancymae*, *A. vociferans* y *A. nigriceps*) en el área tri-fronteriza Brasil–Colombia–Perú para el mercado de investigación biomédica en malaria. Entrevistas con 43 colectores/traficantes de los 3 países confirmaron que en 2007–2008, cerca de 4000 monos fueron traficados. Censos en 8 localidades en Perú y Colombia arrojaron estimativos contrastantes de densidades poblacionales de *Aotus* (Perú: 3,6 ind/km<sup>2</sup>; Colombia: 44 ind/km<sup>2</sup>). Es crítico que las regulaciones de CITES sean aplicadas en los 3 países para contrarrestar el descenso de las poblaciones silvestres y la degradación de sus hábitats.

**Palabras clave:** Amazonia, CITES, investigación biomédica, conservación de primates.

## Abstract

This study describes significant levels of trade of night monkeys (*Aotus nancymae*, *A. vociferans* and *A. nigriceps*) at the Brazil–Colombia–Peru tri-border area for the malaria biomedical research market. Interviews with 43 traders/collectors from the three countries suggest that for the period 2007–2008, around 4000 night monkeys were traded. Census at 8 localities in Peru and Colombia reported contrasting population density estimates for *Aotus* (Peru: 3,6 ind/km<sup>2</sup>; Colombia: 44 ind/km<sup>2</sup>). It is critical for CITES regulations to be enforced at the 3 countries in order to curb the decline of wild populations of *Aotus* and the degradation of their habitat.

**Key words:** Amazonia, CITES, biomedical research, Primate conservation.

<sup>1</sup> Department of Anthropology and Geography, Oxford Brookes University, Gypsy Lane, Oxford OX3 0BP, Inglaterra. Correo electrónico: amaldonado@oxfordbrookes.net llugens@gmail.com

## Introducción

El presente estudio proporciona una visión general del tráfico de monos nocturnos, *Aotus* spp., capturados vivos en el área tri-fronteriza de Brasil – Colombia – Perú, para suplir el mercado local de la investigación biomédica en malaria en Leticia, Colombia. Este trabajo proporciona información de línea base sobre el estado actual de conservación de *Aotus* spp., y presenta información sobre los volúmenes de monos nocturnos traficados, estimaciones de sus poblaciones en la frontera entre Colombia y Perú y una revisión legislativa de los permisos de caza científica otorgados por la autoridad ambiental regional colombiana, la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonía “Corpoamazonia”. Se concluye proporcionando recomendaciones sobre cómo enfrentar el tráfico ilegal del género *Aotus* en esta región y cómo esclarecer su distribución geográfica. Finalmente se sugiere que se evalúe la categoría IUCN y CITES de la especie *A. nancymae*, la cual ha sido objeto de la explotación continua para la investigación biomédica en el área de estudio, y de liberaciones post-experimentación en territorio colombiano.

## Historia del tráfico de primates en los neotrópicos

Durante finales de la década de los años sesenta y principios de los años setenta, la cuenca del Amazonas fue la principal fuente de extracción de primates neotropicales silvestres para exportación hacia los mercados extranjeros (Mittermeier *et al.*, 1994). Entre 1961 y 1975, Perú legalmente exportó 392.396 primates (Neville, 1975, 1977; Smith, 1978) mientras que Colombia exportó 52.848 primates entre 1972 y 1975 (Smith, 1978). Un tercio de la exportación total de primates fue movilizada desde Leticia, Amazonas (Cooper & Hernández, 1975). Durante principios de la década de 1970, Colombia y Perú, junto con India, fueron los principales países exportadores, suministrando el 65% del total del mercado internacional de primates para investigaciones biomédicas (Held & Wofle, 1994). En India, donde aproximadamente 20.000 monos juveniles fueron exportados cada año, las poblaciones silvestres de monos rhesus (*Macaca mulatta*) fueron drásticamente diezgadas debido a la demanda de esta especie para la investigación biomédica y el mercado farmacéutico (Southwick & Siddiqui, 2001). En los tres países, la explotación continua de primates fue llevada a cabo con una consideración mínima del estado de las poblaciones y su distribución, datos que son requeridos para cuantificar las cuotas de extracción (Bailey *et al.*, 1974). Las alarmantes cifras oficiales de exportación de Perú y Colombia, las cuales son posiblemente subestimadas, causaron un debate internacional que resultó en el establecimiento de las vedas na-

cionales sobre la exportación de primates en 1973 y 1974, respectivamente (Held & Wofle 1994).

En 1973, la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) entró en vigencia. Esta convención es un acuerdo internacional entre los gobiernos cuyo objetivo es asegurar que el comercio internacional de animales y plantas silvestres no amenace su supervivencia. De los países amazónicos, Brasil y Perú fueron los primeros en incorporarse a CITES en 1975, y en Colombia, CITES entró en rigor en agosto de 1981. En un intento por recoger información de línea base sobre las poblaciones silvestres que permitiera una explotación sustentable, las organizaciones biomédicas como la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y el Instituto Nacional de Salud de los Estados Unidos (NIH), financiaron el trabajo de campo de censos en el neotrópico (Aquino & Encarnación, 1994b). Estos estudios generaron estimaciones de la densidad de primates en unos pocos lugares a lo largo de las regiones amazónicas de Perú, Colombia y Bolivia (Freese, 1975; Heltne *et al.*, 1975; Muckenhirn *et al.*, 1975; Neville, 1975; Castro, 1978). Se esperaba que estos datos fueran suficientes para convencer a los gobiernos de que la mayoría de las especies usadas en las investigaciones biomédicas (monos ardilla *Saimiri* spp., monos nocturnos *Aotus* spp., monos tamarinos *Saguinus* spp., monos titís *Callithrix jacchus* y los monos maiceros *Cebus apella*) eran lo suficientemente comunes para permitir la extracción sin comprometer la estabilidad de las poblaciones silvestres (Smith, 1977, Mittermeier *et al.*, 1994). Simultáneamente, con el fin de reducir la captura de animales silvestres, la OPS, el gobierno peruano y la Universidad Mayor de San Marcos, crearon en 1975 el Centro de Reproducción y Conservación de Primates en cautiverio en Iquitos, Perú (Aquino & Encarnación, 1994b). Sin embargo, los altos costos relacionados con la reproducción en cautiverio, debido a largas cuarentenas y periodos de aclimatación, entrenamiento del personal, y los estrictos requerimientos de transporte e importación, han contribuido a una continua demanda de captura de animales silvestres (Mittermeier, 1991; Held & Wofle, 1994).

## Distribución de *Aotus vociferans* y *A. nancymae*

El género *Aotus* está ampliamente distribuido a través de Centro y Sur América (Hernández-Camacho & Cooper, 1976; Hershkovitz, 1983; Defler *et al.*, 2001). Este género utiliza una gran variedad de hábitats tales como bosques primarios y secundarios, alcanzando los 3200 metros sobre el nivel del mar, y habitando también bosques secos que reciben tan solo 500 mm de lluvia por año en el extremo sur de su distribución, en el gran Chaco sudamericano (Defler, 2003; Fernández-Duque, 2007). Su estado taxonómico ha sido materia de dis-

putas académicas debido a un amplio número de cariotipos diferentes reportados entre las variaciones intra e inter poblacionales (Ruiz-Herrera *et al.*, 2005; Defler & Bueno, 2007). Desde Hershkovitz (1983) el género *Aotus* también ha carecido de revisiones morfológicas que ayuden a comprender las relaciones existentes entre las poblaciones (Defler, 2010). El género está dividido en dos grupos: el grupo de las especies de cuello rojizo, distribuidos al sur del río Amazonas-Solimões, y el grupo de especies de cuello gris, encontrado principalmente al norte del río Amazonas (Hershkovitz, 1983; Hernández-Camacho & Defler, 1989). Por ejemplo Ruiz-García *et al.*, (en prensa) reportan que *A. nancymaae*, especie del grupo de cuello rojizo, está más relacionado genéticamente con algunas especies del grupo de cuello gris, como *A. vociferans*, *A. brumbacki* y *A. griseimembra*, que a especies de su mismo grupo.

Se enfatizará en las dos especies que son objeto de investigaciones biomédicas, el mono nocturno amazónico *Aotus vociferans* y el mono nocturno de Nancy Ma, *A. nancymaae*. No obstante es necesario mencionar que los colectores brasileiros entrevistados, reportaron también la captura del mono nocturno de cabeza negra *A. nigriceps*. *Aotus vociferans* se encuentra en Colombia, Ecuador, Perú y Brasil, siendo su barrera geográfica el occidente de la cordillera de los Andes, al sur el río Amazonas-Solimões, al norte el río Guaviare en Colombia, y su límite de distribución al oriente es probablemente el río Negro en Brasil (Hernández-Camacho & Cooper, 1976; Aquino & Encarnación, 1988, 1994b; Defler 2004; Groves, 2005). *A. nancymaae* se extiende en Perú desde el departamento de Loreto, hasta el río Jandiatuba en Brasil, sur del río Amazonas-Solimões. Su límite de distribución al sur llega hasta las cabeceras del río Jutai. En Perú su límite norte es el río Marañón, alcanzando el enclave entre los ríos Tigre y Pastaza, (Aquino & Encarnación, 1988, 1994b; Groves, 2005; Cornejo & Palacios, 2008). *A. nigriceps* se encuentra en Brasil, Perú y Bolivia. Habita en Brasil al sur del río Amazonas-Solimões, al occidente de los ríos Tapajós y Juruena. En Perú se extiende a lo largo de la Amazonía sur-oriental y central, y en Bolivia se encuentra hasta el norte del río Madre de Dios en el departamento de Pando (Aquino & Encarnación, 1994b; Groves, 2005; Cornejo & Palacios, 2008). Mientras *A. nancymaae* y *A. nigriceps* han sido registrados en Brasil y Perú, *A. vociferans* ha sido registrado sólo en Colombia. No obstante, a principios de los años 80, J. Hernández-Camacho y P. Hershkovitz observaron ambas especies, *A. nancy-*

*maae* y *A. nigriceps* en el laboratorio de la Fundación Instituto de Inmunología de Colombia (FIDIC) en Leticia (Defler, 1994; 2004; 2010).

#### Densidad poblacional y estatus de *Aotus vociferans* y *A. nancymaae*

Ya que no existen datos actualizados de las densidades de estas dos especies, se hará referencia a las densidades reportadas por Aquino & Encarnación (1988) en Perú. Las densidades reportadas para *A. nancymaae* en tierras bajas inundables (várzea o bajeal) fueron de 46.3 ind/km<sup>2</sup>, y de 24.2 ind/km<sup>2</sup> en tierras altas o *terra firme*, mientras las densidades de *A. vociferans* en bajeal fueron calculadas en 33 ind/km<sup>2</sup>, y 7.9 ind/km<sup>2</sup> en *terra firme*. Las dos especies de monos nocturnos están incluidas en CITES Apéndice II. En los tres países discutidos en este estudio, la legislación nacional respecto a la explotación comercial de fauna listada en los Apéndices de CITES es explícita. Por ejemplo, en Colombia, el Artículo IV de la Ley 17 del 22 de enero de 1981<sup>1</sup> declara que la explotación comercial de la vida silvestre incluida en el Apéndice II de CITES requiere de un permiso de exportación/importación otorgado por una autoridad administrativa y científica, en este caso, el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y el Instituto Alexander von Humboldt. En el caso de Brasil, en la Sección II del Decreto No. 3.607 del 21 de septiembre de 2000<sup>2</sup>, se declara que para la exportación/importación de fauna, es necesario obtener una licencia aprobada por la Autoridad CITES, el Instituto Brasileiro del Medio Ambiente y Recursos Naturales Renovables (IBAMA). Así mismo, en Perú, la Ley No.27308 del 16 de julio de 2000 declara que el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA), actualmente Ministerio de Agricultura del Perú, es la entidad a cargo de emitir los permisos para importar/exportar fauna (INRENA, 2003). *Aotus nancymaae* y *A. vociferans* son considerados por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) como "Preocupación Menor" parcialmente debido a su amplia distribución (Cornejo & Palacios, 2008; Morales-Jiménez *et al.*, 2008). Mientras que la IUCN no sugiere mayores amenazas para estas especies, los datos asociados a esta conjetura son escasos, ya que se han realizado pocos trabajos de campo en áreas donde la presión humana es cada vez mayor, incluyendo el área tri-fronteriza. La IUCN recientemente ha recomendado el monitoreo de la extracción, legal o de otro tipo, de *A. vociferans* y *A. nancymaae* con el fin de entender sus efectos sobre las poblaciones (Cornejo & Palacios, 2008).

1 Artículo IV de la Ley 17 del 22 de enero de 1981: [www.siac.net.co/cites/citesContenidoDetalle.jsp?codigo=6&](http://www.siac.net.co/cites/citesContenidoDetalle.jsp?codigo=6&)

2 Sección II del Decreto No. 3.607 del 21 de septiembre de 2000: [www.ibama.gov.br/fauna-silvestre/areas-tematicas/exp-imp-cites/](http://www.ibama.gov.br/fauna-silvestre/areas-tematicas/exp-imp-cites/)



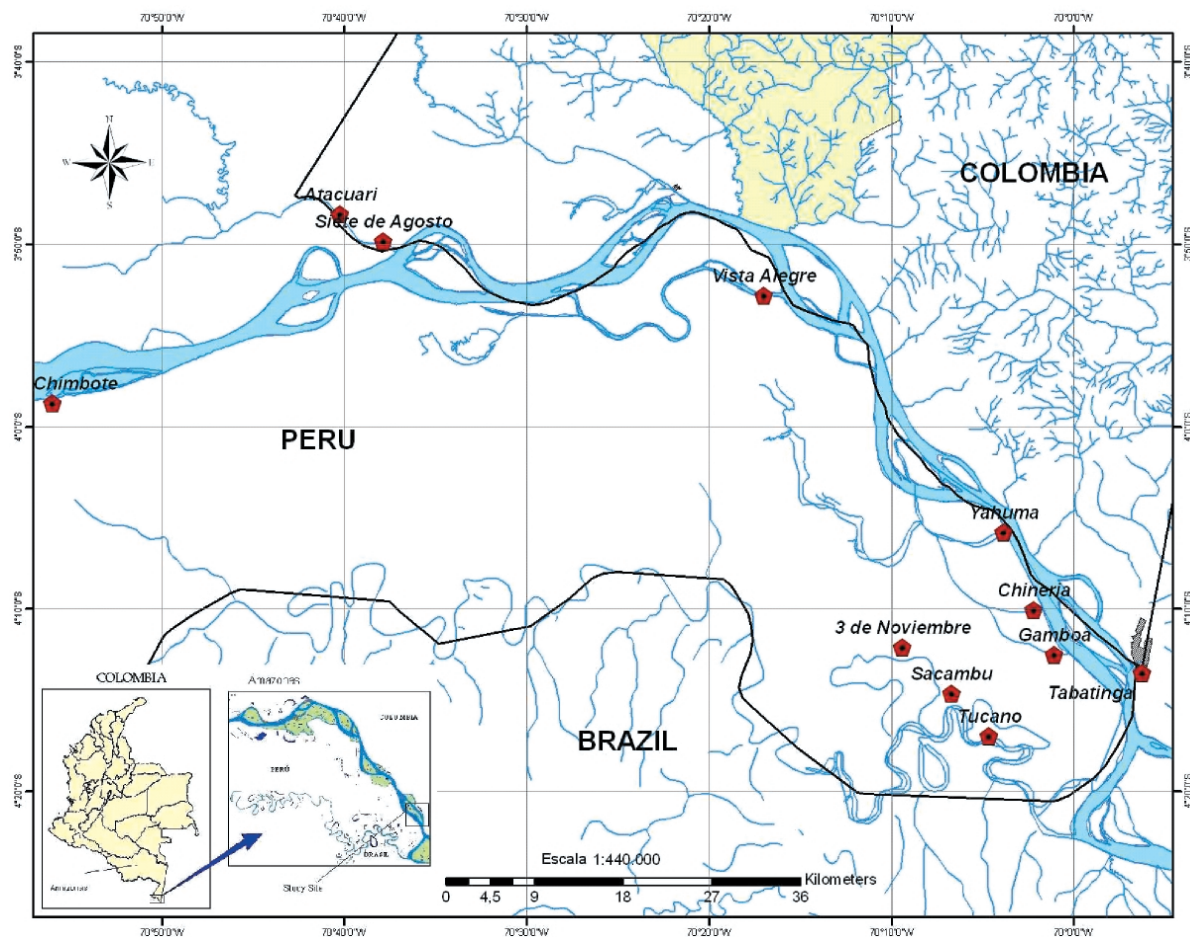
## Métodos

### Tráfico de *Aotus* spp.

Niveles reportados de tráfico internacional: Los datos sobre tráfico internacional en monos nocturnos de Brasil, Colombia y Perú según lo reportado por CITES, fueron obtenidos de la base de datos de CITES del Centro Mundial de Monitoreo de Conservación (WCMC)<sup>3</sup>. El presente estudio se enfocó en el tráfico de individuos silvestres capturados, por lo tanto todos los animales que estaban en la lista como reproducidos en cautiverio o criados, fueron excluidos. Los datos disponibles corresponden al periodo desde 1975 a 2006, con alguna información extra para el 2007 (no todas las partes habían enviado sus reportes en el momento del análisis); los datos desde 2008 hasta 2010 no estaban disponibles aún.

### Diagnóstico del tráfico en el área de la tri-frontera

A través de una combinación de trabajo de campo y entrevistas, se diagnosticó el tráfico ilegal de monos nocturnos en el área del borde entre Brasil – Colombia – Perú, concentrado principalmente a lo largo de las riberas sur y norte del río Amazonas, desde Chinería, Perú ( $4^{\circ}10.121' S$ ,  $70^{\circ}02.607' O$ ) hasta San Juan de Atacuari, Colombia ( $3^{\circ}48.35' S$ ,  $70^{\circ}40.20' O$ ). El trabajo de campo incluyó geo-referenciar los sitios de colecta y liberación de monos nocturnos, observación de animales capturados para el comercio y registro fotográfico de los animales y sus condiciones en cautiverio. Se seleccionaron las comunidades que han capturado monos nocturnos regularmente. En dichas comunidades existen equipos permanentes para ésta actividad, aunque no son cazadores de tiempo completo y reciben ingresos adicionales por la pesca y la agricultura. Para Perú



**Figura 1.** Localización de las 10 comunidades indígenas visitadas en Colombia y Perú y la población de Tabatinga (Brasil) donde se entrevistaron 43 colectores activos de monos nocturnos.

3 WCMC: [www.unep-wcmc.org/citestrade](http://www.unep-wcmc.org/citestrade).

y Colombia, el estudio incluyó todas las comunidades con más de 4 grupos de colectores, sin embargo debido a las estrictas regulaciones para el contacto con comunidades indígenas en Brasil, las cuales sólo pueden ser contactadas en compañía de la FUNAI (Fundación Nacional del Indígena), visitamos Tabatinga, el asentamiento brasilero más grande en el área con una población de aproximadamente 50.000 habitantes en su mayoría “caboclos”. El objetivo fue entrevistar a un tercio de los colectores y traficantes en cada una de las comunidades seleccionadas (Figura 1).

En términos generales el líder de un grupo de colectores es quien vende los animales. En el Perú el oficio de colector y traficante es el mismo en muchos casos ya que ésta persona es quien vende los monos directamente al laboratorio, conociendo la ilegalidad de esta actividad. El intermediario generalmente también colecta, y además compra los animales y los paga al 50% del valor pagado por el laboratorio. Si este es colombiano, tiene un salvoconduto de colecta otorgado por Corpoamazonia. Esto lo pudimos confirmar con un informe presentado por el laboratorio a Corpoamazonia, donde los intermediarios colombianos están en la lista oficial de colectores (FIDIC, 2007).

Las entrevistas fueron registradas desde el 28 de mayo hasta el 10 de julio del 2008. El equipo de investigación estuvo compuesto por una veterinaria de vida silvestre especializada en primates, un sociólogo y un investigador indígena Tikuna. Algunas visitas fueron acompañadas por un ex-colector brasilero que también era conocido en las comunidades peruanas y quien actuó como intérprete en las entrevistas con los informantes brasileros. Debido a que el interés de esta investigación se enfocó en el tráfico de monos nocturnos, especificamos esto antes de iniciar las entrevistas. Cuando se llegaba a cada comunidad, el equipo visitaba a la autoridad indígena (el “Curaca” en Colombia y el “Teniente Gobernador”, antes “Intendente Municipal”, en Perú), con el fin de obtener el consentimiento para contactar a los colectores y traficantes. Se les informó a los entrevistados -quienes participaron voluntariamente-, que se podían retirar de la entrevista en el momento que lo desearán, sin necesidad de ofrecer alguna explicación. Se les pidió permiso a los informantes para registrar las entrevistas en video o voz y/o obtener registros fotográficos (Maldonado *et al.*, 2009).

Algunas de las comunidades fueron visitadas es mas de una ocasión con el fin de entrevistar informantes claves, tales como colectores activos y traficantes, quienes estaban ausentes durante la primera visita. El cuestionario de la entrevista fue diseñado para registrar información sobre (1) el número de monos nocturnos colectados durante el año anterior por cada persona, incluyendo la des-

cripción fenotípica de los animales; (2) el precio y fecha de la última venta; (3) perfil del comprador y la naturaleza de la transacción económica; (4) las técnicas de captura; (5) sitios de captura; (6) número de años que el informante lleva capturando monos nocturnos; (7) el nivel de satisfacción respecto al esfuerzo de captura y el pago, (8) precio por animal; y (9) el interés en participar en un proyecto de conservación de monos nocturnos; (10) caracterización del oficio de colector y traficante.

