

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXXV

DICIEMBRE DE 2011

NÚMERO 137

DIRECTORA DE LA REVISTA: MARGARITA PEREA DALLOS



## CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
<b>Botánica (Botany)</b>		<b>Matemáticas (Mathematics)</b>	
Novedades en Asteraceae Colombianas - I [Novelties in Colombian Asteraceae - I] <i>Santiago Díaz-Piedrahita, Betsy Viviana Rodríguez-Cabeza</i> .....	411	Descomposición mínima de un automorfismo [Minimal decomposition of an automorphism] <i>A. R. Moyano, R. M. Rubio</i> .....	485
Contribuciones a la biota liquenica foliicola de Colombia. I. Nuevos registros del genero <i>Coenogonium</i> (Ascomycota- ostropales: <i>Coenogoniaceae</i> ) [Contributions to the biota of Colombia foliicolous lichens. I. New records of genus <i>Coenogonium</i> (Ascomycota-ostropales: <i>Coenogoniaceae</i> )] <i>Nancy Mateus, Robert Lücking, Jaime Aguirre-C.</i> .....	425	<b>Medio Ambiente (Environment)</b>	
Análisis cladístico de <i>Centronia</i> (Merianieae / Melastomataceae) con base en caracteres morfológicos [A cladistic analysis of <i>Centronia</i> (Merianieae / Melastoma- taceae) based on morphological characters] <i>Humberto Mendoza-Cifuentes, José Luis Fernández-Alonso</i> .....	431	Estado del conocimiento de la biodiversidad en Colombia y sus amenazas. Consideraciones para fortalecer la interacción ciencia-política [Stage of knowledge about the biodiversity of Colombia and its threats: Considerations/Arguments to strenghten the Science-Policy interface] <i>Miguel G. Andrade Correa</i> .....	491
<b>Física (Physics)</b>		El ruido vehicular urbano: problemática agobiante de los países en vías de desarrollo [Urban traffic noise: overwhelming problem of developing countries] <i>Alberto Ramírez González, Efraín Antonio Domínguez Calle</i> .....	509
Efecto de las superficies e interfaces en las propiedades de la materia [Effect of surfaces and interfaces in the matter properties] <i>María Elena Gómez, Lorena Marín, Sandra Díez, Julio Cesar Caicedo, Marlon Villareal, Cesar Escobar</i> .....	451	Deforestación y dinámica del bosque secundario en la Amazonía colombiana 1986-2000 [Deforestation and secondary forest dynamics in the Colombian Amazon, 1986-2000] <i>Jorge Ruiz, Wilmar Cárdenas, Claudia Baquero</i> .....	531
<b>Fitopatología (Plant Pathology)</b>		<b>Vida Académica</b>	
Efecto de inductores de resistencia en plántulas de plátano Dominico-Hartón ( <i>Musa balbisiana</i> AAB) contra <i>Mycos- phaerella</i> spp. [Effect of inductors of resistance in seedlings of Dominico- Harton plantain ( <i>Musa balbisiana</i> AAB) against <i>Mycos- phaerella</i> spp.] <i>Ángela Mogollón Ortiz, Jairo Castaño Zapata</i> .....	463	<b>Informe sobre las actividades desarrolladas durante el año académico 2010-2011</b> .....	546
<b>Geología (Geology)</b>		<b>Índice General del vVolumen XXXV, Año 2011</b> .....	557
¿Existió vulcanismo cenozoico en la Sabana de Bogotá? [¿Was there cenozoic volcanism of the Sabana de Bogotá?] <i>Pedro Patarroyo, Roberto Terraza Melo</i> .....	473	<b>Índice de Autores</b> .....	560
		<b>Constitución de la Academia</b> (Members of the Academy) .....	563
		<b>Publicaciones de la Academia</b> (Publications of the Academy) .....	567

# NOVEDADES EN ASTERÁCEAS COLOMBIANAS – I

Santiago Díaz-Piedrahita<sup>1</sup>, Betsy Viviana Rodríguez-Cabeza<sup>2</sup>

## Resumen

**Díaz-Piedrahita, S., B. V. Rodríguez-Cabeza:** Novedades en Asteráceas colombianas - I. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (137): 411-424, 2011. ISSN 0370-3908.

El estudio de materiales recientemente ingresados al Herbario Nacional Colombiano (COL), permitió el hallazgo de cinco nuevas especies de asteráceas pertenecientes a los géneros *Lessingianthus* (Vernonieae, 1 especie), *Hebeclinium* (Eupatorieae, 1 especie) y *Pentacalia* (Senecioneae, 3 especies). Se describen e ilustran estas novedades. Además se transfiere *Espeletiopsis laxiflora* a *Coespeletia laxiflora*; este cambio conlleva el registro del género *Coespeletia* Cuatrec. en Colombia.

**Palabras clave:** Asteraceae, Vernonieae, Eupatorieae, Senecioneae, Heliantheae, *Lessingianthus*, *Hebeclinium*, *Pentacalia*, *Coespeletia*, Colombia, taxonomía.