## Censos de *Aotus* spp.

### Sitios de estudio

Con el fin de obtener información de línea base sobre las poblaciones silvestres de *Aotus* spp. en el área de estudio, se realizaron censos en sitios expuestos a diferentes grados de presión de caza y bajo diferentes niveles de protección. Los sitios estuvieron ubicados geográficamente así, Perú: tres comunidades indígenas. Colombia: dos comunidades indígenas traslapando el Parque Nacional Natural Amacayacu, dos reservas privadas y una reserva forestal de la nación (Figura 2).

**Perú:** Se escogieron tres comunidades indígenas peruanas donde los entrevistados manifestaron su deseo de participar en un proyecto de conservación de monos nocturnos, y donde el tráfico reportado fue alto. Una vez recibido el aval de las comunidades, se solicitó un permiso de investigación y colecta al Ministerio de Agricultura de Perú, el cual se obtuvo para el año 2009-2010 (Resolución Directoral No. 428-2009-AG-DGFFS- DGFFS). Los sitios de estudio seleccionados fueron: comunidades de Chinería, Yahuma y Vista Alegre (Tabla 1).

Chinería y Yahuma– distrito Yavarí, ubicadas a 12 y 24 km (en línea recta) respectivamente de Leticia, la capital del departamento del Amazonas, Colombia, donde se encuentra ubicado el laboratorio que realiza las compra de *Aotus* en el área. Chinería tiene una población aproximada de 260 habitantes y Yahuma de 230. En ambas comunidades los pobladores son en su mayoría Tikunas peruanos, unos pocos brasileros y colonos provenientes del interior de Perú. Sus economías se basan en la venta de frutas, verduras y madera para leña. Estos productos son comercializados en Leticia y Tabatinga. Existen cultivos de coca destinados al procesamiento de cocaína en las cercanías de Yahuma.

Vista Alegre – distrito Caballococha, comunidad localizada a aproximadamente 54 km de Leticia (en línea recta), tiene una población aproximada de 330 habitantes, en su mayoría colonos y con una minoría Tikuna. Vista Alegre es uno de los principales productores de palma de moriche o

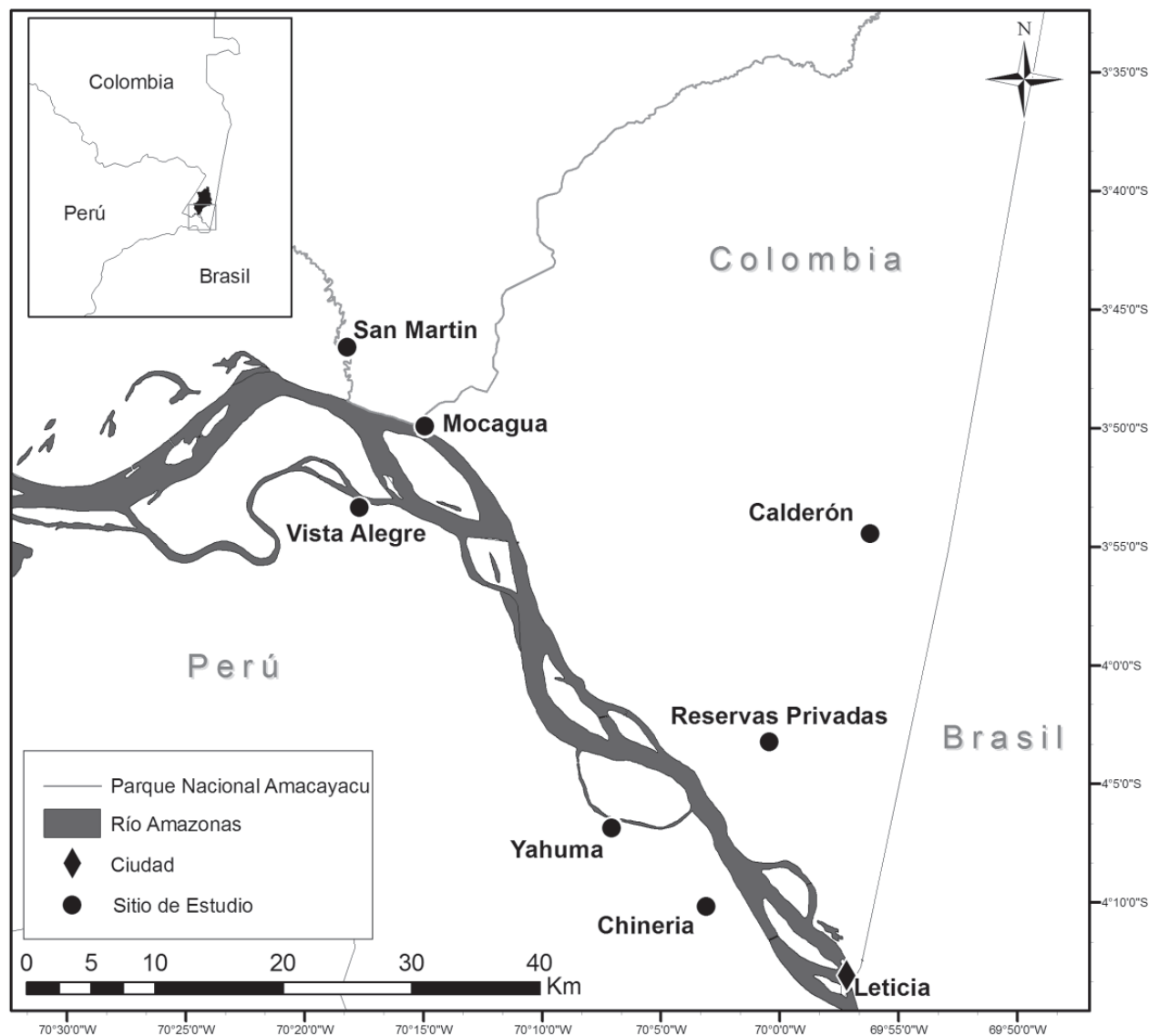


Figura 2. Localización de los sitios de estudio donde se han llevado a cabo los censos de *Aotus* spp. en la frontera amazónica entre Colombia y Perú.

Tabla 1. Características de los sitios de estudio en Colombia y Perú.

Sitio de estudio (coordenadas)	Categoría de protección	Tipo de bosque	Altitud (m)
Chinería – Perú S4° 10.121' W70° 02.607'	Ninguna- comunidad indígena	Inundable - bajeal	73
Yahuma – Perú S4°05.993' W70°07.594'	Ninguna- comunidad indígena	Inundable - bajeal	75
Vista Alegre – Perú S3° 52.816' W70° 17.420'	Ninguna - comunidad indígena	Inundable - bajeal	78
Calderón – Colombia S3°54.459' W69°56.208'	Reserva Forestal de la Nación	<i>Terra firme</i> - altura	87
Otra Parte – Colombia S4°02.713' W70°00.236'	Reserva Privada	<i>Terra firme</i> - altura	119
Cerca Viva – Colombia S4°07.339' W69°56.832'	Reserva Privada	<i>Terra firme</i> - altura	94
Mocagua – Colombia S3°49.402' W70°15.196'	Área Traslape <sup>1</sup>	Inundable - bajeal	49
San Martín – Colombia S3°47.101' W70°18.067'	Área Traslape <sup>1</sup>	Inundable - bajeal	72

1 Área de Traslape: Resguardo indígena y Parque Nacional Natural Amacayacu (PNNA).

aguaje (*Mauritia flexuosa*) en la región, el cual es comercializado en Leticia. Chinería y Vista Alegre se encuentran ubicadas sobre el margen sur del río Amazonas y Yahuma está localizada sobre la quebrada Yahuma la cual desemboca en el río Amazonas. En las tres comunidades el paisaje se caracteriza por zonas inundables estacionalmente (várzea) y la marcada presencia de palmas como el asaí (*Euterpe precatoria*) y aguaje (*Mauritia flexuosa*). Se evidencia una severa alteración del bosque por la extracción selectiva de especies maderables, las plantaciones de coca (Yahuma) y por la deforestación asociada con la captura de los micos nocturnos, como se explicará más adelante en los métodos de captura. El territorio donde se encuentran asentadas las comunidades peruanas no tiene ningún nivel de protección legal, es decir no existen áreas de conservación.

**Colombia:** Parque Nacional Natural Amacayacu (PNNA) – Colombia (permiso No. DTAO059 otorgado por la UAESPNN): los censos se realizaron en áreas de traslape entre el PNNA y las comunidades Tikunas de Mocagua y San Martín de Amacayacu donde la cacería de subsistencia es permitida únicamente para los pobladores indígenas (para ver una descripción detallada referirse a **Maldonado, 2010**). Mocagua está localizado sobre el margen norte del río Amazonas y San Martín está ubicado sobre el río Amacayacu, el cual desemboca en el río Amazonas. En ambas comunidades los censos se llevaron a cabo en bosque de baja, inundable estacionalmente ya sea por el río Amazonas o por el río Amacayacu. En San Martín hubo extracción de *Aotus* spp. para investigación biomédica durante los años 80 (com. pers. V. Angel), mientras que en Mocagua no se ha realizado extracción de *Aotus* para investigación biomédica, únicamente para el consumo local (Tabla 1).

Reservas privadas y cuenca del río Calderón: La reserva Cerca Viva está localizada a 11 km de Leticia y tiene un área de 29 hectáreas de bosque secundario en estado avanzado de recuperación, con especies predominantes como el platanillo gigante (*Phenakospermum guyanense*), yarumo (*Cecropia scyadophylla*), castaño (*Scleronema micranthum*) y siringa (*Hevea* sp.). La reserva Otra Parte se encuentra a 23 km de Leticia y tiene un área de 18 hectáreas de bosque maduro con un grado de intervención media, con presencia de árboles maderables tales como palosangre (*Brosimum rubescens*), acapú (*Minuartia guianensis*), abarco (*Cariniana decandra*) y quinilla (*Manilkara bidentata*). Ambas reservas presentan árboles emergentes de hasta 30 metros de altura. El campamento Palosangre está ubicado en la cuenca del río Calderón, reserva forestal de la nación, ubicado a aproximadamente 42 km de Leticia. El censo en esta área se llevó a cabo bajo el permiso No. 06-91-001-X-009-062-08 del 10 de octubre

de 2008 otorgado por Corpoamazonia. En las reservas privadas no hay impacto de cacería, no obstante los habitantes locales cazan alrededor de las reservas y esporádicamente se han registrado eventos de caza ilegal dentro de las mismas. La Figura 2 muestra la ubicación de los sitios donde se realizaron los censos (Tabla 1).

A pesar de que la cuenca del Calderón está protegida bajo la Ley 2 de 1959, declarada como reserva forestal de la nación, existe una población de aproximadamente 130 habitantes asentados en un área de 940 hectáreas (**Tamayo et al., 2005**). En el campamento Palosangre hay una baja presión de cacería llevada a cabo por colonos e indígenas que visitan esta zona. El bosque de tierra firme en el área se encuentra dominado por alcanfor (*Monopterix uauacu*), mata-matá (*Eschweilera* spp.) y palma de caraná (*Lepidocaryum tenue*).

### Estimación de los niveles de cacería de *Aotus* spp.

Debido a la falta de información histórica sobre los niveles de caza de *Aotus* spp. en las comunidades peruanas y en la reserva forestal de la nación (RFN) se dificultó determinar los niveles de cacería. Así que para las comunidades peruanas el nivel de cacería se basó en el número de animales capturados reportados y observados durante las entrevistas con los colectores y traficantes para el periodo 2007-2008. Para las comunidades indígenas colombianas, la extracción fue cuantificada para el periodo mayo 2008 – octubre 2009, como parte de una investigación participativa para determinar el efecto de la cacería Tikuna sobre las poblaciones de grandes vertebrados nocturnos. En las reservas privadas no se registró caza de monos nocturnos durante el periodo de estudio (mayo - noviembre 2010) ni anterior a éste. Los únicos registros de caza que existen en las reservas privadas han sido de grandes roedores (com. pers. **O. Tamayo & A. Barona**). Los colonos residentes en la RFN no reportaron la caza de *Aotus* spp. pues no están vinculados a la comercialización de monos nocturnos y tampoco los consumen ya que tradicionalmente no hacen parte de su dieta. Entonces, los rangos de caza aunque han sido determinados de una forma arbitraria fueron clasificados así: 1 = menor rango de presión de caza; 2 = medio; 3 = alto. Esta clasificación está basada en una distribución equitativa usando el mínimo y el máximo número de animales capturados en los sitios de estudio (Tabla 2). Los periodos de estudio se encuentran detallados en la Tabla 6.

### Censos por transecto

Siguiendo los protocolos estandarizados de censos de **Buckland et al., (2001)** y **Peres (1999b)**, y siguiendo las cinco premisas sugeridas por **Buckland et al., (2010)** para censar primates, se realizaron transectos lineales.

**Tabla 2.** Extracción de *Aotus* spp. y rangos de cacería de los sitios de estudio en Perú y Colombia

Sitio de estudio	Extracción estimada (ind.)	Rango de presión de cacería <sup>1</sup>	Distancia al asentamiento más cercano (km)
Chinería – Perú	700	3	1,0
Yahuma – Perú	480	3	1,5
Vista Alegre – Perú	550	3	1,0
Calderón – Colombia	0?	1	3,6
Otra Parte – Colombia	0	1	4,0
Cerca Viva – Colombia	0	1	0,5
Mocagua – Colombia	10	1	1,5
San Martín – Colombia	12	1	1,2

Rango de presión de cacería: 1 = bajo = 0 a 233 individuos extraídos. Rango 2: medio = 234 a 466 individuos extraídos. Rango 3 = Alto = más de 466 individuos extraídos.

Los datos registrados fueron: condiciones climáticas, fecha, hora, especie, tamaño del grupo, distancia perpendicular (DP) al primer animal observado, o al centro del grupo cuando fue posible medir la DP, altura a la que se encontró el grupo de animales, fase lunar y visibilidad de la luna. Información adicional como la composición del grupo, actividad (movimiento, alimentación, descanso, comportamiento social), dieta y asociación con otras especies fue registrada cuando fue posible. La velocidad de los censos fue 1.0 km/h y los observadores pararon cada 100 m para escuchar y mirar alrededor (Buckland *et al.*, 2001; Marshall *et al.*, 2008; Peres 1999b). Los censos nocturnos se llevaron a cabo de 18:00 – 21:00 y entre 3:00 – 6:00 horas siguiendo la metodología de Aquino y Encarnación (1994b). Para ver una descripción detallada de los métodos teniendo en cuenta el contexto de investigación participativa referirse a Maldonado (2010).

## Análisis de datos

### Estimativos de las densidades poblacionales

A partir de los datos obtenidos durante los transectos, solo las detecciones visuales fueron incluidas en los estimativos de densidad. Los datos fueron analizados con el programa DISTANCE 6.0, usando los modelos mitad-normal y uniforme con ajustes al coseno (Buckland *et al.*, 2001, 2010; Thomas *et al.*, 2010). En el caso de las comunidades peruanas, los datos fueron agrupados debido al reducido número de observaciones de *Aotus* spp. (Chinería = 17; Vista Alegre = 15; Yahuma = 2). Igualmente los datos de la cuenca del Calderón y las reservas fueron agrupados (Calderón = 40; Reservas Privadas = 21). La agrupación se realizó teniendo en cuenta la homogeneidad de los sitios de estudio en aspectos como estructura del bosque, suelo y presión de cacería. Con el fin de aumentar la confiabilidad de los estimativos, las distancias perpendiculares fueron

truncadas para evitar puntos externos. El truncamiento se basó en los valores del Criterio de Información de Akaike (AIC) y la curva que mejor se ajustó.

### Análisis de permisos otorgados por CORPOAMAZONIA

Con el fin de estudiar la legalidad de los permisos obtenidos por la Fundación Instituto de Inmunología de Colombia (FIDIC) sede Leticia, el único laboratorio adelantando investigación biomédica en malaria y con permisos legales para la adquisición de *Aotus vociferans* en el área de estudio, se solicitó una copia del expediente a la Procuraduría para Asuntos Ambientales y Agrarios. Dicho expediente contiene las resoluciones, informes y demás documentos legales referentes a los permisos de caza científica otorgados al laboratorio desde el 18 de marzo de 1999 hasta el 15 de febrero de 2008.

## Resultados

### Tráfico Internacional reportado

El tráfico internacional de monos nocturnos capturados en vida silvestre de Brasil, Colombia y Perú es reportado para *Aotus trivirgatus*, *A. nancymae* y *A. vociferans* (Tabla 3). El tráfico internacional de *A. trivirgatus* es registrado para el periodo de 1981-1984 cuando solo un promedio de 250 individuos silvestres capturados fueron exportados por año. Aquí, es importante anotar que antes de la evaluación del género *Aotus* de Hershkovitz (1983), todas las especies de monos nocturnos fueron incluidas bajo *A. trivirgatus*. Por lo tanto, es probable que las figuras presentadas en la Tabla 3 para *A. trivirgatus* en Perú correspondan a *A. nancymae* o *A. nigriceps*, ya que *A. trivirgatus* no se encuentra en ese país. En este estudio, solo se reporta el tráfico internacional en *A. nancymae* y *A. vociferans* desde 1994 en adelante, cuando los promedios respectivos de 75 y 25 individuos fueron exportados por año.

**Tabla 3.** Números de monos nocturnos capturados vivos, listados como exportados u originarios de Brasil, Colombia o Perú en la base de datos del Centro de Monitoreo de la Conservación (WCMC) de CITES (WCMC, 2010). Los animales o especímenes listados como reproducidos en cautiverio o criados son excluidos. (códigos fuente C, R o F).

País (accedió a CITES)	Especie	Números exportados	Periodo
Brasil (1975)	<i>Aotus trivirgatus</i>	2	1981-1987
Colombia (1981)	<i>Aotus trivirgatus</i>	1446	1981-1989
	<i>Aotus lemurinus</i>	1	1999
Perú (1975)	<i>Aotus trivirgatus</i>	1843	1981-1994
	<i>Aotus nancymae</i>	1059	1994-2007
	<i>Aotus vociferans</i>	265	1994-2004
	<i>Aotus</i> spp.	30	1981-1994

### Tráfico en el área fronteriza entre Brasil, Colombia y Perú

Se estableció que el número total de comunidades colectando monos nocturnos para investigaciones biomédicas en el área de estudio es de 28 (8 en Brasil, 5 en Colombia y 15 en Perú), involucrando un número estimado de 185 traficantes/colectores activos. Las entrevistas fueron conducidas en 11 de estas comunidades, que comprenden los grupos indígenas Tikuna, Yagua y Cocama y una minoría de “caboclos” o comunidades mezcladas de

Brasil (Maldonado *et al.*, 2009). En total fueron entrevistados 43 de 139 traficantes y colectores activos en las 11 comunidades. Dichas comunidades reportaron un tráfico extenso de monos nocturnos, con capturas anuales que oscilan entre 144 y 720 individuos por comunidad, alcanzando un total de aproximadamente 4000 individuos para el periodo 2007-2008 (Tabla 4).

En promedio, cada comunidad ha capturado monos nocturnos durante aproximadamente 12 años, con 6 comunidades activas en el 2008. Respecto a la composición de

**Tabla 4.** Resumen general del tráfico en monos nocturnos *Aotus* spp. en el área tri-fronteriza de Brasil – Colombia – Perú para el periodo 2007-2008

Comunidad	Traficantes/ Colectores (N)	Entrevistas (N)	Extracción anual (individuos)	Periodo (año)	Especies	Fecha de la última venta	Precio por individuo (USD)
<b>Colombia</b>							
Atacuari	11	4	276	3	<i>A. nancymae</i> , <i>A. vociferans</i>	Jun 2008	16 <sup>a</sup>
Siete de Agosto	15	3	720	7	<i>A. nancymae</i> , <i>A. vociferans</i>	May 2008	16 <sup>a</sup>
<b>Brasil</b>							
Tabatinga	6	2	222	18	<i>A. nancymae</i> , <i>A. vociferans</i> , <i>A. nigriceps</i> (?)	Dic 2007	23
<b>Perú</b>							
Vista Alegre	20	8	320 230	17	<i>A. nancymae</i> <i>A. nancymae</i> , <i>A. vociferans</i>	Dic 2007 Feb 2008	23 16 <sup>a</sup>
Chinería	20	7	700	16	<i>A. nancymae</i>	Dic 2007	23
Yahuma	19	5	480	15	<i>A. nancymae</i>		
Sacambú	13	4	270	13	<i>A. nancymae</i>	Feb 2007	23
Tucano	6	3	144	16	<i>A. nancymae</i>	Ene 2007	23
Gamboa	11	2	180	9	<i>A. nancymae</i> , <i>A. nigriceps</i> (?)	Abr 2008	33
Tres de Noviembre	6	2	192	7	<i>A. nancymae</i>	Dic 2007	23
Chimbote	12	3	225	13	<i>A. nancymae</i>	Feb 2008	23
Total 139	43	3959					

<sup>a</sup> Precio por individuo vendido al intermediario colombiano; tasa de cambio: 1 dólar = 2.150 pesos colombianos.

las especies, los informantes describieron diferencias fenotípicas marcadas entre *A. nancymaae* y *A. vociferans*, pero fue más difícil confirmar las diferencias entre *A. nancymaae* y *A. nigriceps*. Los colectores brasileños dieron descripciones detalladas de dos especies de monos diferentes, basados en la coloración del pelaje, los sitios de dormitorio donde los animales son capturados y tamaño de los animales lo cual concuerda con las descripciones publicadas por **Aquino & Encarnación** (1988; 1994b) y **Ford** (1994). Todas las comunidades peruanas reportaron tráfico de *A. nancymaae*; las comunidades colombianas y brasileñas mencionan que ellos capturan números pequeños de *A. vociferans*, y las descripciones de los traficantes brasileños sugieren la posibilidad de que *A. nigriceps* también sea traficada. Los pobladores locales de cada país de la región tri-fronteriza de la Amazonía no asignan nombres diferentes para cada especie de monos nocturnos. El género *Aotus*, es llamado “buri buri” en Colombia, “musmuqui” en Perú y “macaco da noite” en Brasil.

Un traficante brasileño quien colectó y vendió aproximadamente 2000 monos nocturnos durante un periodo de 18 años, declaró que después de ser capturado dos veces por la policía colombiana en el 2007, decidió retirarse del negocio. Este incidente alertó a los traficantes peruanos quienes empezaron a usar otros métodos para continuar con el tráfico de monos. Los colectores de Vista Alegre en Perú subsecuentemente empezaron a vender monos nocturnos a un intermediario colombiano localizado en la comunidad de Siete de Agosto (Colombia), quien posee un salvoconducto legal para proporcionar monos al laboratorio. Este intermediario solo pagaba el 50% del precio pagado por el laboratorio, pero los colectores peruanos aceptaban este pago, ya que no se exponían a ser capturados por la policía colombiana.

Otros colectores peruanos declararon que continuaban vendiendo los monos nocturnos directamente al laboratorio, llevando los animales a la madrugada de los días viernes en el 2010, y los días lunes durante el 2011, como les indicó el personal del laboratorio. Otra forma de vender los monos por parte de colectores peruanos incluye el uso de cédulas de ciudadanía de parientes o amigos colombianos, encubriendo de esta forma su nacionalidad. Adicionalmente un experto colector peruano, quien reside permanentemente en la comunidad de Vista Alegre – Perú, figura dentro de la lista de colectores de la comunidad colombiana Santa Sofía, como lo confirma el laboratorio en un informe entregado a Corpoamazonia en noviembre de 2007 (FIDIC, 2007). Este colector como muchas personas del área fronteriza, posee tanto cédula colombiana como DNI peruano. El teniente gobernador de Vista Alegre ha

manifestado en repetidas ocasiones que dicho colector ha sido informado de la veda de caza de monos nocturnos implementada en dicha comunidad, no obstante él ha hecho caso omiso y continúa capturando los animales en territorio peruano y vendiéndolos al laboratorio. En la comunidad de Gamboa (Perú) existe un intermediario con cédula colombiana, quien comercializa los monos entre los colectores de las comunidades aledañas (incluyendo Yahuma) y posteriormente los vende al laboratorio.

Los traficantes y colectores que fueron entrevistados entienden que el tráfico a través del borde fronterizo es ilegal. Su justificación para estas prácticas ilegales es la falta de acceso al dinero necesario para cubrir necesidades básicas tales como la gasolina, insumos de alimentos que ellos no producen y los uniformes y útiles escolares de sus hijos. Considerando que las entrevistas se realizaron en un amplio rango de comunidades de tres países diferentes, todos estuvieron de acuerdo en que el comprador final era el laboratorio localizado en Leticia, Amazonas, Colombia. Las entrevistas en las comunidades peruanas indicaron que el personal de este laboratorio los visitaba regularmente para realizar pedidos de monos nocturnos para el uso en el laboratorio. Durante el primer semestre del 2010, el personal del laboratorio comunicó a los colectores/traficantes peruanos que no podrían comprarles más *Aotus* hasta nuevo aviso, pues si los descubrían, los animales podrían ser decomisados. El evento más reciente de decomiso registrado dentro de esta investigación fue efectuado en el mes de noviembre de 2010, con la incautación de 20 ejemplares de la especie *A. nancymaae*. El decomiso realizado por Corpoamazonia, culminó con la liberación de estos animales en territorio colombiano, en la Reserva Privada Tanimboca, en el kilómetro 11,5 vía Tarapacá (com. pers. personal Tanimboca).

### Valor monetario

Los datos para la extracción anual, fueron calculados a partir del número aproximado de monos capturados por los informantes durante el periodo 2007-2008. Estos datos fueron multiplicados por el número total de equipos de trabajo en cada comunidad. Los informantes de diferentes comunidades estuvieron de acuerdo en que un equipo capturaba de 8 a 15 monos por mes, dependiendo de la demanda. Se identificaron periodos donde estas cifras fueron mayores, y meses donde no se capturaron animales, pues no fueron solicitados por el laboratorio. Los precios pagados por el laboratorio oscilaban entre 23 dólares por individuo en el 2007 a 33 dólares por individuo en el 2008, mientras los intermediarios pagaban 16 dólares por individuo. Los pagos siempre se han realizado en pesos colom-

bianos. Estas figuras indican que la cosecha anual de monos nocturnos en el área fue de aproximadamente 4000 animales, esto sugiere un valor monetario total anual cercano a los 90.000 dólares para los colectores (promedio de aproximadamente 625 dólares por colector) más un estimado de \$20.000 dólares para los intermediarios (Tabla 4).

### Métodos de captura

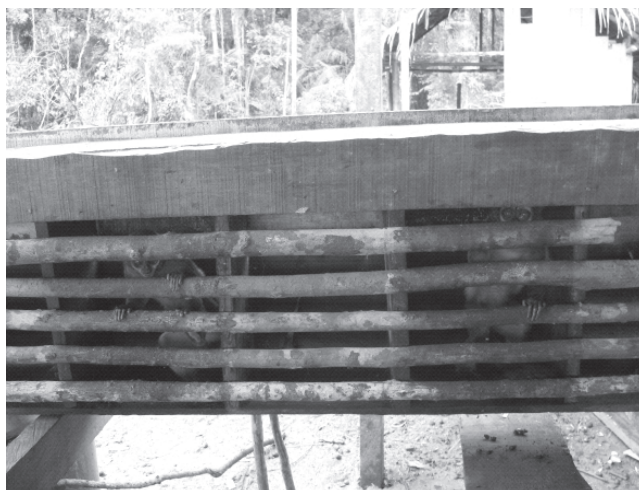
El método que se describe a continuación es el más comúnmente empleado en la zona de estudio y que genera el menor impacto al hábitat y a los monos nocturnos. Un método similar pero más simplificado fue reportado por **Encarnación & Aquino** (1994b). La captura de monos nocturnos es una actividad familiar donde usualmente al menos 3 miembros de un equipo de 5-7 personas, son familiares. Durante las entrevistas los informantes reportaron que por la captura de 1, 2 o 3 monos nocturnos es necesario talar aproximadamente de 15 a 30 metros de diámetro alrededor del árbol donde el grupo de monos duerme (el nido). En agosto de 2010 el equipo de investigación colombiano, acompañado por dos investigadoras peruanas, realizó colectas en las comunidades de Vista Alegre y Chinería. A pesar de los problemas metodológicos y éticos inherentes a este tipo de colecta, se decidió utilizar este método local para poder documentar y cuantificar el impacto de deforestación y la forma como los animales son colectados.

Durante estas colectas se talaron 15 m de diámetro de bosque. Los colectores dejan un puente de árboles que obliga a los monos a utilizarlo. Alrededor del área deforestada se coloca una malla doble de pescar de nylon (ojo de 3 cm) con longitud aproximada de 50 metros. Esta malla impide que los animales escapen una vez que han bajado por el puente y están en el suelo. Posteriormente uno o dos colectores trepan al árbol, hacen ruido o golpean el tronco del árbol para hacer que los animales salgan. Las personas a cargo de atrapar los monos se esconden para evitar ser vistos por los animales. Una vez que los monos están en el suelo son atrapados con sacos sintéticos. Los colectores expertos saben manipular los animales y una vez que éstos están en los sacos, son transportados a la comunidad y colocados en jaulas de madera individuales (figuras 3a y 3b).

Las colectas se llevaron a cabo con el fin de tomar medidas morfométricas, fotos y muestras de sangre para posteriores análisis de ADN. Los animales fueron anestesiados con Clorhidrato de Ketamina para minimizar el estrés durante la toma de muestras de sangre. Al día siguiente en la noche, los animales fueron liberados en el sitio de captura. Todo el proceso fue filmado. Con este método de captura,



**Figura 3a.** Jaula de madera para albergar a un individuo - (Foto fuente: L-Pélaez-Fundación Entropika).



**Figura 3b.** Jaula de madera para albergar seis individuos - (Foto fuente: L-Pélaez-Fundación Entropika).

la tala registrada corresponde al mínimo reportado (15 m de radio) y donde el número de capturas reportadas para 4000 animales fue de aproximadamente 2500 eventos de captura. Debido a que el laboratorio compra principalmente monos adultos pues el personal del laboratorio ha comunicado a los colectores que las crías no se pueden usar en la experimentación. Por tal razón los colectores argumentan que las crías son dejadas en el nido. Algunos colectores afirman que a veces mantienen los infantes para venderlos cuando crezcan, pero que por lo general se mueren antes de llegar al estado juvenil, por tal razón evitan capturarlos. No obstante el equipo de investigación ha registrado crías en las comunidades para la venta en el tráfico de mascotas.



Los cálculos de impacto en la deforestación se realizaron empleando la siguiente fórmula:

$$\text{Deforestación (área m}^2\text{)} = N \cdot d \cdot \pi$$

Deforestación (área) = área deforestada asociada a la captura de monos nocturnos

N = número aproximado de capturas para la colecta de 4000 *Aotus* traficados en el periodo 2007-2008. d = diámetro deforestado por captura. = 3,14

$$\text{Deforestación (área)} = 2.500 \cdot 15 \cdot 3,14 = 235.500 \text{m}^2 = 23,55 \text{ hectáreas}$$

Para calcular el total de árboles talados durante las colectas, se empleó la siguiente fórmula:

$$\text{Deforestación (árboles)} = A \cdot \text{Deforestación (área)}$$

Deforestación (árboles) = total de árboles talados asociado a la captura de monos nocturnos. A = 640 árboles con DAP (Diámetro de Altura la Pecho) mayor a 10 cm por hectárea en la Amazonía. Este estimativo fue calculado por **Ter Steege et al.** (2003) en la Amazonía fronteriza entre Colombia y Perú.

$$\text{Deforestación (árboles)} = 23,55 \cdot 640 = 15.072 \text{ árboles}$$

#### Densidades de *Aotus* spp. en el área de estudio

La información relevante sobre los censos para cada sitio de estudio está resumida en la Tabla 5. Aunque esta tabla contiene información agrupada solo para Chinería y Yahuma, los estimativos de densidades agrupan los tres sitios de estudio en Perú. Igualmente la Tabla 5 presenta las reservas privadas y la cuenca del Calderón separadamente, no obstante estos sitios se agruparon para calcular las densidades como se enunció en el análisis de los datos.

Los resultados presentados a continuación asumen que las densidades reportadas para Colombia corresponden a la especie *A. vociferans* y a *A. nancymmae* y *A. vociferans* para Perú, como lo reportan los trabajos adelantados por **Aquino y Encarnación** (1986; 1988; 1994b), **Ford** (1994) y **Defler** (2004; 2010). Adicionalmente cabe aclarar que existen poblaciones de *A. nancymmae* en Colombia debido a las continuas liberaciones llevadas a cabo por el FIDIC y CORPOAMAZONIA. Por tal razón los resultados se expresan como densidades de *Aotus* spp.

La Tabla 6 presenta las densidades poblacionales y biomasa de *Aotus* spp. para cuatro zonas de estudio en Perú y Colombia. Las densidades calculadas para Mocagua fueron de 44 ind/km<sup>2</sup>. Esta comunidad indígena colombiana localizada al margen norte del río Amazonas es zona parcialmente inundable (opuesto a Vista Alegre), no colecta monos nocturnos para el mercado de la investigación biomédica y la cacería de *Aotus* para la subsistencia es reducida ya que esta especie no es apreciada en la dieta Tikuna. En la cuenca del Calderón y las reservas privadas con bosques de altura, donde no se ha registrado la explotación de *Aotus* spp., las densidades obtenidas fueron de 23,3 ind/km<sup>2</sup>. Mientras que las densidades de San Martín fueron de 10,4 ind/km<sup>2</sup>, en zona inundable, siendo más bajas que las reportadas por otros estudios en bosques con estructura similar (**Aquino y Encarnación**, 1988). En San Martín es probable que la extracción realizada durante los años 80 para la investigación biomédica haya afectado las poblaciones actuales de monos nocturnos. No obstante cabe mencionar que la cacería de subsistencia en San Martín, es la más alta registrada de los cinco sitios de estudio en Colombia.

Los estimativos de densidad y biomasa de *Aotus* spp. en Perú fueron los más bajos reportados en este estudio con 6,9 ind/km<sup>2</sup> y 8,3 kg/km<sup>2</sup> respectivamente (Tabla 6).

**Tabla 5.** Censos realizados en ocho localidades en la frontera Amazónica entre Colombia y Perú.

Sitio de estudio	Periodo de censo	No. días	No. horas	No. transectos	Longitud total de transectos (km)	No. km censados
Chinería – Yahuma <sup>1</sup>	1-abril-2010 28-oct-2010	31	94	6	16	93
Vista Alegre <sup>1</sup>	26-feb-2010 22-oct-2010	55	173	7	20 <sup>3</sup>	183
Calderón <sup>2</sup>	7-may-2009 9-nov-2010	60	181	7	14	150
Reservas Privadas <sup>2</sup> (Otra Parte – Cerca Viva)	22-may-2010 10-nov-2010	34	86	4	4	70
Mocagua	26-nov-2008 19-oct-2009	74	220	8	16	182
San Martín	18-may-2008 10-dic-2008	44	189	9	15	164

<sup>1</sup> Sitios agrupados en los análisis para garantizar un mínimo tamaño de muestra.

<sup>2</sup> Calderón y Reservas Privadas: Agrupados en los análisis para garantizar un mínimo tamaño de muestra.

<sup>3</sup> Distancia incluye censos en canoa realizados sobre la quebrada Yanayacu (Vista Alegre).

**Tabla 6.** Densidades poblaciones y biomasa de *Aotus* spp. en ocho localidades en la frontera Amazónica entre Colombia y Perú agrupadas en 4 zonas de estudio.

Sitio de estudio	Tamaño de grupo	N	Grupos/km <sup>2</sup> (± SD)	Individuos/km <sup>2</sup> (± SD)	Biomasa (kg/km <sup>2</sup> )	Ancho efectivo de banda (m)	MT (%- m)	%CV	CI	gl	AIC
Perú (Chinería, Vista Alegre y Yahuma)	1,9 ± 0,9	31	3,6 ± 6,3	6,9 ± 6,4	8,3	15,6	10%	35,4	3,3 – 4,1	19,4	195,1
Calderón y Reservas Privadas-OP-CV	2,1 ± 0,8	61	11,1 ± 16,4	23,3 ± 13,6	27,1	12,5	25 m	28,1	14,5 – 34,0	11,8	256,9
Mocagua - PNNA	3,3 ± 1,4	46	13,3 ± 14,3	44,0 ± 29,5	52,8	9,5	15 m	24,6	29,8 – 78,5	61,8	249,1
San Martín - PNNA	2,1 ± 1,0	20	4,8 ± 8,4	10,4 ± 8,4	12,4	12,6	-	41,2	4,02 – 22,7	11,5	123,1

N = número de grupos observados.

CV = Coeficiente de Variación.

gl = Grados de libertad.

MT = Medida de truncamiento: en metros o porcentaje.

CI = Intervalo de confianza.

AIC = Criterio de Información de Akaike.

Los pobladores locales en Perú, al igual que en Colombia, no consumen el mono nocturno, por ende su extracción es principalmente para el mercado de la investigación biomédica. Las razones para que el mono nocturno no sea incluido en la dieta local incluye supersticiones Tikunas tales como: i) Los monos nocturnos son espíritus malignos, por tal razón salen de noche y toman la sangre de los Tikunas, su consumo se relaciona con maleficios; ii) los monos nocturnos están a cargo de vigilar que la luna salga cada noche, quien los consume puede adquirir enfermedades. Estas supersticiones son seguidas por los abuelos Tikunas e incluidas como “dietas o restricciones de alimentos” (Maldonado, 2010). No obstante, estas prácticas o creencias no son aplicadas por las nuevas generaciones. Otra razón es el desagradable olor de su carne el cual emana de la glándula subcaudal, tal como lo reportaron Aquino *et al.* (2009) para los pobladores rurales de la cuenca del río Alto Itaya, Perú.

#### Ámbito legal de los permisos otorgados por Corpoamazonia

Tomando como base el portafolio de los documentos relacionados con los permisos otorgados al FIDIC por parte de Corpoamazonia, a continuación se mencionan las irregularidades más frecuentes desde el año 1999 hasta el 2008. El capítulo VI artículo 21 del decreto 309 del 2000, prohíbe la comercialización de fauna con fines de investigación científica. Es decir que el pago realizado por el laboratorio a colectores indígenas transgrede la ley colombiana. En cada permiso de colecta otorgado por Corpoamazonia al laboratorio, no se han llevado a cabo las respectivas con-

sultas previas necesarias cuando se realiza este tipo de investigación en territorios indígenas, ya que se debe contar con la participación del Ministerio del Interior, como lo enuncia la legislación colombiana en el artículo 7 de la Ley 21 de 1991, el artículo 76 de la Ley 99 de 1993 y el decreto 1320 de 1998. Es decir, las consultas previas firmadas hasta el 2009 son inexistentes por la carencia del aval del Ministerio del Interior y de Justicia, como en el caso del acta firmada el día 5 de marzo de 2006, la cual fue aceptada y relacionada dentro del Concepto Técnico de Corpoamazonia DTA No. 119-06.

Por otro lado Corpoamazonia, en su Resolución 0202 del 18 de marzo de 1999 (pág. 3) documenta que en dicho laboratorio existían: “627 micos de la especie *Aotus de los cuales 517 son A. nancymae, 68 son A. nigriceps y 42 son A. vociferans*”. Desde el año 1999 hasta el 2010 Corpoamazonia ha otorgado únicamente permisos de colecta con fines de investigación científica para la especie *A. vociferans*, lo que evidencia que la autoridad ambiental conoce desde hace más de 10 años la captura ilegal de las especies *A. nancymae* y *A. nigriceps* por parte del laboratorio. Para mitigar los posibles efectos de las capturas, Corpoamazonia solicitó: “una evaluación, monitoreo, estructura y dinámica de las poblaciones de *A. nancymae*, *A. nigriceps* y *A. vociferans* para conocer el estado actual de la misma y de acuerdo con esto **presentar un proyecto de cría en cautiverio y un programa de requerimiento anual de animales en reemplazo**” (Corpoamazonia, 1999, pág. 4) En dichos permisos Corpoamazonia adicionalmente solicita al laboratorio “Un plan de repoblamiento y liberación de los monos mantenidos en cautiverio para re-

forzar las poblaciones naturales de micos del género *Aotus* en el trapecio amazónico colombiano” (Corpoamazonia, 2006, 2010). Las anteriores causales conllevarían a la suspensión o revocatoria del permiso de investigación (artículo 62 de la ley 99 de 1993), mediante la emisión de un concepto técnico emitido, en este caso, por Corpoamazonia. Dicho concepto fue elaborado por una funcionaria contratista de Corpoamazonia: DTA-001-07, del 10 de octubre de 2007. Este concepto técnico enuncia que: “...el permisionario (FIDIC) está haciendo uso indebido del permiso al hacer uso de especies no autorizadas dentro de la Resolución, ya que este solo hecho constituye incumplimiento grave a las obligaciones establecidas en la Resolución 00066 de 2006.”. En el año 2008 Corpoamazonia contrató a la Universidad Javeriana para determinar por medio de herramientas genético-moleculares, las especies de *Aotus* utilizadas en el laboratorio, y así confirmar si existía un tráfico de *A. nancymae*. Como resultado, el estudio del Dr. Ruiz-García (2009) afirmó la presencia de *A. nancymae* dentro de las instalaciones del laboratorio. No obstante, después de esta clara evidencia de tráfico, Corpoamazonia otorgó un nuevo permiso para la captura anual de 800 *Aotus vociferans* por un periodo de 5 años a la FIDIC (Resolución 0632, 29 junio del 2010).

#### Impacto de las liberaciones realizadas en territorio colombiano

Siguiendo con el plan de repoblamiento exigido por Corpoamazonia, el laboratorio, bajo la supervisión de la misma han liberado ejemplares de las especies *A. nancymae* y *A. nigriceps* en territorio colombiano. Las liberaciones se han realizado en números desde 20 hasta 253 animales, como lo confirma el acta de visita de seguimiento del 14 de febrero de 2008 (Corpoamazonia, 2008). Estas liberaciones estarían violando así las disposiciones enunciadas en el Artículo 135 del Decreto 1608 de 1978, sobre la normatividad para el repoblamiento de especies cazadas para investigación científica. A continuación se presentan algunos de los sitios de liberación, en donde actualmente existen poblaciones de las especies mencionadas anteriormente, constituyendo así un trasplante<sup>4</sup> e introducción<sup>5</sup> de fauna silvestre (Tabla 7).

**Tabla 7.** Sitios de liberación de *A. nancymae*, *A. nigriceps* y *A. vociferans* reportados por el FIDIC (2007) y personal involucrado en las liberaciones en territorio colombiano.