## Abstract

Study of recently acquired specimens in the Colombian National Herbarium (COL) results in the discovery of five new species of Asteraceae of the genera *Lessingianthus* (Vernonieae, 1 species), *Hebeclinium* (Eupatorieae, 1 species) and *Pentacalia* (Senecioneae, 3 species). We describe and illustrate these novelties. Additionally, *Espeletiopsis laxiflora* is reclassified as *Coespeletia laxiflora*, establishing the presence of *Coespeletia* Cuatrec. in Colombia.

**Key words:** Asteraceae, Vernonieae, Eupatorieae, Senecioneae, *Lessingianthus*, *Hebeclinium*, *Pentacalia*, Colombia, taxonomy.

## Introducción

Entre los materiales que han ingresado recientemente al Herbario Nacional Colombiano (COL), se destacan algunas colecciones provenientes de la Cordillera Oriental,

departamentos de Boyacá y Santander y de la Cordillera Central, departamento del Cauca. La primera de las novedades descritas a continuación pertenece al género *Lessingianthus* H. Rob., una entidad que cuenta con tres especies en Colombia, dos de ellas de hábito arbóreo y

<sup>1</sup> Miembro de número Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Apartado 44763, Bogotá D.C., Colombia. Correo electrónico: sdiaz.piedrahita@gmail.com

<sup>2</sup> Candidata Maestría en Ciencias Biológicas. Línea Sistemática, Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: bvrodriguez@unal.edu.co, betsyviviana@gmail.com

otra de hábito arbustivo. Se presenta una clave para discriminar entre estas especies. La segunda de las novedades descritas pertenece al género *Hebeclinium* DC. del cual habían sido registradas, de acuerdo con la revisión de **Díaz-Piedrahita & Méndez** (2000), 16 especies para la flora colombiana. La nueva entidad es afín a *Hebeclinium sericeum* (Kunth) R.M. King & H. Rob.; para utilidad de los interesados en la flora sinanterológica se incluye un fragmento de la clave previamente publicada por los citados autores, con lo cual se puede diferenciar la totalidad de las especies registradas en Colombia. Las otras tres novedades descritas pertenecen al género *Pentacalia* Cass. subgen. *Pentacalia* y hacen parte del grupo de especies con inflorescencias exclusivamente axilares. Junto con las descripciones se presenta un fragmento de la clave que incluye este grupo de especies, siguiendo las claves previamente publicadas por **Díaz-Piedrahita & Cuatrecasas** (1999) y **Díaz-Piedrahita & Pedraza** (2002). Contando estas novedades se eleva a 101, el número de especies del género registradas en Colombia, de las cuales 55 hacen parte del subgénero *Pentacalia* y 46 pertenecen al subgénero *Microchaete*.

En 2010 fue propuesta como especie nueva *Espeletopsis laxiflora* S. Díaz & Rodr.-Cabeza. Un análisis posterior del material demostró que esta interesante especie queda mejor ubicada en el género *Coespeletia* Cuatrec. Este cambio de estatus implica una notable ampliación del área geográfica del género, hasta ahora restringido a los páramos del estado de Mérida en Venezuela. Adelante se comentan las consecuencias de esta modificación y las afinidades de la especie colombiana con *C. elongata* (A.C. Smith) Cuatrec.

Cabe destacar la importancia de realizar herborizaciones en áreas previamente no visitadas, o mal conocidas desde el punto de vista florístico; tal el caso del Parque Nacional Natural Serranía de Los Yariguíes en el departamento de Santander, de donde provienen dos de las especies acá descritas, a las que acompañarán seguramente nuevas especies pertenecientes a otras familias. Situación similar se presenta con el Santuario de Fauna y Flora Guanentá área de la cual se han publicado recientemente tres especies nuevas para la ciencia (**Díaz-Piedrahita & Rodríguez-Cabeza** 2008, **Díaz-Piedrahita & Rodríguez-Cabeza** 2010).