Localidad	Coordenadas
Atacuari	03°48' 12,6" S 70° 40'23,4" O
7 de Agosto	03°49' 40" S 70° 38'03,9" O
Naranjales	03°51' 53,3" S 70° 31'15,7" O
Puerto Nariño	03°46' 45,7" S 70° 22'13,4" O
Tarapoto	03°47' 19" S 70° 25'45" O
San Juan del Soco	03°44' 23,4" S 70° 27'30,2" O
Pozo Redondo	03°49' 45,9" S 70° 26'28,4" O
San Sebastián y San Antonio de los Lagos	04°35' 56,57" S 70° 04' 51,30" O
Reserva Cerva Viva	04° 07,339" S 69°56,832" O
Reserva Tanimboca	04° 07' 10,8" S 69° 57' 04,2" O
Comunidades Kilómetros 6 y 11	04° 00' 17,2" S 69° 58' 14,3" O
1er sitio Isla Corea	04° 03,082' S 70° 07,365' O
2do sitio Isla Corea	04° 03,089' S 70° 07,390' O
3er sitio Isla Corea	04° 03,293' S 70° 07,611' O
4to sitio Isla Corea	04° 03,297' S 70° 07,605' O
Isla de los micos	04° 03,169' S 70° 05,70' O
1er sitio Nazareth	04° 05,038' S 70° 03,234' O
2do sitio Nazareth	04° 05,030' S 70° 03,217' O

#### Discusión

Los resultados de las entrevistas sugieren que existe un extensivo y continuo tráfico de monos nocturnos en el área tri-fronteriza de Brasil – Colombia – Perú. Esto representa un tráfico dentro de Colombia, entre Perú y Colombia y entre Brasil y Colombia. Mientras que el tráfico doméstico estimado en Colombia está en el orden de los 1000 animales por año, el tráfico internacional estimado es tres veces mayor. Ninguna importación de Perú o Brasil es reportada por Colombia, ni Perú o Brasil reportan la exportación de monos nocturnos hacia Colombia. Según las afirmaciones de los involucrados en el tráfico en los tres países, los precios se pagan en pesos colombianos, soportando la posibilidad de que el tráfico sea principalmente para el mercado colombiano. Si es correcto, y con los tres países siendo miembros de CITES, esto pone en evidencia la violación de las regulaciones de CITES. Todas las personas involucradas en el tráfico que fueron

4 Se entiende por trasplante de fauna silvestre toda implantación de una especie o subespecie de la fauna silvestre en áreas donde no ha existido en condiciones naturales (Artículo 136 del Decreto 1608 de 1978).

5 Se entiende por introducción de especies de la fauna silvestre, todo acto que conduzca al establecimiento o implantación en el país, bien sea en medios naturales o artificiales, de especies o subespecies exóticas de fauna. Para los efectos de la aplicación de este Decreto se entiende por especie exótica la especie o subespecie taxonómica, raza o variedad cuya área natural de dispersión geográfica no se extiende al territorio nacional ni a aguas jurisdiccionales y si se encuentra en el país es como resultado voluntario o involuntario de la actividad humana (Artículo 138 del Decreto 1608 de 1978).

contactadas, indicaron que los monos fueron vendidos al FIDIC en Leticia, Amazonas, Colombia.

La interpretación, soportada por la documentación gubernamental, es que a este laboratorio se le permitió adquirir legalmente hasta 1600 *Aotus vociferans* dentro de Colombia por un periodo de 24 meses. Los datos de las entrevistas no solo sugieren que un número mayor de individuos fue adquirido, sino que también representa diferentes especies (principalmente *A. nancymae*), e incluyó un número sustancial de individuos capturados fuera de Colombia. Las publicaciones resultado de las investigaciones conducidas en el laboratorio, indican que además son usados *A. nancymae* y *A. nigriceps* (Cárdenas *et al.*, 2005; Patarroyo *et al.*, 2006; Suárez *et al.*, 2006; Curtidor *et al.*, 2007; Daubenberger *et al.*, 2007; Rojas-Caraballo *et al.*, 2009).

Los estudios a largo plazo sugieren que incluso las especies comunes tales como los monos rhesus, se vuelven severamente amenazadas si se las cosecha de forma no sostenible (Southwick & Siddiqi 2001). En el caso de *Aotus* spp. en el área tri-fronteriza, las entrevistas confirman que ahora se toma considerablemente más tiempo para capturar el mismo número de monos nocturnos, con muchos viajes de caza que prueban ser infructuosos ya que los animales se han vuelto más difíciles de encontrar. Los efectos ecológicos de la extracción continua de *Aotus* spp. desde 1984 en la frontera de Brasil – Colombia – Perú, se ven claramente reflejados en las bajas poblaciones de *Aotus* en las zonas de mayor extracción, como lo son las comunidades de Chinería, Yahuma y Vista Alegre, en Perú. Adicionalmente estas capturas están afectando drásticamente la composición del bosque al talar más de 15.000 árboles adultos anuales para una captura estimada de 4000 animales. Puesto que todas las especies de monos nocturnos están en la lista del Apéndice II de CITES, las partes están obligadas a reportar el tráfico internacional de estas especies. En años recientes (2003 en adelante), solo Perú ha reportado el tráfico internacional de monos nocturnos, tanto reproducidos en cautiverio como capturados en estado silvestre, con todos los especímenes enviados a Estados Unidos. Los altos niveles de tráfico reportados entre los países en el área tri-fronteriza, están completamente en contraste con lo que ha sido reportado como exportación internacional, sugiriendo una falta de imposición de las regulaciones internacionales de tráfico.

De acuerdo a lo evidenciado en esta investigación, el impacto más severo sobre las poblaciones de monos nocturnos en Colombia, es la continua liberación de ejempla-

res de las especies *A. nancymae* y *A. nigriceps*. Aún desconocemos el impacto ocasionado por la liberación de por ejemplo, una colonia de 253 animales objetos de investigación en malaria sobre la población residente<sup>6</sup>, en términos ecológicos: competencia por alimento y territorio, comportamentales: son animales territoriales que viven en grupo de no más de 5 individuos (Aquino & Encarnación, 1994b; Fernández-Duque, 2007) y obviamente, en términos de sanidad. Los animales liberados pueden ser portadores de parásitos y bacterias, propios de animales en cautiverio que han estado inmuno-suprimidos, pudiendo contaminar la población residente. Como lo reportaron pobladores de los caseríos aledaños a Puerto Nariño - Colombia, después de las liberaciones se encuentran cuerpos en descomposición y se sabe que son provenientes del laboratorio porque los animales están tatuados.

Tal como lo confirma el estudio entregado por el FIDIC: “Estimación del Estatus Actual de las Poblaciones Naturales de Micos del Genero *Aotus* de San Juan de Atacuari en el Trapecio Amazónico” (FIDIC, 2007: pág. 28): “no se obtuvieron avistamientos de *A. vociferans* durante el estudio... en 1984 se colectaron grandes números de esta especie”. La misma evidencia entregada por el laboratorio sugiere que gracias a la caza científica de *A. vociferans* desde 1984, las poblaciones residentes (Tabla 7), pudieron presentar un caso de extirpación local, y tal vez esta especie pudo haber sido desplazada por los individuos de *A. nancymae* liberados, durante los últimos 27 años.

## Recomendaciones

Los niveles significativos de cosecha de monos nocturnos en el área tri-fronteriza de Brasil – Colombia – Perú parecen ser una violación a las leyes y regulaciones nacionales e internacionales. Por ejemplo, la legislación colombiana, Artículo 85 de la Ley 99 de 22 de diciembre de 1993, claramente especifica las multas y sanciones que deben ser aplicadas en los casos de importación ilegal de fauna silvestre, y que varían dependiendo de la gravedad de la infracción. Se recomienda que las autoridades ambientales y de conservación de Colombia, Perú y Brasil, traten de resolver el problema a través de la acción cooperativa. La naturaleza internacional de este tráfico, el cual viola las regulaciones de CITES, hace que las Autoridades Administrativas de CITES en cada uno de los tres países, sean los mejores organismos para liderar este proceso. Es urgente que el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia

<sup>6</sup> Los animales fueron liberados en San Juan del Soco, 12 de Octubre, Lago Tarapoto y Pozo Redondo, municipio de Puerto Nariño, Colombia, según acta de liberación firmada el 14 de febrero de 2008 y expedida por Corpoamazonia.

(MAVDT), como máxima autoridad ambiental investigue las constantes irregularidades de los permisos otorgados al laboratorio por parte de Corpoamazonia. Adicionalmente es crucial investigar la composición de especies, origen y volúmenes de monos nocturnos usados en el laboratorio, ya que los datos de los colectores y traficantes sugieren que estos números no corresponden con los permisos nacionales.

Aunque el MAVDT ya realizó una investigación sobre el tráfico ilegal de *Aotus*, la cual cesó según Resolución 1252, del 1 de julio de 2009 y dice: ... “*Que de acuerdo con lo anterior, se considera que no se puede proseguir la investigación administrativa de carácter ambiental, iniciada en contra de la Fundación Instituto de Inmunología de Colombia - FIDIC, por la presunta violación a la normatividad ambiental vigente, concretamente a lo preceptuado en el artículo IV de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres - CITES, y el Decreto 309 de 2000, artículos 2°, 6°, 8° y 20°*”. Una vez más estas investigaciones presentan grandes limitaciones ya que, por ejemplo, la evidencia de la existencia de *A. nancymae* en Colombia fue proporcionada por el demandado (FIDIC). Sería entonces pertinente que la Procuraduría Delegada para Asuntos Ambientales y Agrarios tome futuras determinaciones sobre este caso.

Esta investigación indica la presencia de tres especies de monos nocturnos, *Aotus vociferans*, *A. nancymae* y *A. nigriceps* en áreas donde no han sido reportadas antes. Es de suma importancia que las autoridades ambientales otorguen los permisos necesarios de colecta y acceso a recurso genético a expertos primatólogos para esclarecer la distribución geográfica precisa de estas especies y si son o no alopátricas o simpátricas. Si la especie *Aotus nancymae* llegara a encontrarse en territorio colombiano, lo cual sería el resultado de las continuas liberaciones de las cuales ha sido objeto, su área de distribución sería extremadamente restringida, con una población muy pequeña, por lo que posiblemente deba ser incluida en alguna de las categorías de “En Peligro” (EN) de acuerdo a los criterios de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) (Rodríguez-Mahecha, et al., 2006) y por ende en el Apéndice I de CITES.

Una medida que debe ser tomada inmediatamente es el establecimiento de una colonia en cautiverio para continuar legalmente con la experimentación biomédica por parte del laboratorio. Esta medida debió ser tomada desde sus inicios como lo estableció la Resolución No. 0202 del 18 de marzo de 1999 de Corpoamazonia. Es claro que para la FIDIC es mucho más económico continuar con la captura de animales silvestres, que implementar un criadero en cautive-

rio. No obstante esta práctica no solo viola la legislación ambiental colombiana y promueve el tráfico ilegal de fauna, sino que además está afectando gravemente el ecosistema y las conductas éticas de las autoridades indígenas del sur de la Amazonía colombiana.

### Agradecimientos

Gracias al equipo de investigación, especialmente a L. M Peláez-Cortés por su valiosa ayuda durante este proyecto, y miembros de dos organizaciones no gubernamentales locales que prefieren permanecer anónimas, por su invaluable apoyo durante el trabajo de campo. A los colaboradores anónimos de la policía ambiental de Leticia; personal de la Procuraduría Ambiental (Bogotá, Colombia) por proporcionarnos copias físicas de los documentos legales referentes a este caso. Al Parque Nacional Natural Amacayacu por proporcionarnos soporte logístico, al Ministerio de Agricultura del Perú por otorgar permiso de investigación y colecta. Al Dr. V. Pacheco y F. Cornejo por su apoyo logístico para el desarrollo de la investigación en Perú. Dr. E. Fernández-Duque, C. Brieva, E. Martínez y a un evaluador anónimo por sus sugerencias para mejorar este documento. Esta investigación fue financiada por Rufford Small Grants, Rainforest Concern, The Whitley Fund for Nature, IPPL (UK y US), la beca Russell E. Train (WWF – USA) y ORSAS (UK). Gracias a A. Barona por su contribución en la descripción de los sitios de estudio Calderón y reservas. Un agradecimiento especial a La Asociación Primatólogica Colombiana por su apoyo institucional. Las opiniones presentadas no necesariamente reflejan las opiniones o políticas de las entidades financiadoras, y los financiadores no tuvieron ningún papel en el diseño de la investigación, recolección y análisis de los datos, decisión de publicarlos o preparación del manuscrito.

### Bibliografía

- Aquino, R., & F. Encarnacion. 1986a. Population structure of *Aotus nancymai* (Cebidae, Primates) in Peruvian Amazon lowland forest. *American Journal of Primatology* 11:1-7.
- . 1986b. Characteristics and use of sleeping sites in *Aotus* (Cebidae:Primates). in the Amazon lowlands of Peru. *American Journal of Primatology* 11(4):319-331.
- . 1988. Population densities and geographic distribution of night monkeys (*Aotus nancymai* and *Aotus vociferans*) (Cebidae:Primates) in northeastern Peru. *American Journal of Primatology* 14(4):375-381.
- . 1994a. Owl Monkey Populations in Latin America: Field Work and Conservation. In: J. Baer, F. R. Weller, E and I. Kakoma (editors), *Aotus: The Owl Monkey* San Diego, New York, Boston, London, Sydney. 59-95 pp.

- \_\_\_\_\_. 1994b. Primates of Peru. Primate Report 40:1-127.
- \_\_\_\_\_, **W. Terrones, R. Navarro, C. Terrones, and F. M. Cornejo.** 2009. Caza y estado de conservación de primates en la cuenca del río Itaya, Loreto, Perú. *Revista Peruana de Biología* 15(2):33-39.
- Bailey, R. C., R. S. Backer, D. S. Brown, P. Von Hildebrand, R. A. Mittermeier, L. E. Sponser, & K. E. Wolf.** 1974. Progress of a breeding project for non-human primates in Colombia. *Nature* 248:453-455.
- Buckland, S., D. Anderson, K. Burnham, & J. Laake.** 2001. Distance Sampling: estimating abundance of biological populations. Oxford University Press, Oxford 432 p.
- \_\_\_\_\_, **A. J. Plumptre, L. Thomas, & E. A. Rexstad.** 2010. Design and Analysis of Line Transect Surveys for Primates. *International Journal of Primatology* 31:833-847.
- Cárdenas, P. P., C. F. Suárez, P. Martínez, M. E. Patarroyo, & M. A. Patarroyo.** 2005. MHC class I genes in the owl monkey: mosaic organisation, convergence and loci diversity. *Immunogenetics* 56(11):818-832.
- Castro, N.** 1978. Diagnóstico de la situación actual de los primates no humanos en el Perú y un plan nacional para su utilización racional. Ministerio de Agricultura y Alimentación, Dirección General Forestal y de Fauna, Dirección de Conservación, Lima, Perú.
- Cornejo, F., & E. Palacios.** 2008. *Aotus nigriceps*. IUCN Red List of Threatened Species. www.iucnredlist.org. Accedido 27 de diciembre 2009.
- Corpoamazonia.** 1999. Resolución 0202: Por medio de la cual se le otorga al Doctor Manuel E. Patarroyo Murillo, Permiso de Estudio de Caza Científica para Fauna Silvestre de micos de la especie *Aotus* para desarrollar el proyecto de vacuna sintética para la malaria producida por el *Plasmodium falciparum* en el municipio de Leticia, departamento del Amazonas. 6 p.
- \_\_\_\_\_. 2006a. Concepto Técnico DTA No. 119-06: Evaluación de una solicitud de permiso de investigación denominado: "Captura y estudio de investigación científica en diversidad biológica de primates en la cuenca del río Amazonas en el Trapecio amazónico colombiano". Leticia, Amazonas. 16 p.
- \_\_\_\_\_. 2006b. Resolución No. 00066. A través de la cual se otorga a la Fundación Instituto de Inmunología de Colombia (FIDIC) un permiso de investigación denominado "Captura y estudio de investigación científica en diversidad biológica de primates en la cuenca del Río Amazonas en el trapecio amazónico colombiano". 17 p.
- \_\_\_\_\_. 2007. Concepto Técnico DTA-001-07: Visita de seguimiento permiso de investigación denominado: "Captura y estudio de investigación científica en diversidad biológica de primates en la cuenca del río Amazonas en el trapecio amazónico colombiano". Leticia, Amazonas. 4 p.
- \_\_\_\_\_. 2008. Acta de liberación de monos *Aotus* sp. Fecha de liberación 16 de febrero de 2008. Leticia, Amazonas. 2 p.
- Cooper, R., and J. Hernández-Camacho.** 1975. A current appraisal of Colombia's primate resources. In: G. Bermant and D. Lindburg (editors), Primate Utilization and Conservation. John Wiley and sons. New York. 37-66 pp.
- Curtidor, H., M. H. Torres, M. P. Alba, & M. A. Patarroyo.** 2007. Structural modifications to a high-activity binding peptide located within the PfEMP1 NTS domain induce protection against *P. falciparum* malaria in *Aotus* monkeys. *Biological Chemistry* 388:25-36.
- Daubenberger, C. A., R. Spirig, M. E. Patarroyo, & G. Pluschke.** 2007. Flow cytometric analysis on cross-reactivity of human-specific CD monoclonal antibodies with splenocytes of *Aotus nancymaae*, a non-human primate model for biomedical research. *Veterinary Immunology and Immunopathology* 119(1-2):14-20.
- Defler, T. R.** 1994. La conservación de los primates colombianos. Trianea (Acta científica y tecnológica Inderena) 4:255-287.
- \_\_\_\_\_. 2004. Primates of Colombia. Conservation International, Washington. 550 p.
- \_\_\_\_\_. 2010. Historia Natural de los Primates de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Biología, Bogotá. 612 p.
- \_\_\_\_\_, **& M. L. Bueno.** 2007. *Aotus* diversity and the species problem. *Primate Conservation* 22:55-70.
- \_\_\_\_\_, **Bueno, M.L., Hernández-Camacho, & J.** 2001. Taxonomic Status of *Aotus hershkovitzii*: Its Relationship to *Aotus lemurinus lemurinus*. *Neotropical Primates* 9(2):37-52.
- Fernández-Duque, E.** 2007. Aotinae: Social Monogamy in the Only Nocturnal Haplorhines. In: C. J. Campbell, A. Fuentes, K. C. MacKinnon, M. Panger and S. K. Bearder (editors), Primates in Perspective. Oxford University Press, New York, Oxford. 139-154 pp.
- FIDIC.** 2006. Plan de repoblamiento para reforzar las poblaciones naturales de micos del género *Aotus* en el trapecio amazónico colombiano con los *Aotus* a ser liberados de la Estación Experimental de Primates de la FIDIC. Fundación Instituto de Inmunología de Colombia, Leticia, Amazonas. 25 p.
- \_\_\_\_\_. 2007a. Estimación del estatus actual de las poblaciones naturales de micos del género *Aotus* en San Juan de Atacuari en el trapecio amazónico colombiano. Fundación Instituto de Inmunología de Colombia, Leticia, Amazonas. 95 p.
- \_\_\_\_\_. 2007b. Informe de actividades de la Estación Experimental de Primates de la FIDIC para el Permiso de "Captura y estudio de investigación científica en diversidad biológica de primates en la cuenca del río Amazonas en el Trapecio amazónico colombiano". FIDIC, Leticia, Amazonas. 14 p.
- Ford, S. M.** 1994. Taxonomy and distribution of the owl monkey. In: J. F. Baer, R. E. Weller and I. Kakoma (editors), *Aotus: The Owl Monkey*. Academic Press, San Diego. 1-57 pp.
- Freese, C. A.** 1975. Census of non-human primates in Peru. In: PAHO (editor), Primate Censusing studies in Peru and Colombia. Pan American Health Organization, Washington, D.C. 17-42 pp.
- Groves, C. T.** 2005. Order Primates. In: D. E. Wilson and D. A. Reeder (editors), Mammal Species of the World. A Taxonomic and Geographic Reference. Johns Hopkins University Press.
- Held, J. R., & T. L. Wolfle.** 1994. Imports - Current Trends and Usage. *American Journal of Primatology* 34(1):85-96.
- Heltne, P.G., Freese, C., Whitesides, & G. A.** 1975. Field survey of non-human primate populations in Bolivia. Pan American Health Organization, Washington, D.C.
- Hernández-Camacho, J., & R. W. Cooper.** 1976. The non-human Primates of Colombia. In: Thornigton, R. W., Heltne and P.G. (editors), Neotropical Primates: Field studies and Conservation. National Academy of Sciences, Washington, D.C. 35-69 pp.

- \_\_\_\_\_, & T. R. Defler. 1989. Algunos aspectos de la conservación de primates no-humanos en Colombia. In: C. J. Saavedra, R. A. Mittermeier and I. Bastos Santos (editors), *La Primatología en Latinoamérica*. WWF-U.S., Washington, D.C. 67-100 pp.
- Hershkovitz, P.** 1983. Two new species of night monkeys, genus *Aotus* (Cebidae, Platyrrhini): A preliminary report on *Aotus* taxonomy. *American Journal of Primatology* 4:209-243.
- INRENA.** 2003. Ley forestal y de Fauna Silvestre. Ley No. 27308. Reglamento de la Ley Forestal y de Fauna Silvestre y de sus modificaciones. D.S. N 0142001-AG. Instituto Nacional de Recursos Naturales, Lima, Perú. 112 p.
- Maldonado, A. M., V. Nijman, and S. K. Bearder.** 2009. Trade in night monkeys *Aotus* spp. in the Brazil-Colombia-Peru tri-border area: international wildlife trade regulations are ineffectively enforced. *Endangered Species Research* 9(2):143-149.
- \_\_\_\_\_. 2010. The Impact of Subsistence Hunting by Tikunas on Game Species in Amacayacu National Park, Colombian Amazon. Anthropology and Geography Department, PhD Thesis. Oxford Brookes University, Oxford. 311 p.
- \_\_\_\_\_, A. A. Barona, & E. Tyson. 2009. Developing a Participatory Conservation Strategy for the Calderon Basin, Colombian Amazon. Report presented to The Whitley Fund for Nature. Fundación Entropika, Leticia. 13 p.
- Marshall, A. R., J. C. Lovett, & P. C. L. White.** 2008. Selection of line-transect methods for estimating the density of group-living animals: Lessons from the primates. *American Journal of Primatology* 70:1-11.
- MAVDT.** 2009. Resolución 1252 del 1 de julio: "Por la cual se declara la cesación de una investigación administrativa de carácter ambiental y se toman otras determinaciones". Bogotá, Colombia. 14 p.
- Mittermeier, R. A.** 1991. Hunting and its effect on wild primate populations in Suriname. In: J. G. Robinson and K. H. Redford (editors), *Neotropical wildlife use and conservation*. The University of Chicago Press, Chicago and London. 93-107 pp.
- Mittermeier, R. A., W. R. Konstant, & R. B. Mast.** 1994. Use of Neotropical and Malagasy Primate Species in Biomedical-Research. *American Journal of Primatology* 34(1):73-80.
- Morales-Jiménez, A. L., A. Link, F. Cornejo, & P. R. Stevenson.** 2008. *Aotus vociferans*. IUCN Red List of Threatened Species. www.iucnredlist.org. Accedido 27 de diciembre 2009.
- Muckenhirn, N. B., K. Mortensen, S. Vessey, C. E. O. Fraser, & B. Singh.** 1975. Report on a primate survey in Guyana. Pan American Health Organization, Washington, D.C.
- Neville, M. K.** 1975. Census of primates in Peru. In: PAHO (editor), *Primate censusing in Peru and Colombia*. Pan American Health Organization, Washington, D.C. 3-15 pp.
- \_\_\_\_\_. 1977. Censo de primates en el Perú. Primera Conferencia Internacional Sobre la Conservación y Utilización de Primates Americanos No-Humanos en las Investigaciones Biomédicas, Volumen 217. Organización Panamericana de Salud Publicaciones Científicas, Lima, Perú. 20-31 pp.
- Patarroyo, M. E., G. Cifuentes, & J. Baquero.** 2006. Comparative molecular and three-dimensional analysis of the peptide-MHC II binding region in both human and *Aotus* MHC-DRB molecules confirms their usefulness in antimalarial vaccine development. *Immunogenetics* 58:598-606.
- Peres, C. A.** 1999. General guidelines for standardizing line-transect surveys of tropical forest primates. *Neotropical Primates* 7:11-16.
- Rodríguez-Mahecha, J. V., M. Alberico, F. Trujillo, and J. Jorgenson.** 2006. Libro Rojo de los Mamíferos de Colombia. Serie libros Rojos Especies Amenazadas de Colombia. Conservación Internacional Colombia y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá, Colombia. 433 p.
- Rojas-Caraballo, J., A. Monguia, M. A. Giraldo, G. Delgado, D. Granados, D. Millan-Cortes, P. Martínez, R. Rodríguez, & M. A. Patarroyo.** 2009. Immunogenicity and protection-inducing ability of recombinant *Plasmodium vivax* rhoptry-associated protein 2 in *Aotus* monkeys: A potential vaccine candidate. *Vaccine* 27:2870-2876.
- Ruiz-García, M.** 2009. Informe técnico final del análisis de la composición genética de la colección de *Aotus* de la FIDIC solicitada por CORPOAMAZONIA. Bogotá, D.C. 22 p.
- \_\_\_\_\_, C. Vásquez, E. Camargo, N. Leguizamón, H. Gálvez, A. Vallejo, M. Pinedo, L. Castellanos, J. Shostell, & D. Álvarez. *in press*. Molecular phylogenetic of the *Aotus* genus (Platyrrhini, Cebidae). *International Journal of Primatology*.
- Ruiz-Herrera, A., F. García, M. Aguilera, M. García, & M. Ponsa-Fontanals.** 2005. Comparative chromosome painting in *Aotus* reveals a highly derived evolution. *American Journal of Primatology* 65:73-85.
- Smith, N. J.** 1978. Human exploitation of terra firme fauna in Amazonia. *Ciencia e Cultura* 30(1):17-23.
- Southwick, C. H.** 1986. Report of the American Society of Primatologists Subcommittee on the Status of Primates in the Wild. *American Journal of Primatology* 10(4):371-378.
- \_\_\_\_\_, & M. F. Siddiqi. 2001. Status, conservation and management of primates in India. In: A. K. Gupta (editor), *Non-human primates of India*, ENVIS bulletin: Wildlife and protected areas, Volume 1. Wildl Inst India, Dehradun, India 81-91 pp.
- Suárez, C. F., M. E. Patarroyo, E. Trujillo, M. Estupiñan, J. E. Baquero, C. Parra, & R. Rodríguez.** 2006. Owl monkey MHC-DRB exon 2 reveals high similarity with several HLA-DRB lineages. *Immunogenetics* 58(7):542-558.
- Tamayo, O., N. Pinilla, H. Gómez, & O. González.** 2005. Caracterización de la dinámica ambiental, social, económica y cultural de la cuenca alta del río Calderón. Fundación Cerva Viva - Corpoamazonia, Leticia, Amazonas. 187 p.
- Ter Steege, H., N. C. A. Pitman, D. Sabatier, H. Castellanos, P. Van Der Hout, D. C. Daly, M. Silveira, O. Phillips, R. Vasquez, T. Van Andel, J. Duivenvoorden, A. A. De Oliveira, R. Ek, R. Lilwah, R. Thomas, J. Van Essen, C. Baider, P. Maas, S. Mori, J. Terborgh, P. Nunez, H. Mogollón, & W. Morawetz.** 2003. A spatial model of tree alpha-diversity and tree density for the Amazon. *Biodiversity and Conservation* 12(11):2255-2277.
- Thomas, L., S. T. Buckland, E. A. Rexstad, J. L. Laake, S. Strindberg, S. L. Hedley, J. R. B. Bishop, T. A. Marques, and K. P. Burnham.** 2010. Distance software: design and analysis of distance sampling surveys for estimating population size. *Journal of Applied Ecology* 47:5-14.

Recibido: enero 31 de 2011.

Aceptado para su publicación: julio 7 de 2011.

# HERPETOFAUNA DE LOS HUMEDALES LA BOLSA Y CHARCO DE ORO, ANDALUCÍA, VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA

Raúl Pedroza-Banda<sup>1</sup>, Teddy Angarita-Sierra<sup>2</sup>

## Resumen

**Pedroza-Banda R., T. Angarita Sierra:** Herpetofauna de los humedales La Bolsa y Charco de Oro, Andalucía, Valle del Cauca, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **35** (135): 243-260, 2011. ISSN 0370-3908.

Durante marzo y junio del año 2010 se caracterizaron los ensambles de anfibios y reptiles de los humedales Charco de Oro y La Bolsa ubicados en el municipio de Andalucía (Valle del Cauca, Colombia). Se registradas nueve especies de anfibios y siete de reptiles, otras dos especies más fueron registradas en los alrededores. La riqueza de especies de anfibios fue mayor en la época seca mientras que la de reptiles se mantuvo igual durante las dos épocas de muestreo pero variando su composición.

**Palabras clave:** anfibios, reptiles, conservación, humedal, Valle del Cauca.

## Abstract

In march and june of 2010 a characterization the amphibian and reptile faunas was carried out in the wetlands of Charco de Oro and La Bolsa in the municipality of Andalucía, Department of Valle del Cauca, Colombia. In the study were recorded nine species of amphibians and seven of reptiles. In addition were recorded two other reptiles species in vicinities near to the wetlands. The richness of amphibians was higher during the dry season and the reptiles were equal but its composition changed.

**Key words:** amphibians, reptiles, conservation, wetland, Valle del Cauca.

<sup>1</sup> Laboratorio de anfibios, Universidad Nacional, Instituto de Ciencias Naturales. Correo electrónico: pedrozabanda@gmail.com

<sup>2</sup> Yoluka ONG Fundación de investigación en biodiversidad y conservación. Correo electrónico: teddy.angarita@yoluka.org



## Introducción

En Colombia, los humedales son uno de los ecosistemas que han sufrido mayor reducción en su extensión, resultado del modelo de explotación, extracción e invasión destructiva en los últimos cincuenta años. Este modelo de desarrollo se ha alimentado con la expansión agresiva de la ganadería extensiva sobre los bosques, sabanas y valles aluviales, y con la presión y fragmentación de los ecosistemas por los monocultivos de caña de azúcar y palma de aceite entre otros (Mora-Fernández & Angarita-Sierra 2010). Las políticas gubernamentales de regulación de ríos y adecuación de tierras, y particularmente las dirigidas al mejoramiento de terrenos mediante drenaje y canalización para facilitar el establecimiento de cultivos, han propiciado e incentivado el deterioro, fragmentación y pérdida de los ecosistemas de humedales en Colombia. (Ministerio del Medio Ambiente-Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt 1999).

En el valle del Cauca es particularmente notorio este fenómeno, como lo describen Restrepo & Naranjo (1987) quienes presentan un recuento histórico de los humedales en este departamento, registrando la desaparición del 87,7% de estos en el periodo 1950 a 1987.

Dentro de los estudios relevantes de la herpetofauna del Valle del Cauca se cuentan los de Katan (1984), Castro & Katan (1991) para los anfibios y Castro (1991) para los reptiles y más recientemente el de Castro-Herrera & Vargas-Salinas (2008) y el de Bolívar-García & Castro-Herrera (2009) para los humedales dentro de lo que es denominado por ellos como el valle interandino del Río Cauca. Estos registros parten de la recopilación de información de museos que poseen registros de hace más de cuarenta años y podrían no reflejar la riqueza actual de especies, y menos aún, las especies que se han visto afectadas en las últimas décadas por el rápido crecimiento del sector agroindustrial, especialmente el cañero.

El presente trabajo hace referencia a los resultados obtenidos en la caracterización de la herpetofauna de los humedales Charco de Oro y La Bolsa hechos durante los periodos seco y húmedos del año con el objetivo de determinar la representatividad de la fauna de anfibios y reptiles de estos humedales a nivel regional y cómo esta fauna hace uso del hábitat.

## Área de estudio

El estudio se adelantó en los humedales Charco de Oro y La Bolsa, ubicados en el corregimiento Campo Alegre en el municipio de Andalucía, departamento del Valle del

Cauca (Figura 1), el primero con un área de 2,5 Ha y el segundo con 30 Ha aproximadamente. La zona se ubica dentro del ecosistema bosque seco tropical (Bs-T) (Espinal & Montenegro 1963), con precipitación promedio de 1300 mm anuales, temperaturas superiores a los 24°C (Sandoval & Ramírez 2007) y 950 m de altitud promedio.

Ambos humedales se encuentran inmersos en una matriz de cultivos de caña de azúcar y la cobertura vegetal está dominada por pastos, sin embargo, en el humedal La Bolsa aún existen parches dominados por caña brava (*Gynerium sagittatum*, Poaceae), guadua (*Guadua angustifolia*, Poaceae) y algunos árboles dispersos haciendo que este sea más heterogéneo.

Adicionalmente se examinaron dos pequeños parches de bosques, nombrados como Sitio 1 y Sitio 2. El Sitio 1 se encuentra ubicado en la zona más rural del corregimiento Campo Alegre y el Sitio 2 en la cabecera del mismo corregimiento.

## Materiales y métodos

Los muestreos se realizaron en los meses de marzo (época seca) y junio (época húmeda) empleando tres técnicas principales, búsqueda libre sin restricciones, trampas de caída y búsqueda selectiva en hábitats (Rueda, *et al.* 2006), completando en total un esfuerzo de muestreo de 22 días hombre. Además de estas también se usaron las artes de pesca nasa y palangre dirigidos a la captura de las especies acuáticas.

Las colectas se hicieron de forma manual o con ayuda de gancho herpetológico. Los ejemplares adultos y juveniles fueron fijados en formol 10% y preservados en alcohol 70%. En el caso de las larvas, fueron fijadas y preservadas en formol 10%. La identificación de los ejemplares fue hecha basándose en las descripciones originales y comparación de ejemplares de referencia depositados en las colecciones de anfibios y reptiles del Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. El sistema de clasificación siguió a Frost (2010) para anuros, Exbrayat (2006) para cecilias, Wüster (2001) y Lehr (2002) para serpientes, Ayala & Castro (Inédito) para lagartos y Rueda-Almoacid, *et al.* (2007) para tortugas. Los ejemplares de anfibios y reptiles fueron depositados en las colecciones correspondientes del Instituto de Ciencias Naturales (ICN) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

## Análisis de datos

La representatividad de la diversidad total de especies registradas en el conjunto de humedales y para cada uno

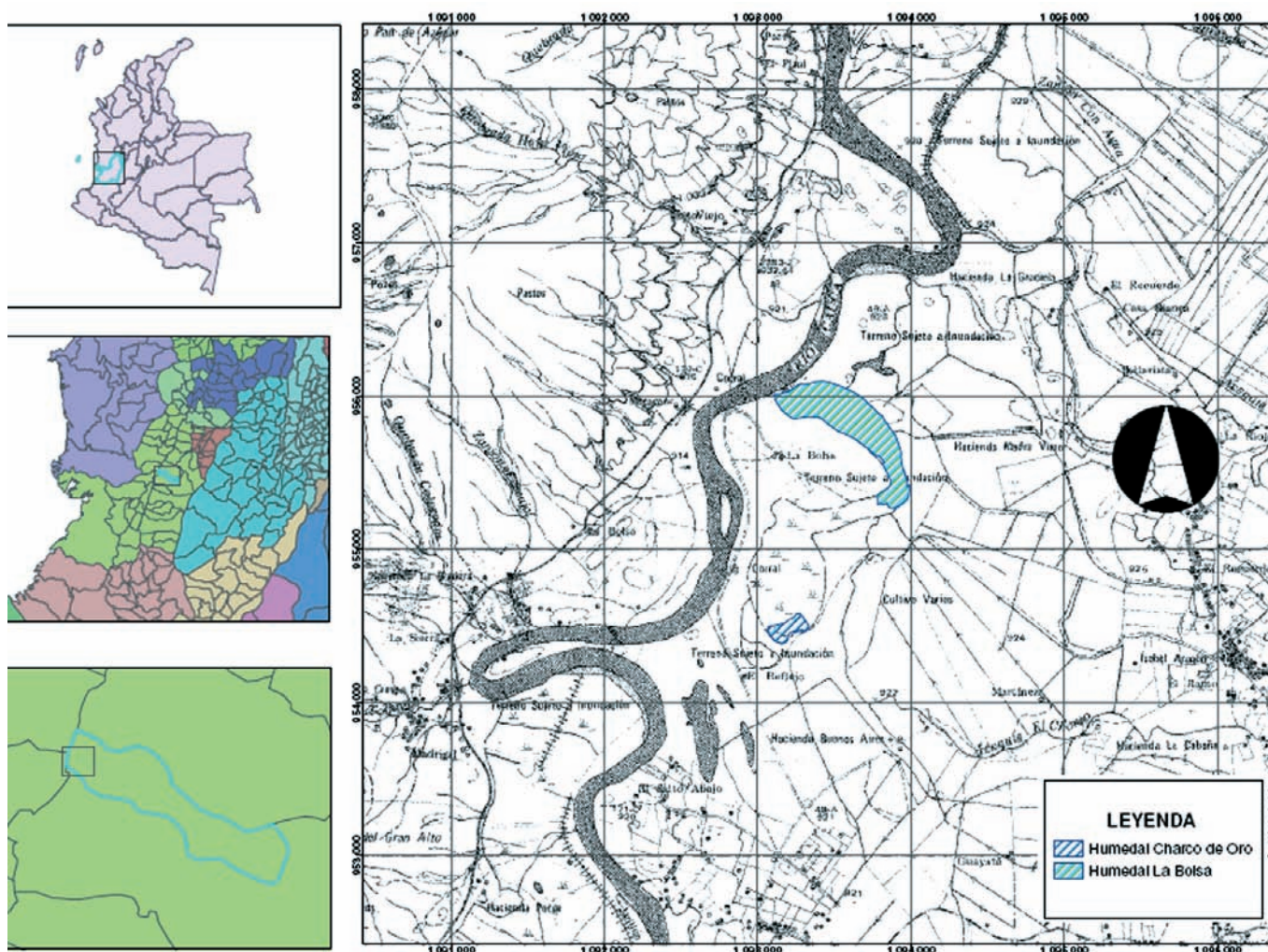


Figura 1. Área de estudio

individualmente se midió como la riqueza específica obtenida por medio de los estimadores de riqueza no paramétricos (Cáceres-Andrade & Urbina-Cardona 2009, Colwell & Coddington 1994, Magurran 2004) haciendo uso del programa Estimates (Colwell, 2006). Para el conjunto de humedales se utilizó el estimador Jackknife de primer y segundo orden, lo mismo que para el humedal La Bolsa, ya que suponen heterogeneidad entre las muestras siendo idóneas para estimar la riqueza en ambientes que están compuestos por varios hábitats como espejo de agua, vegetación acuática, potreros y relictos de bosque que conforman el área de los humedales (Cáceres-Andrade & Urbina-Cardona 2009, Colwell & Coddington 1994, Magurran 2004). Para el caso del humedal Charco de Oro se utilizó el estimador Chao de primer y segundo orden, ya que asumen homogeneidad de hábitat en las muestras, caso

que se presenta en el humedal donde la cobertura vegetal dominante son pastizales.

Con base al cálculo de la abundancia relativa se construyó una jerarquía ordinal a partir de rangos artificiales creados según la dispersión de los datos (Tabla 1). A partir

Tabla 1. Jerarquías ordinales en función de los rangos de abundancias relativas

Rango	Jerarquía
0%	No presente
<1%	Rara
1-5%	No común
5,1-15%	Frecuente
15,1-25	Común
>25%	Abundante

de estas categorías se hicieron comparaciones entre los humedales, las temporadas y por humedal y época de muestreo.

Se analizó la diversidad beta empleando el índice de complementariedad (C) propuesto por **Colwell & Coddington (1994)** entre el humedal Charco de Oro y el humedal La Bolsa.

## Resultados

### Diversidad taxonómica

En el estudio fueron detectadas en total 19 especies pertenecientes a 17 géneros y 15 familias (Tabla 2), de las cuales dos registros fueron obtenidos en las áreas urbanas del municipio Andalucía y el corregimiento Campo Alegre correspondientes a los reptiles *Hemidactylus frenatus* y la tortuga *Chelydra acutirostris* respectivamente. Además se registra por primera vez *Leptodactylus insularum*

para el departamento del Valle del Cauca. De estas, nueve corresponden a especies de anfibios pertenecientes a siete géneros de igual número de familias y diez especies de reptiles pertenecientes a igual número de géneros de ocho familias.

En el humedal Charco de Oro se detectaron diez especies en total. Siete especies corresponden a anfibios pertenecientes a los órdenes Gymnophiona (*Typhlonectes natans*) y Anura que corresponden a seis géneros y cinco familias. En cuanto a reptiles fueron detectadas tres especies pertenecientes a igual cantidad de géneros y familias (Tabla 2). También fueron colectados renacuajos de *Lithobates catesbeianus*, *Hypsiboas pugnax* y *Rhinella marina*. A su vez en el humedal La Bolsa fueron detectadas 16 especies pertenecientes a 14 géneros y 13 familias (Tabla 2). Nueve especies corresponden a anfibios, una al orden Gymnophiona (*T. natans*) y ocho al orden Anura que co-

**Tabla 2.** Categorización taxonómica y diversidad de especies de anfibios y reptiles registrados en los humedales Charco de Oro, La Bolsa y sus alrededores. La X indica registro de la especie en la localidad.

	Orden	Familia	Género	Especie	Humedal Charco de Oro	Humedal La Bolsa	Sitio 2	Sitio 1
Amphibia	Gymnophiona	Caeciliidae	<i>Typhlonectes</i>	<i>Typhlonectes natans</i>	X	X		
	Anura	Bufonidae	<i>Rhinella</i>	<i>Rhinella marina</i>	X	X	X	
		Dendrobatidae	<i>Colostethus</i>	<i>Colostethus fraterdanieli</i>		X		
		Hylidae	<i>Dendropsophus</i>	<i>Dendropsophus columbianus</i>	X	X		
			<i>Hypsiboas</i>	<i>Hypsiboas pugnax</i>	X	X		X
		Leptodactylidae	<i>Leptodactylus</i>	<i>Leptodactylus colombiensis</i>	X	X	X	
				<i>Leptodactylus fragilis</i>	X	X	X	
				<i>Leptodactylus insularum</i>		X		
Ranidae	<i>Lithobates</i>	<i>Lithobates catesbeianus</i> *	X	X	X			
Diversidad de especies de Anfibios					7	9	4	1
Reptilia	Testudines	Chelydridae	<i>Chelydra</i>	<i>Chelydra acutirostris</i>				
		Kinosternidae	<i>Kinosternon</i>	<i>Kinosternon leucostomum</i>		X		
	Squamata	Colubridae	<i>Dendrophidion</i>	<i>Dendrophidion bivittatus</i>		X		
			<i>Drymarcon</i>	<i>Drymarcon melanurus</i>				X
		Gekkonidae	<i>Gonatodes</i>	<i>Gonatodes albogularis</i>	X	X	X	X
			<i>Hemidactylus</i>	<i>Hemidactylus frenatus</i> *				
		Iguanidae	<i>Iguana</i>	<i>Iguana iguana</i>		X		
		Polychrotidae	<i>Anolis</i>	<i>Anolis auratus</i>	X	X		
		Scincidae	<i>Mabuya</i>	<i>Mabuya unimarginata</i>		X		
Teiidae	<i>Cnemidophorus</i>	<i>Cnemidophorus lemniscatus</i>	X	X				
Diversidad de especies de Reptiles					3	7	1	2
Diversidad de especies					10	16	5	3

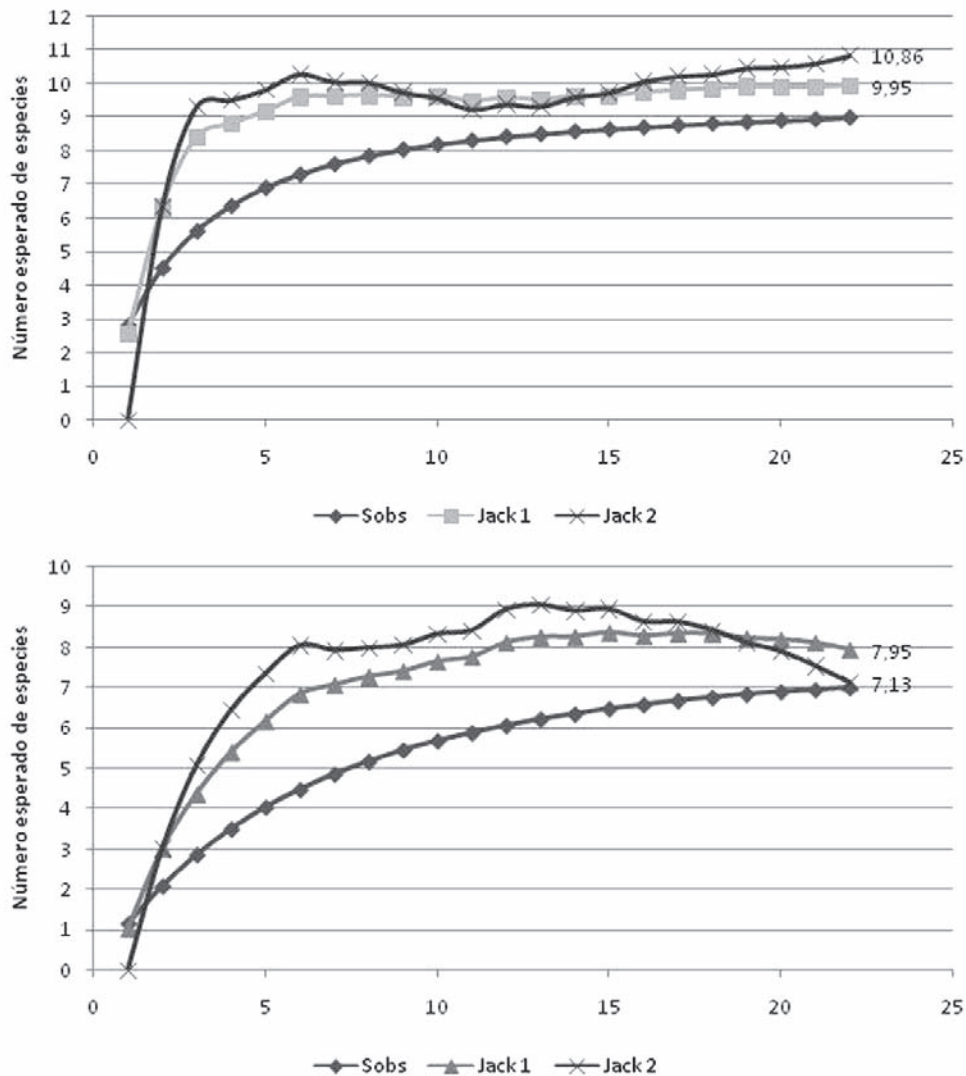
rresponden a siete géneros y cinco familias. Las especies restantes corresponden a una tortuga (*Kinosternon leucostomum*), una serpiente (*Dendrophidion bivittatus*), un geko (*Gonatodes albogularis*), una iguana y tres lagartijas, para un total de siete especies de reptiles pertenecientes a igual número de géneros y familias. También fueron colectados renacuajos de *Hypsiboas pugnax* y *Colostethus fraterdanieli* en las dos épocas.

**Diversidad**

Los estimadores empleados indican que para el conjunto de humedales Charco de Oro-La Bolsa el número de especies de anfibios está en el rango de 9,95 a 10,86 especies esperadas lo que corresponde al 90,45% de representatividad del

muestreo según el estimador Jackknife de primer orden y un 82% según el estimador Jackknife de segundo orden. En el caso de los reptiles se estima que la riqueza se encuentra en el rango de 7,13 (98,18% de representatividad) a 7,95 especies (88,05% de representatividad). Las curvas de acumulación de especies sugieren que el ensamble herpetofaunístico de los humedales como conjunto están bien representados en el muestreo (Figura 2).

Según los estimadores empleados, en el humedal Charco de Oro debe haber presente entre ocho (87,5% de representatividad) y 8,82 (79,37% de representatividad) especies de anfibios y de 3,91 (76,7% de representatividad) a 4 (75% de representatividad) especies de reptiles. De acuerdo a esto, el inventario de anfibios y reptiles aún no



**Figura 2.** Curvas de acumulación de especies de anfibios (Superior) y reptiles (inferior) registradas en el conjunto de humedales Charco de Oro-La Bolsa, Andalucía, Valle del Cauca.

se encuentra tan bien representado como lo muestra la Figura 3, aunque se observa una tendencia a alcanzar la asíntota según el estimador Chao de segundo orden.

Según los estimadores empleados se espera que en el humedal La Bolsa haya de 9,95 (90.45% de representatividad) a diez (90% de representatividad) especies de anfibios y de 7,95 (97,9% de representatividad) a 7,15 (88% de representatividad) especies de reptiles (Figura 4), cifras muy cercanas a las especies registradas durante el trabajo de campo. Esto se hace evidente con la forma asintótica que toman las curvas de acumulación de especies generadas con los estimadores Jackknife de primero y segundo orden, indicando que el muestreo del ensamble

herpetofaunístico en este humedal se encuentra bien representado.

Para el Sitio 1 se registraron cinco especies, cuatro de anfibios del orden Anura pertenecientes a cuatro géneros e igual número de familias y una especie de reptil perteneciente a la familia Gekkonidae (Tabla 2). En el Sitio 2 fueron detectadas tres especies, una especie de anfibio del orden Anura y dos especies de reptiles, el geco *G. albogularis* y la serpiente *Drymarcon melanurus* (Tabla 2).

La estimación de la diversidad beta con el índice de complementariedad entre los dos humedales arrojó un valor de 41,18.

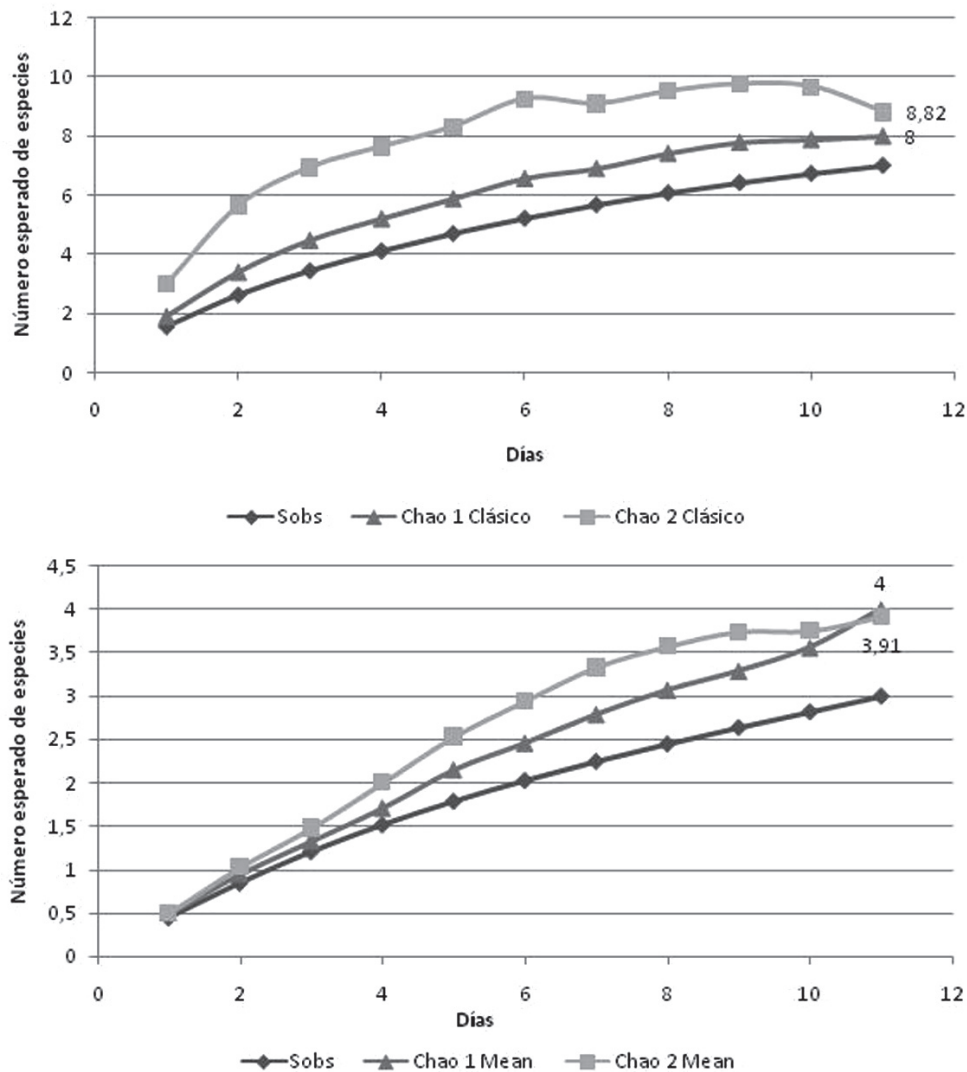


Figura 3. Curvas de acumulación de especies de anfibios (superior) y reptiles (inferior) registrados en el humedal Charco de Oro.

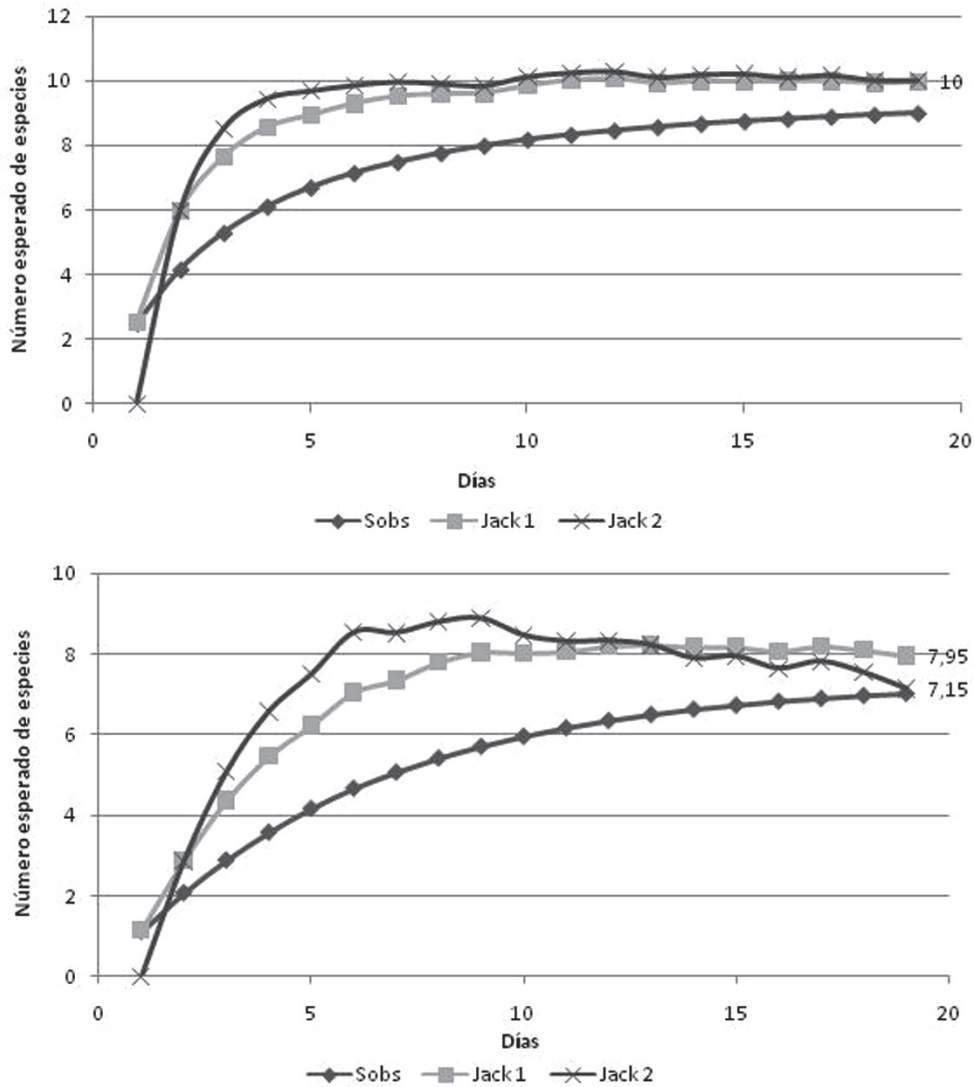


Figura 4. Curvas de acumulación de especies de anfibios y reptiles registrados en el humedal La Bolsa.

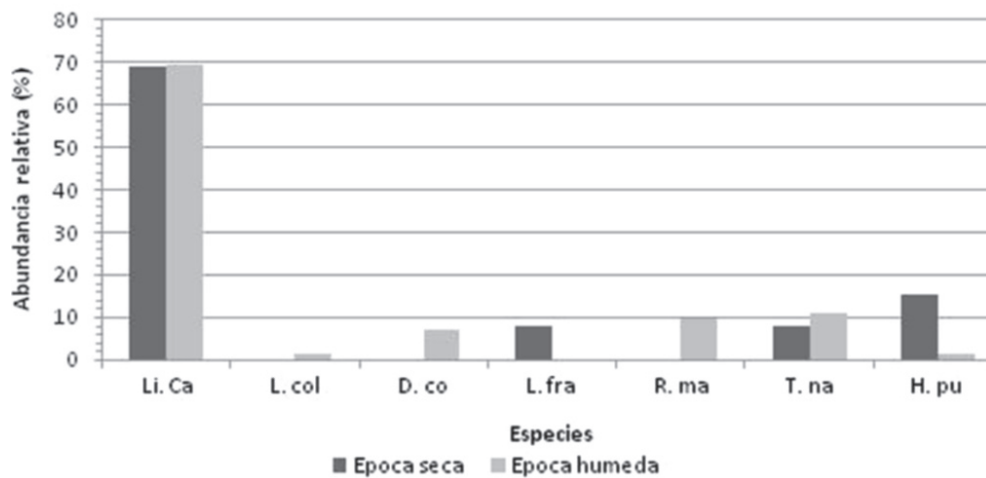
### Variación temporal de la riqueza y abundancia

En general la riqueza de especies de anfibios en el humedal Charco de Oro aumentó durante la época húmeda, pasando de cuatro especies a seis, detectando tres nuevas especies para esta localidad, *Leptodactylus colombiensis*, *Rhinella marina* y *Dendrosophus columbianus*.

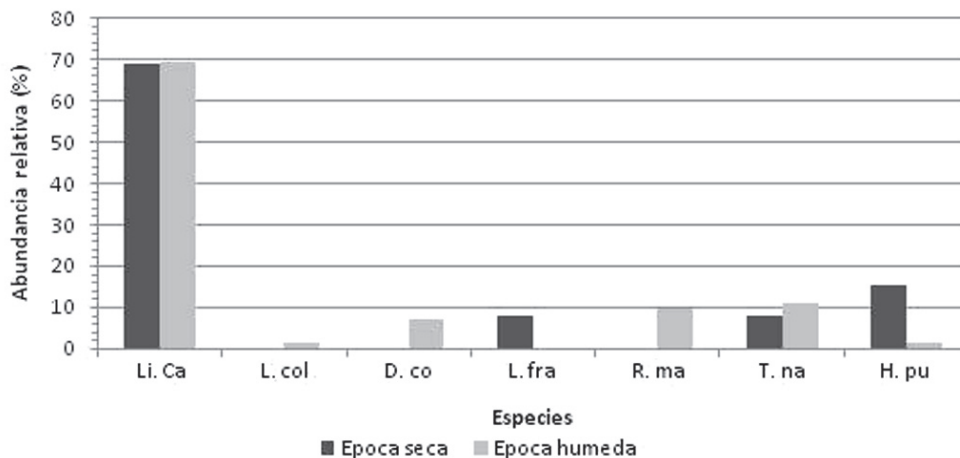
En la época seca solo *Lithobates catesbeianus* fue abundante, las especies restantes (*L. fragilis*, *T. natans* e *Hypsiboas pugnax*) fueron frecuentes. En la época húmeda nuevamente *Li. catesbeianus* fue abundante, *D. colombianus*, *R. marina* y *T. natans* fueron frecuentes, *L.*

*colombiensis* e *H. pugnax* fueron no comunes y *L. fragilis* no fue detectada (Figura 5).

La riqueza de especies de reptiles en el humedal Charco de Oro se mantuvo a través de las épocas de muestreo aunque hay que anotar que *Gonatodes albogularis* no fue detectada en la época seca y *Cnemidophorus lemniscatus* no se detectó en la época húmeda. *Anolis auratus* fue la única especie registrada durante los dos periodos conservando su categoría de abundante aunque presentó un ligero declive en su abundancia absoluta en el periodo húmedo (Figura 6).



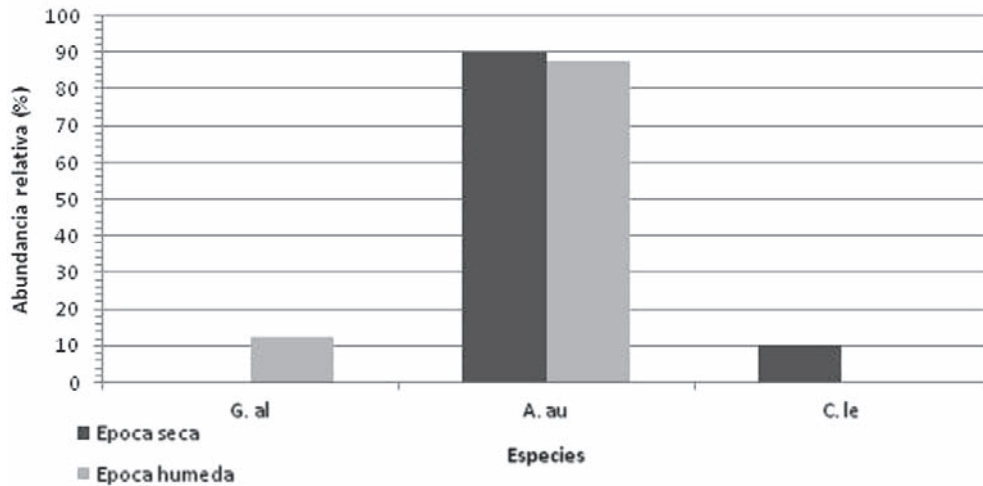
**Figura 5.** Abundancias relativas de las especies de anfibios registradas en el humedal Charco de Oro. Li. Ca = *Lithobates catesbeianus*, L. col = *Leptodactylus colombiensis*, D. co = *Dendropsophus columbianus*, L. fra = *Leptodactylus fragilis*, R. ma = *Rhinella marina*, T. na = *Typhlonectes natans*, H. pu = *Hypsiboas pugnax*.



**Figura 6.** Abundancias relativas de las especies de anfibios registradas en el humedal La Bolsa. Li. Ca = *Lithobates catesbeianus*, L. col = *Leptodactylus colombiensis*, D. co = *Dendropsophus columbianus*, L. fra = *Leptodactylus fragilis*, C. ft = *Colostethus fraterdanieli*, L. in = *Leptodactylus bolivianus*, R. ma = *Rhinella marina*, T. na = *Typhlonectes natans*, H. pu = *Hypsiboas pugnax*.

En el humedal La Bolsa la riqueza de anfibios disminuyó de nueve especies durante la época seca a siete en la época húmeda. En la época seca *D. columbianus* y *T. natans* fueron abundantes, *Li. catesbeianus*, *L. colombiensis* y *L. fragilis*, fueron frecuentes, *C. fraterdanieli*, *L. insularum*, *R. marina* e *H. pugnax* fueron no comunes. En la época húmeda *D. columbianus* y *C. fraterdanieli* fueron abundantes, *Li. catesbeianus* e *H. pugnax* fueron frecuentes, *L. colombiensis*, *L. fragilis* y *R. marina* fueron no comunes, mientras que *L. insularum* y *T. natans* no estuvieron presentes en este periodo (Figura 7).

La riqueza de reptiles fue de seis especies en ambas épocas, pero su composición fue diferente. En la época seca *G. albogularis*, *A. auratus*, *Iguana iguana* y *K. leucostomum* fueron comunes en tanto que *Cn. lemmiscatus* y *Mabuya unimarginata* fueron frecuentes. En la época húmeda a diferencia de la anterior no se detectó *K. leucostomum* pero se encontró *D. bivittatus* que fue una especie relativamente común. Las abundancias relativas de todas las especies disminuyeron, excepto *G. albogularis* que conservó su categoría de abundante durante los dos periodos de muestreo pero esta abundancia se triplicó durante las lluvias, del 25%



**Figura 7.** Abundancias relativas de las especies de reptiles registradas en el humedal Charco de Oro. G. al = *Gonatodes albogularis*, A. au = *Anolis auratus*, C. le = *Cnemidophorus lemniscatus*.

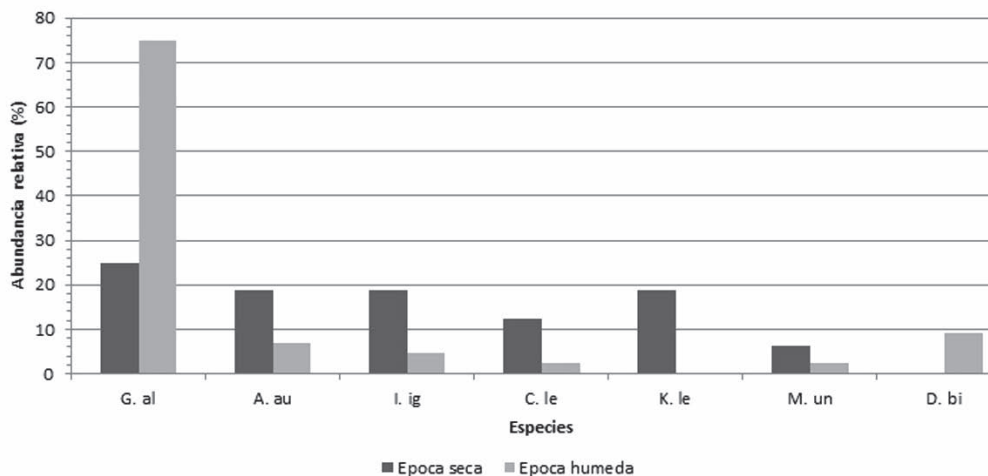
en la época seca al 75% en la época de lluvias (Figura 8), además se obtuvo registro de huevos.

**Comparación entre humedales**

En términos generales el humedal La Bolsa fue el más rico en todas las categorías taxonómicas excepto a nivel de familia en anfibios, donde el índice de riqueza fue igual al del humedal Charco de Oro. La diferencia más notable fue en el ensamble de reptiles, para el que el índice de riqueza de especies, géneros y familias en el humedal La Bolsa fue de siete respecto a tres en el humedal Charco de Oro en todas las categorías taxonómicas (Figura 9). En cuanto a anfibios las diferencias a

nivel de especie fue de 2 unidades del índice de riqueza y una unidad a nivel de género.

Al hacer comparaciones entre los dos humedales en la época seca se pueden observar diferencias claras en las abundancias relativas de especies en cada uno. Mientras en Charco de Oro *Li. catesbeianus* es claramente la especie con mayor abundancia (13 veces más abundante que en La Bolsa) seguida por *H. pugnax* (común), *L. fragilis* y *T. natans*, estas dos últimas con abundancias iguales categorizadas como frecuentes; en La Bolsa la especie más abundante fue *T. natans* seguida por *D. columbianus* (abundante), *L. colombiensis* y *L. fragilis*, estas dos últimas tan abundantes



**Figura 8.** Abundancias relativas de las especies de reptiles registradas en el humedal La Bolsa. G. al = *Gonatodes albogularis*, A. au = *Anolis auratus*, I. ig = *Iguana iguana*, C. le = *Cnemidophorus lemniscatus*, K. le = *Kinosternon leucostomum*, M. un = *Mabuya unimarginata*, D. bi = *Dendrophidion bivittatus*



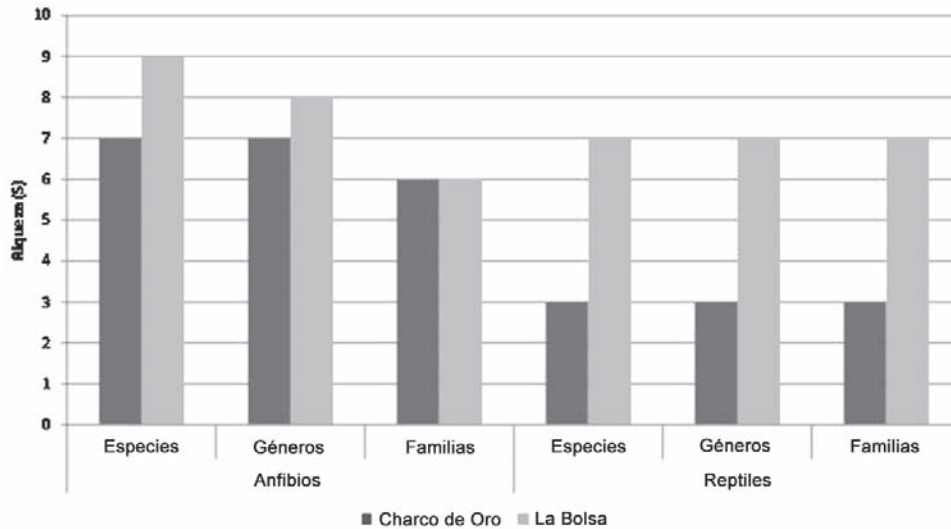


Figura 9. Diversidad de las categorías taxonómicas especie, género y familia de anfibios y reptiles en los humedales La Bolsa y Charco de Oro.

como *Li. catesbeianus* categorizadas como frecuentes (Figura 10).

Durante esta época los reptiles en Charco de Oro solo fueron representados por dos especies, *A. auratus* la especie dominante con el 90% de abundancia y *Cn. lemniscatus* con categoría de frecuente. En La Bolsa la única especie con categoría de abundante fue *G. albigularis*, seguida de especies comunes (*A. auratus*, *I. iguana* y *K. leucostomum*) y frecuentes (*Cn. lemniscatus* y *M. unimarginata*). Es de resaltar que de las dos especies de

reptiles compartidas por los humedales (*Cn. lemniscatus* y *A. auratus*) muestran abundancias similares a pesar de la notoria diferencia en disponibilidad de hábitats y coberturas vegetales entre estos (Figura 11).

Al igual que en el anterior periodo, durante la época de lluvias la especie que abundó en el humedal Charco de Oro fue *Li. catesbeianus*, ocho veces más que en el humedal La Bolsa, seguida de especies frecuentes como *T. natans*, *R. marina* y *D. columbianus* y las especies no comunes *L. colombianensis* e *H. pugnax*. En contraste en el humedal La

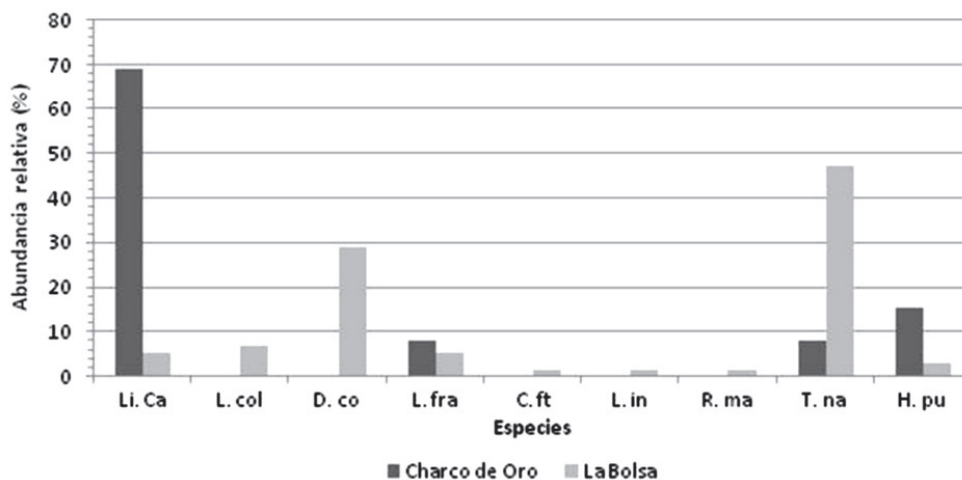
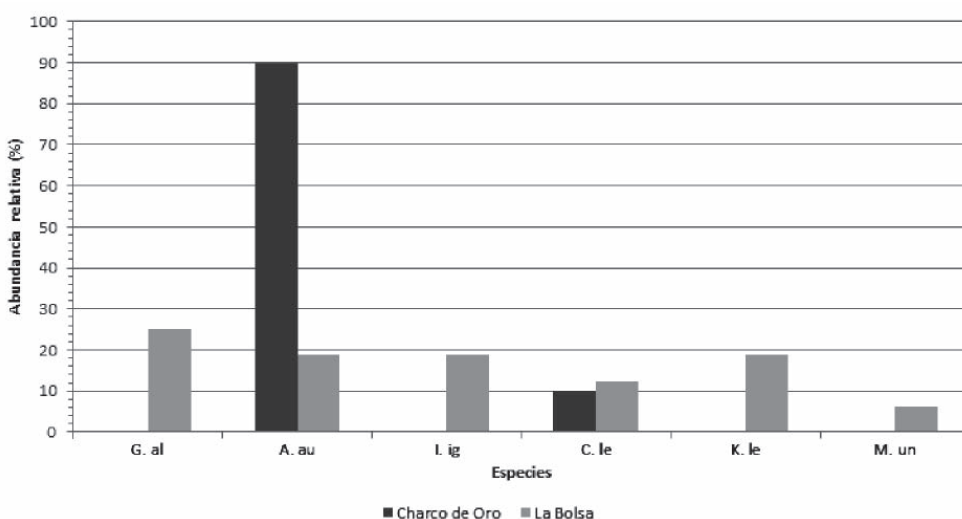


Figura 10. Abundancias relativas de las especies de anfibios registradas en los humedales Charco de Oro y La Bolsa durante la época seca. Li. Ca = *Lithobates catesbeianus*, L. col = *Leptodactylus colombianensis*, D. co = *Dendropsophus columbianus*, L. fra = *Leptodactylus fragilis*, C. ft = *Colostethus fraterdanieli*, L. in = *Leptodactylus bolivianus*, R. ma = *Rhinella marina*, T. na = *Typhonectes natans*, H. pu = *Hypsiboas pugnax*.

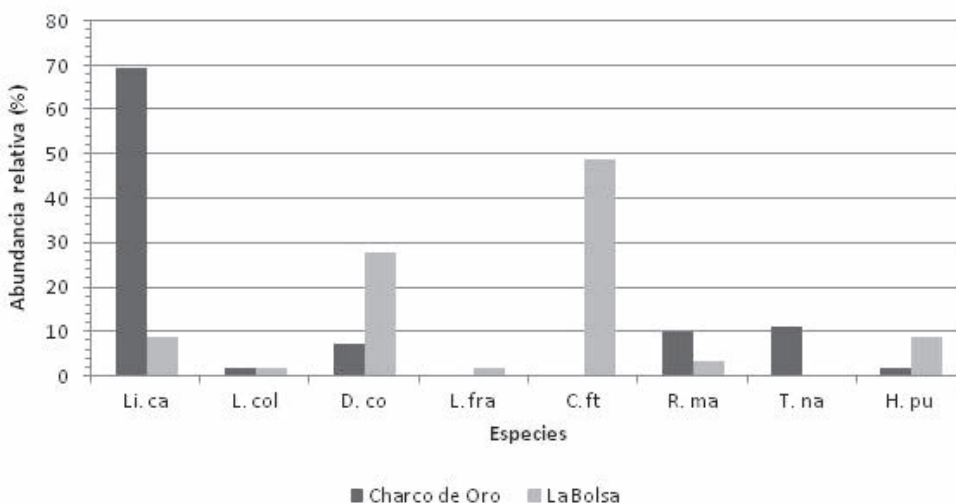


**Figura 11.** Abundancias relativas de especies de reptiles registradas en los humedales Charco de Oro y La Bolsa durante la época seca. G. al = *Gonotodes albogularis*, A. au = *Anolis auratus*, I. ig = *Iguana iguana*, C. le = *Cnemidophorus lemniscatus*, K. le = *Kinosternon leucostomum*, M. un = *Mabuya unimarginata*.

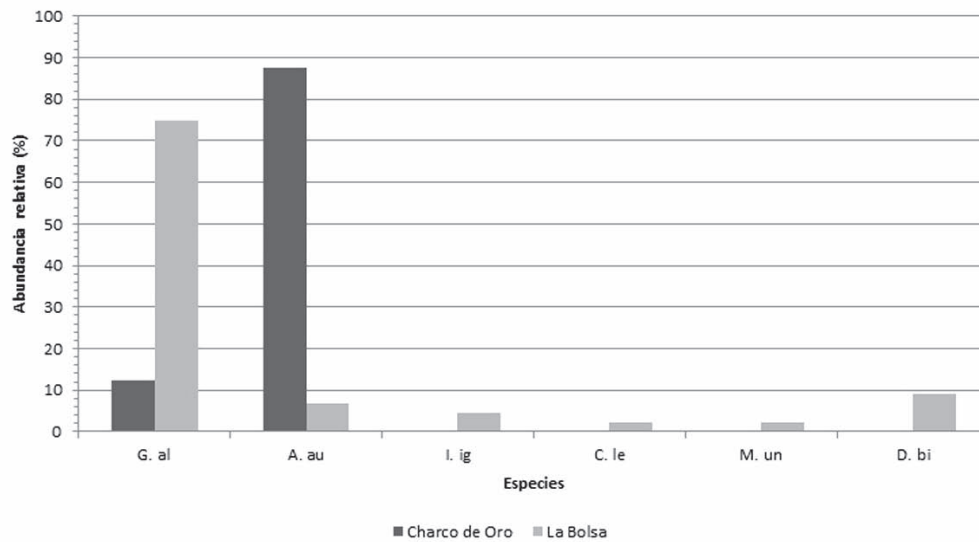
Bolsa, *C. fraterdanieli* y *D. columbianus* fueron abundantes seguidas de *Li. catesbeianus* e *H. pugnax* un par de especies frecuentes y *R. marina*, *L. colombiensis* y *L. fragilis* especies no comunes (Figura 12). Ninguna de las especies de anfibios tuvo representatividad similar en ambos humedales.

En el humedal Charco de Oro la especie abundante dentro de la muestra obtenida del ensamble de reptiles en la

época de lluvias fue *A. auratus* seguida por *G. albogularis* categorizada como frecuente. Para el ensamble de reptiles del humedal La Bolsa, la muestra obtenida presenta una mayor heterogeneidad en la que *G. albogularis* fue abundante, seguida por *Dendrophidion bivittatus* y *Anolis auratus* como especies frecuentes e *I. iguana*, *Cn. lemniscatus* y *M. unimarginata* como especies no comunes (Figura 13).



**Figura 12.** Abundancia relativa de especies de anfibios registrados en los humedales Charco de Oro y La Bolsa durante la época húmeda. Li. Ca = *Lithobates catesbeianus*, L. col = *Leptodactylus colombiensis*, D. co = *Dendropsophus columbianus*, L. fra = *Leptodactylus fragilis*, C. ft = *Colostethus fraterdanieli*, R. ma = *Rhinella marina*, T. na = *Typhlonectes natans*, H. pu = *Hypsiboas pugnax*.



**Figura 13.** Abundancias relativas de especies de reptiles registrados en los humedales Charco de Oro y La Bolsa durante la época húmeda. G. al = *Gonatodes albogularis*, A. au = *Anolis auratus*, I. ig = *Iguana iguana*, C. le = *Cnemidophorus lemniscatus*, M. un = *Mabuya unimarginata*, D. bi = *Dendroph*

## Discusión

### Humedal Charco de Oro

Se puede considerar que el estimador Chao 2 está sobreestimando la riqueza de este humedal tal vez por el aumento constante e incesante de las especies “únicas” (especies que aparecen en una sola muestra) como *L. fragilis*, *L. colombiensis*, *R. marina* y *G. albogularis* y duplicadas (especies que aparecen en dos unidades muestrales). En cambio el número de especies “sencillas” (especies representadas por un solo individuo) es menor respecto a número de especies “únicas” y no hay especies “dobles” (especies representadas por dos individuos). En ese orden de ideas, podría considerarse bien representado el ensamble herpetofaunístico dentro del muestreo tomando como referencia el estimador Chao 1. En cualquier caso se podría considerar que las especies no detectadas en este humedal corresponden a especies que se detectaron en el humedal La bolsa, si tenemos en cuenta que a nivel de paisaje las curvas de acumulación de especies muestran una buena representación del ensamble herpetofaunístico en el muestreo (Figura 2).

El aumento en la diversidad de especies durante la época húmeda era de esperarse, ya que los ambientes acuáticos son hábitats ideales para la reproducción de los anfibios que componen este ensamble. La alta humedad del ambiente provista por las lluvias puede ser necesaria para las migraciones desde los hábitats terrestres a los sitios de

apareamiento (Palis 1997, Semlitsch, 1985) y a menudo los desplazamientos desde y hacia los sitios de apareamiento son afectados por las lluvias (Marsh, 2000). Por lo tanto las lluvias brindan las condiciones necesarias para que las especies que no fueron registradas durante la época seca se pudieran desplazar hasta este o las que habitaban el lugar variaran su abundancia y distribución local, ya que aun a escalas pequeñas, la humedad del suelo y la disponibilidad de sitios de refugio húmedos pueden ser importantes determinantes para ello (Wells 2007).

La dominancia de *Li. catesbeianus* evidencia el alto grado de intervención al que está sometido el humedal. La sustitución de los bosques naturales por el monocultivo de caña de azúcar han producido márgenes con áreas abiertas y libres de vegetación arbórea con abundante vegetación herbácea, hábitats preferidos por esta rana (Rueda-Almonacid, 1999). Estas condiciones favorecen la proliferación de *Li. catesbeianus* provocando la alta abundancia registrada en este humedal. La relativa estabilidad en su abundancia a través del tiempo en condiciones ambientales tan diferentes demuestra que es una población que se encuentra muy bien establecida en esta localidad y su tamaño no está siendo controlado o afectado por ningún factor biótico o abiótico.

La relativa estabilidad en la abundancia de *A. auratus* en las dos épocas del año se debe a la gran plasticidad y tolerancia ecológica que presenta esta especie ante la perturbación antrópica, mostrando que sus requerimientos de

hábitat no son exigentes. *Anolis auratus* es abundante en áreas abiertas y principalmente perchan sobre la vegetación herbácea (Ortleb & Heatwole 1965), que para el caso del humedal Charco de Oro es la cobertura vegetal predominante, dando lugar a una gran disponibilidad de hábitat para esta especie.

La ausencia de *Cn. lemniscatus* en la muestra de la época húmeda probablemente es debida a su gran capacidad de mimetismo con la vegetación y a los métodos de muestreos empleados en esta época, por lo que no fue posible detectar más individuos.

### Humedal La Bolsa

La composición de anfibios encontrada en estos humedales concuerda con la de ensambles de tierras bajas colombianas, particularmente ensambles de bosques secos. Dentro de estos ensambles *L. insularum* (Lynch, 2006) es un elemento típico y en Colombia se ha reportado en los departamentos Antioquia, Arauca, Atlántico, Bolívar, Caldas, Cesar, Córdoba, Cundinamarca, Huila, Magdalena, Meta, Norte de Santander, San Andrés, Santander, Sucre y Tolima (Acosta-Galvis, 2000, Armesto, et al. 2009, Barriga-Bonilla, et al. 1969, Lynch 2006, Ruiz-Carranza, et al. 1996) y adicionalmente en La Guajira. El registro de esta especie en el humedal La bolsa es el primero documentado para el departamento del Valle del Cauca constituyéndose en el registro más sureño en la Región Pacífica y de esta manera se reporta la extensión de su rango de distribución.

La disminución de la riqueza específica en la época húmeda es algo inesperado. Se podría asociar la ausencia de *T. natans* en esta época al aumento en la degradación de su hábitat debido al incremento en las descargas de aguas negras dentro del humedal, diezmando su población a pesar de que al parecer las especies de *Typhlonectes* no tienen altos requerimientos en la calidad del agua (Hofer, 2000) y en especial esta especie que parece prosperar en aguas eutroficadas y hábitats urbanizados (Gower & Wilkinson, 2005). No se considera la colecta como una causa de la falta de registro en el segundo periodo de muestreo de esta especie, ya que además de ser una especie muy común se ha documentado ampliamente que la colecta científica a largo o corto plazo no es una amenaza para las poblaciones de cecilias (Gower & Wilkinson, 2005).

Dos de las tres especies que no variaron su abundancia relativa son *Li. catesbeianus* y *R. marina*, siéndola *Li. catesbeianus* una especie invasora, esta estabilidad nos hace pensar que esta especie presenta poblaciones bien

establecidas, característica típica de especies foráneas en nuevos hábitats, debido a la carencia de predadores, fuertes competidores y limitantes ambientales extremas que alteren su dinámica poblacional. Por su parte *D. columbianus* no compite por espacio con alguna otra especie de anfibio del humedal por lo que su población es de gran tamaño, conspicua y siempre ocupa la vegetación flotante donde forma grandes coros. Sin embargo, sus abundancias se podrían ver afectadas en el futuro cercano, debido al incremento de la potrerización y desecación de los humedales para el cultivo de caña, al reducir de forma dramática su hábitat.

El aumento de la abundancia relativa de *C. fraterdanieli* en la época húmeda se interpreta como un artefacto del método de muestreo durante la época húmeda, ya que durante el periodo seco estos habitaban entre la hojarasca de la caña brava que era de difícil acceso para el muestreo con métodos activos. Por lo tanto durante el segundo periodo se emplearon métodos pasivos como las trampas de caída que resultaron muy efectivos en la colecta de ejemplares de esta especie.

Las tortugas no son especies de fácil detección, sin embargo *K. leucostomum* fue detectada entre la hojarasca de cañabrava, un ambiente difícil de muestrear. De acuerdo con los pobladores del área, desde el incremento en las descargas de aguas residuales en el humedal durante las lluvias, las tortugas han migrado aguas arriba por los canales que alimentan el humedal. Estas emigraciones provocan que la densidad de las poblaciones de esta especie disminuya aumentando la dificultad en su detección.

Los principales factores que afectan la probabilidad de detección de serpientes son el tamaño de la población y la temporada del año, ya que en esta varían factores como la radiación, temperatura, humedad en el aire y humedad del suelo (Kéry, 2002). La detección de *D. bivittatus* solo en la época húmeda indica que esta especie tiene actividad estacional por las limitaciones que impone la temporada seca. Más que migrar o entrar en aletargamiento, como lo hacen muchas aves o mamíferos, las serpientes, como otros ectotermos, usualmente permanecen inactivas durante periodos en que la presa es escasa, las temperaturas son extremas o las condiciones son áridas (Green, 1997). Este sería el caso de *D. bivittatus*, variando sus actividades estacionalmente, al igual que otras serpientes tropicales que inician su periodo de cacería cuando las lluvias fuertes incitan densas agregaciones de ranas u otros organismo que hace parte de su dieta (Green, 1997). Sin embargo los escasos registros de serpientes para las dos épocas muestreadas, son observaciones peculiares cuando al parecer están presentes las condiciones ambientales necesarias para

soportar taxones de serpientes de tierras bajas, con requerimientos de hábitat no exigentes. Esto sugiere que se deben realizar estudios más detallados que fijen su atención en la detección de serpientes y en los factores que están afectando su detección o presencia en estos humedales.

### Diversidad beta

La complejidad de la estructura del humedal La Bolsa hace que ofrezca mayor cantidad de nichos que pueden ser ocupados por distintas especies, esto explica su mayor diversidad genérica y específica. Es decir, esta diversidad no refleja historias separadas de las dos áreas, sino el efecto de las actividades humanas sobre ellas, siendo el humedal Charco de Oro el más afectado. Evidencia de ello es la dominancia de *Li. catesbeianus* en ambas épocas del año y la ausencia total de especies que habitan vegetación arbórea y arbustiva en el humedal Charco de Oro, como *C. fraterdanieli* que se confina al piso del bosque entre la hojarasca (Grant & Castro, 1998), *I. iguana* que la mayor parte del tiempo habita el dosel del bosque, *M. unimarginata* también es habitante de la hojarasca y *D. bivittatus* con hábitos semi-arborícolas (Savage, 2002). Otra evidencia de ello son las especies que solo habitan el humedal Charco de Oro durante la época húmeda, ya que solo en esta temporada se dan las condiciones adecuadas para su desarrollo y supervivencia, caso de las especies *G. albogularis* y *D. columbianus*.

Si tenemos en cuenta que estos dos humedales conformaban un solo sistema donde el humedal Charco de Oro tenía conexión directa con el Río Cauca y estaba físicamente unido al humedal La Bolsa (Núñez & Madero, 2009), es evidente que el índice de complementariedad debería ser bajo, más aun que el resultado obtenido, ya que al pertenecer al mismo sistema y ser tan cercanos el uno al otro sus ensamblajes herpetofaunísticos deberían complementarse menos. Pero este resultado muy probablemente está influenciado por el hecho de que las especies más sensibles (a pesar ser resistentes a la alteración del hábitat) a la presión antrópica ya han desaparecido del humedal Charco de Oro.

### Representatividad a nivel regional

Según Castro-Herrera & Vargas-Salinas (2008) para la región denominada por ellos como el valle interandino del Río Cauca se encuentran reportadas 50 especies de anfibios y reptiles de las cuales once son especies introducidas. En un estudio más reciente, hecho específicamente para los ecosistema de humedal del departamento del Valle del Cauca se adicionan once especies nativas más (Bolívar-García & Castro-Herrera 2009) y por último

este estudio registra una especie nativa más. Esto en total correspondería a 54 especies de anfibios y reptiles nativos registrados para el valle interandino del Río Cauca y 40 para los humedales en este valle. Por lo tanto, a nivel de paisaje los humedales Charco de Oro y La Bolsa representan el 31,5% de la riqueza herpetofaunística del valle interandino del Río Cauca y el 42,5% de la riqueza de los humedales del departamento. Es decir, poco más de dos quintos de esta herpetofauna se refugia en los dos humedales y como se mencionó anteriormente, las listas de anfibios y reptiles reportadas representan un recuento histórico de la herpetofauna de la región que distan de representar su situación actual. Estos resultados quizá se acercan más a la situación real de la herpetofauna de los humedales Valle del Cauca y revelan la importancia que estos dos tienen a nivel paisajístico como reservorio.

Para el valle interandino del río Cauca del departamento del Valle del Cauca se encuentran registradas 9 especies de anuros nativos (Bolívar-García & Castro-Herrera 2009, Castro & Vargas-Salinas 2008) más *L. insularum* registrado en este estudio resultando un total de 10 anfibios nativos. De estos se registró el 70%, siendo notable la ausencia de los Strabomantidos *Pristimantis achatinus* y *P. w-nigrum* en los humedales muestreados ya que estos taxones por su modo reproductivo (desarrollo directo) son altamente sensibles a la humedad, variable de tiempo con bajos valores debido principalmente a la falta de cobertura boscosa en el área de estudio.

Los resultados obtenidos respecto a la diversidad de cecilias del ensamble de anfibios del valle interandino de río Cauca coinciden con Bolívar-García & Castro-Herrera (2009) y Castro & Vargas-Salinas (2008) donde reportan a *T. natans* como la única especie en esta área natural. Sin embargo, teniendo en cuenta la difícil detección de estas formas de anfibios, debido a los hábitos fosoriales de las especies terrestre introduciendo sesgos en los resultados y los registros reportados por Lynch (1999) para el valle del cauca, se estima que en el área y por lo tanto en el valle interandino del río Cauca pueden habitar las especies de altitudes intermedias *Cecilia occidentalis* y *Ce. subdermalis*.

De las 42 especies de reptiles nativas registradas para esta área natural y específicamente 31 para los humedales dentro de esta, 21 corresponden a serpientes asociadas a los humedales en el departamento (Bolívar-García & Castro-Herrera 2009, Castro & Vargas-Salinas 2008). De acuerdo con estos índices y como se mencionó anteriormente, es peculiar que solo se haya detectado una especie de serpiente después de 22 días de muestreo y se encuentren ausentes especies como *Oxyrhopus petola* que no

exhibe mucha fidelidad a las zonas boscosas y es común en áreas que alguna vez estuvieron cubiertas por bosques secos (Lynch 2009), *Sibon nebulata*, *Spilotes pullatus* y *Bothrops asper* que toleran la intervención humana (Vargas-Salinas & Bolaños-L 1999) y los climas secos o *Micrurus mipartitus* que también puede habitar en zonas muy secas y se asocia a asentamientos humanos (Campbell & Lamar 2004) lo que indica su tolerancia a la intervención de los ambientes naturales.

### Uso de hábitat

En general los ensambles de anfibios y reptiles están compuestos por especies que soportan altos niveles de perturbación antrópica y su presencia o ausencia en uno y otro humedal está sujeta al tipo de cobertura vegetal del área. Existe una marcada diferenciación entre la composición y abundancias de las especies presentes en los humedales La Bolsa y Charco de Oro, lo que refleja el contraste de hábitats disponibles para la fauna de anuros y su grado de homogeneidad. Mientras en La Bolsa encontramos especies frecuentes y/o abundantes en hábitats de vegetación del cuerpo de agua (*Dendropsophus colombianus*), de vegetación sumergida y fondos lodosos (*Typhlonectes natans*), de vegetación sobre la orilla de los cuerpos de agua (*Rhinella marina*, *Leptodactylus colombiensis*), de vegetación arbustiva y/o vegetación arbórea (*Colostethus freterdanieli*, *Hypsiboas pugnax*), y de potreros y vegetación herbácea (*Leptodactylus fragilis* y *L. insularum*), en el humedal Charco de Oro la dominancia está marcada por una única especie *Li. catesbeianus*, que refleja la homogeneidad del hábitat dominado exclusivamente por potreros y vegetación herbácea cerca del cuerpo de agua pero sobre todo el impacto de una especie invasora.

Otra característica que comparten estos dos humedales es que los ensambles de anfibios encontrados son característicos de ecosistemas en que hay una marcada estación seca, ejemplo de esto son los leptodactylidos encontrados que han desarrollado adaptaciones como los nidos de espuma que pueden soportar periodos de estrés hídrico (Heyer, 1969). De esto y del hecho que en el ensamble fueron encontradas especies colombianas que habitan tierras bajas como *H. pugnax*, *D. columbianus*, *A. auratus*, *Cn. lemniscatus*, *G. albogularis* y *D. bivittatus* puede inferirse que la fauna anfibia y de reptiles nativa de la zona pertenecen a ecosistemas que presentan condiciones climáticas de bosque seco tropical, ecosistemas que alguna vez existieron sobre la cuenca del Río Cauca (Peck, 2009).

La detección de larvas de *H. pugnax*, *C. fraterdanieli* y *R. marina* en ambas épocas del año indican que la estrate-

gia adoptada por estas especies es la reproducción continua a lo largo de año. De acuerdo con Rueda-Almonacid (1999) esta misma estrategia es adoptada por *Li. catesbeianus*, de la cual no fueron colectados renacuajos en la época húmeda, pero sí muchos juveniles representando la clase etaria con mayor proporción dentro de la muestra en esta época. Lo anterior puede interpretarse como una estrategia en la que la reproducción ocurre antes del periodo de las lluvias de manera que se aseguraría que hubiera suficiente alimento para los juveniles en desarrollo. De los demás anfibios no se obtuvieron indicios de actividad reproductiva. Sin embargo, el aumento de capturas de hembras adultas de *D. columbianus* en la época húmeda respecto a la seca indica que la actividad reproductiva de esta especie ocurre en la época húmeda.

Del único reptil del que se obtuvo evidencia de actividad reproductiva fue *G. albogularis*. La presencia de esta especie solo en la época húmeda en el humedal Charco de Oro pueda ser debida a un desplazamiento hasta el único sitio disponible en este humedal para efectos de reproducción y postura de huevos. Si esto se cumple y sumado a la detección de huevos en el humedal La Bolsa en la época húmeda, se podría proponer que hay una estacionalidad en la reproducción de esta especie al igual que lo documentado para una población panameña (Sexton & Turner, 1971) contrario a lo reportado por Serrano-Cardozo, et al. (2007) para una población de Santander, Colombia, apuntando a que la disponibilidad de recursos para su reproducción no es continua. A esta misma suposición se le puede atribuir su aumento en la abundancia relativa en el humedal La Bolsa durante la estación de lluvias.

### Especies introducidas

De las especies introducidas *Hemidactylus frenatus* es una especie asociada a ambientes peridomésticos que generalmente no habita en ambientes naturales y no fue encontrada en los humedales, por lo tanto no se identifica como un amenaza para la biota nativa de los humedales.

La rana toro *Lithobates catesbeianus* mostró una alta representatividad en los muestreos realizados demostrando su gran capacidad de colonización y establecimiento de poblaciones en el tiempo. Esta evidencia soporta la hipótesis de Daza-Vaca & Castro-Herrera (1999) de que eventualmente las poblaciones de anuros nativas y en especial de *Rhinella marina*, podrían verse reducidas por un posible solapamiento de nichos con *Li. catesbeianus*; provocando una disminución en la cantidad de algunos de los recursos explotados por *Rhinella marina*, que antes de la introducción de la rana toro eran más abundantes. Esto conllevaría a la competencia interespecífica entre las dos especies que según las eviden-

cias observadas, provocaría fuertemente el detrimento de las poblaciones de *Rhinella marina*.

Aparentemente la amenaza representada por la rana toro para los dos humedales es mayor para el humedal Charco de Oro que para La Bolsa, ya que por la mayor complejidad estructural de la vegetación acuática y arbustiva, el humedal La Bolsa se hace menos "atractivo" para esta rana según lo expuesto por **Rueda-Almonacid** (1999), lo que explicaría las bajas abundancias en este humedal. La rana toro representa la principal amenaza para las primeras etapas de desarrollo para la fauna invertebrada y en etapas posteriores para la ictiofauna y sobre todo para la propia fauna de anuros (**Daza-Vaca & Castro-Herrera** 1999).

### Conclusiones

El hecho de que en estos humedales se refugie poco más de dos quintos de la fauna de anfibios y reptiles en los humedales del Valle del Cauca demuestra la importancia que estos ecosistemas tienen en esta región de la cuenca del Río Cauca. El humedal La Bolsa es el que presenta mayor diversidad con la totalidad de las especies representadas en su ensamble, mayor extensión y comunicación directa con el Río Cauca, de manera que no solo funcionaria como refugio de anfibios y reptiles sino también de otra fauna como los peces que necesitan de ambiente lenticos para el desarrollo de sus larvas. Por lo tanto, en caso de que se contemple la protección de alguno de estos dos humedales bajo cualquier figura de protección de áreas, se recomienda dirigir estos esfuerzos a la conservación del humedal La Bolsa.

En la época seca del año *Li. catesbeianus* usa estos humedales para su reproducción mientras en la época de lluvias lo hace *G. albogularis* y tal vez *D. columbianus*. Las serpientes son un elemento muy escaso en estos lugares y hay una clara estacionalidad de la única especie del ensamble, cuya actividad aparentemente se restringe a la época de lluvias.

En términos generales se puede afirmar que no hay cambios en la composición de los ensamblajes en estos dos humedales y que uno de los factores que claramente influye en este fenómeno es el gran deterioro al que han sido sometidos estos cuerpos de agua causados por la introducción de especies invasoras hasta la total reducción de los bosques que alguna vez cubrieron esta área.

Por lo anterior se recomienda que se concerte con la población una línea de acción encaminada a la recuperación de la vegetación boscosa nativa y tomar medidas para controlar la proliferación de la rana toro (*L. catesbeianus*), ya que al

involucrar comunidad de Andalucía, se logrará que las estrategias de control que se adopten lleguen a buen término. Aunque en el pasado se han adelantado acciones para la introducción de esta especie en la dieta del colombiano sin alcanzar grandes logros, es hora de mirar esta especie invasora como una fuente de materia prima de proteínas para la elaboración de alimentos para animales de cría.

### Agradecimientos

Este manuscrito hace parte de los resultados obtenidos en el proyecto Formulación del Plan de Manejo y Monitoreo del Humedal Charco de Oro, Municipio de Andalucía-Valle del Cauca, realizado por Yoluka ONG, Fundación de Investigación en biodiversidad y conservación y contó con el apoyo de Ecopetrol S.A. y 2C Ingenieros S.A. A su vez agradecemos el apoyo de Jhon Infante Betancour, Arlensiu Tiboche, César Mora, John J. Mueses-Cisneros y a las instituciones Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales (ICN) y Alcaldía Municipal de Andalucía, Valle del Cauca. A Sandy Arroyo por sus observaciones y sugerencias sobre el manuscrito, John D. Lynch, Ramsés Caicedo, John Jairo y Herón Romero por su ayuda en la confirmación de las especies identificadas.

### Literatura citada

- Acosta-Galvis, A. R.** 2000. Ranas, Salamandras y Caeciliias (Tetrapoda: Anfibibia) de Colombia. *Biota Colombiana*. **1**(3):289-319.
- Armesto, O., Esteban J. B. & Torrado R.** 2009. Fauna de anfibios del municipio de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia. *Herpetotropicos*. **5**(1):57-63.
- Ayala, S. C. & Castro F.** No publicado. Saurios de Colombia-Lizards of Colombia.
- Barriga-Bonilla, E., Hernández-Camacho J., Jaramillo-T. I., Jaramillo-Mejía R., Mora-Osejo L. E., Pinto-Escobar P. & Ruiz-Carranza P. M.** 1969. La Isla de San Andrés: Contribuciones al conocimiento de su ecología, Flora, Fauna y pesca. Instituto de Ciencias Naturales - Facultad de Ciencias, Universidad Nacional, Dirección de Dibulgación Cultural. Bogotá, Colombia.
- Bolívar-García, W. & Castro-Herrera F.** 2009. Los anfibios y los reptiles. 107-115, en Corporación Autónoma Regional del Valle de Cauca, C. V. C., Humedales del valle geográfico del río Cauca: génesis, biodiversidad y conservación, Colombia.
- Cáceres-Andrade, S. P. & Urbina-Cardona J. N.** 2009. Ensamblajes de anuros de sistemas productivos y bosques en el piedemonte llanero, departamento del Meta, Colombia. *Caldasia*. **31**(1):175-194.
- Campbell, J. A. & Lamar W. W.** 2004. The venomous reptiles of the western hemisphere. Comstock Publishing Associates. New York.

- Castro, F.** 1991. Observaciones a la diversidad de los reptiles del Valle del Cauca y áreas de interés en su distribución. 324-334, En Memorias Primer Simposio Nacional de Fauna del Valle del Cauca, CVC, Gobernación del Valle del Cauca, INCIVA, Cali.
- & **Katan G.** 1991. Estado del conocimiento y conservación de los anfibios de Valle del Cauca. 310-323, en Memorias Primer Simposio Nacional de Fauna del Valle del Cauca, Cali.
- & **Vargas-Salinas F.** 2008. Anfibios y reptiles en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. *Biota Colombiana*. **9**(2):251-277.
- Colwell, R. K. & Coddington J. A.** 1994. Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B*. **345**:101-118.
- Daza-Vaca, J. D. & Castro-Herrera F.** 1999. Hábitos alimenticios de la rana toro (*Rana catesbeiana*) Anura: Ranidae, en el Valle del Cauca, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **23** (Suplemento especial):265-274.
- Espinal, L. S. & Montenegro E.** 1963. Formaciones vegetales de Colombia. Memoria explicativa sobre el mapa ecológico. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi", Editorial Canal Ramírez. Bogotá.
- Gower, D. J. & Wilkinson M.** 2005. Conservation biology of caecilian amphibians. *Conservation Biology*. **19**(1):45-55.
- Grant, T. & Castro F.** 1998. The cloud forest *Colostethus* (Anura, Dendrobatidae) of a region of the Cordillera Occidental of Colombia. *Journal of Herpetology*. **32**(3):378-392.
- Green, H. W.** 1997. Snakes: The evolution of mystery in nature. University of California Press. Berkeley & Los Angeles, California.
- Heyer, W. R.** 1969. The adaptive ecology of the species groups of the genus *Leptodactylus* (Amphibia, Leptodactylidae). *Evolution*. **23**(3):421-428.
- Hofer, D.** 2000. A short note about the status and abundance of caecilian populations. *Froglóg*. **42**:1.
- Katan, G.** 1984. Ranas del Valle del Cauca. *Cespedecia*. **13**:40-50.
- Kéry, M.** 2002. Inferring the absence of a species - A case study of snakes. *J. Wildl. Manage.* **66**(2):330-338.
- 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.
- Lynch, J. D.** 1999. Una aproximación a las culebras ciegas de Colombia (Amphibia: Gymnophiona). *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **23**(Suplemento especial):317-337.
- . 2006. The amphibian fauna in the Villavicencio region of eastern Colombia. *Caldasia*. **28**(1):135-155.
- . 2009. Snakes of the genus *Oxyrhopus* (Colubridae: Squamata) in Colombia: Taxonomy and geographic variation. *Papeís Avulsos de Zoología*. **49**(25):319-337.
- Magurran, A. E.** 2004. Measuring biological diversity. Blackwell Publishing. Oxford.
- Marsh, D. M.** 2000. Variable responses to rainfall by breeding tungara frogs. *Copeia*. **4**:1104-1108.
- Ministerio del Medio Ambiente-Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.** 1999. Humedales interiores de Colombia: Bases técnicas para su conservación y uso sostenible. Colombia.
- Mora-Fernández, C. & Angarita-Sierra T.** 2010. Una unión exitosa, Latinoamérica sostenible, especial Colombia. Edición 01. Junio-agosto 80-81.
- Núñez, C. A. & Madero E. E.** 2009. Cambios en coberturas de áreas y usos del suelo en tres humedales en el Valle del Cauca. *Acta Agronómica*. **58**(4):308-315.
- Ortleb, E. & Heatwole H.** 1965. Comments on some panamanian lizards with a key to the species from Barro Colorado island, C. Z. and vicinity. *Caribbean Journal of Science*. **5**(3-4):141-147.
- Palis, J. G.** 1997. Breeding migration of *Ambystoma cingulatum* in Florida. *Journal of Herpetology*. **31**(1):71-78.
- Peck, R. B.** 2009. La vegetación de los humedales en el tiempo. 71-76, en Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, C., Humedales del valle geográfico de río Cauca: génesis, biodiversidad y conservación, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, Cali, Valle del Cauca.
- Restrepo, C. & Naranjo L. G.** 1987. Recuento histórico de la disminución de humedales y la desaparición de aves acuáticas en el valle geográfico del río Cauca. 34-51, En Memorias III Congreso de Ornitología Neotropical, Cali, Colombia.
- Rueda-Almonacid, J. V.** 1999. Situación actual y problemática generada por la introducción de "rana toro" a Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **23**(Suplemento especial):367-393.
- , **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. & Cortez C.** 2006. Técnicas para el inventario y muestreo de anfibios: Una Compilación. 135-172, En **Angulo, A., J. V. Rueda-Almonacid, J. V. Rodríguez-Mahecha & 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.
- Sandoval, M. C. & Ramírez C.** 2007. El río Cauca en su valle alto. Un aporte al conocimiento de uno de los ríos más importantes de Colombia. Universidad del Valle - Programa Editorial Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. Santiago de Cali.
- Savage, J. M.** 2002. The amphibians and reptiles of Costa Rica: A herpetofauna between two seas. Primera edición. The University Chicago Press. Chicago.



- Semlitsch, R. D.** 1985. Analysis of climatic factors influencing migrations of the salamander *Ambystoma talpoideum*. *Copeia*. 477-489.
- Serrano-Cardozo, V. H., Ramírez-Pinilla M. P., Ortega J. E. & Cortés L. A.** 2007. Annual reproductive activity of *Gonatodes Albogularis* (Squamata: Gekkonidae) living in an anthropic area in Santander, Colombia. *South American Journal of Herpetology*. **2**(1):31-38.
- Sexton, O. J. & Turner O.** 1971. The reproductive cycle of a neotropical lizard. *Ecology*. **52**(1):159-164.
- Vargas-Salinas, F. & Bolaños-L M. E.** 1999. Anfíbios y reptiles presentes en habitats perturbados de selva lluviosa tropical en el Bajo Anchicayá, Pacífico colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **23**(Suplemento especial):499-511.
- Wells, K. D.** 2007. *The ecology and behavior of amphibians*. The University of Chicago Press. Chicago, USA.
- 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.

Recibido: noviembre 10 de 2010.

Aceptado para su publicación: mayo 11 de 2011.