## 1. Vernonieae

### 1.1. *Lessingianthus yariguiensis* S. Díaz, Rodr.-Cabeza & Aguilar-Cano, sp. nov. **Figs. 1, 4A**

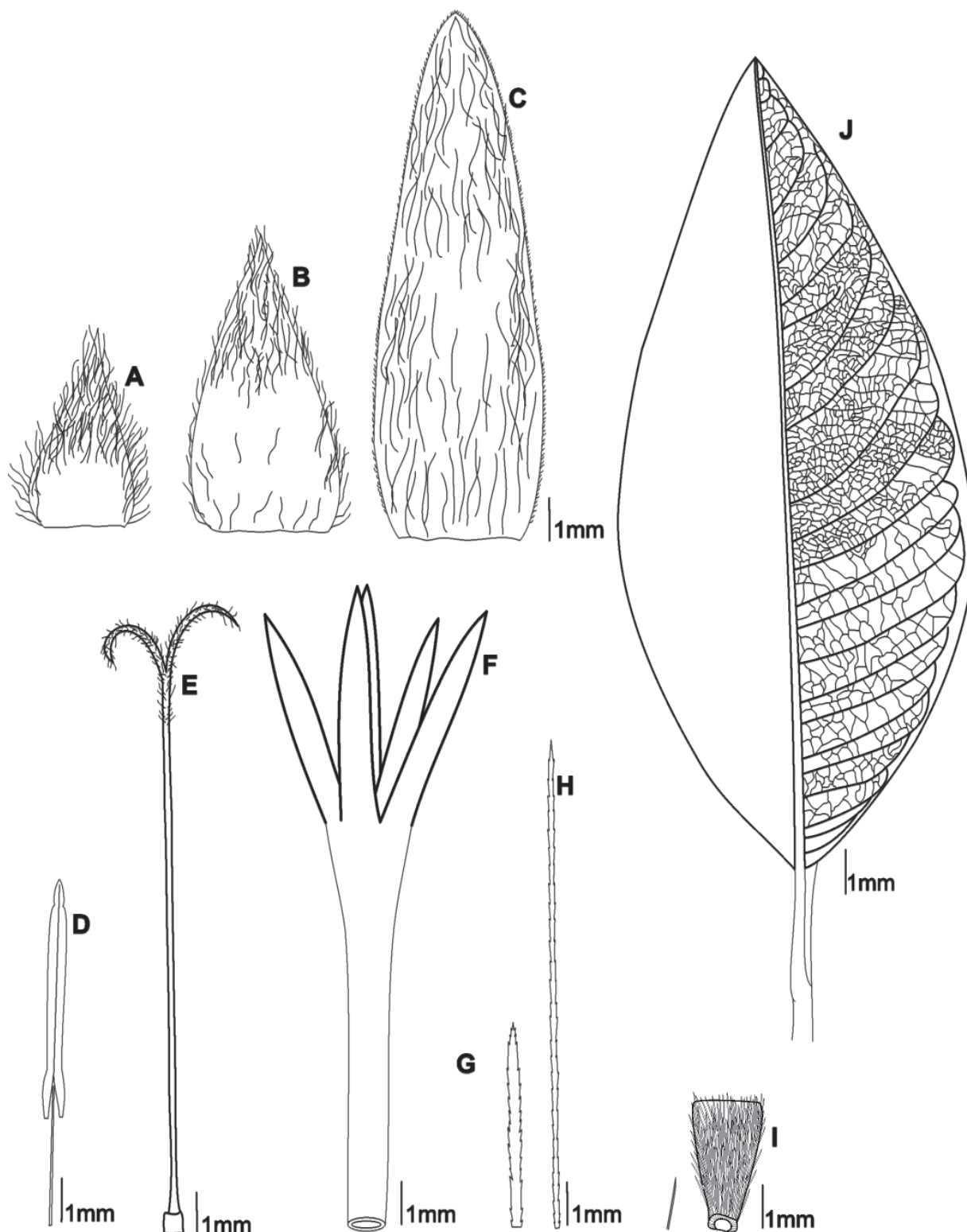
**TYPUS:** COLOMBIA. **Santander:** Inmediaciones del Parque Nacional Natural Serranía de Los Yariguíes,

municipio Hato, vereda Hoya Negra, predio Golconda, 06°36'16.9" Norte, 73°21'30.0" Oeste, 19 feb 2010, *J. Aguilar-Cano 500* (Holotypus COL [555403]; isotypi COL [555405], UIS).

*Lessingianthus gonzalezii* S. Díaz & Obando affinis a qua imprimis differt caulibus lanatis tomentosis; foliis ipsis tomentosus in utroque latere, petiolis multo longioribus (3.3-4 cm vs. 1.5-2.5 cm); capitulis minoribus et sparse floriferis (92 vs. 223); lobis flosculorum minoribus prorsus glabris.

**Etimología.** El epíteto específico alude a la serranía de los Yariguíes, donde se encuentra la localidad típica de la especie.

Árboles de cerca de 6 m de altura. **Ramas** cilíndricas cubiertas por indumento lanoso de color cervino o leonado. **Hojas** pecioladas, peciolo de 3,3-4 cm de largo, lanosos, pelos cervinos o leonados; lámina papirácea de 19-22 cm x 7,6-9,3 cm, elíptica, ápice agudo y corto mucronado, base aguda, margen entera y ligeramente revoluta; haz y envés con indumento largo piloso cervino o leonado que se hace más denso sobre los nervios principal y secundarios; venación pinnada con 9-12 venas por decímetro que divergen en ángulo de 35°-65°, prominulas por la haz, prominentes por el envés. **Inflorescencias** en cimas uníparas con 3-4 capítulos, de 5-6,7 cm de largo. **Capítulos** ca. 2,2 x 2 cm, sésiles y subtendidos por bractéolas decrecientes, de 2-3,2 x 0,3-0,8 cm igualmente sésiles, angosto elípticas y revestidas de pelos largos; involucre globoso de ca. 1.8 x 2 cm de alto; receptáculo ligeramente convexo y foveolado de ca. 8 mm de ancho. **Filarias** ca. 76 por capítulo, dispuestas en ca. 15 series, imbricadas y gradualmente mayores hacia el interior; todas coriáceas, las externas de 5,2-5,5 x 2-2,5 mm, ovadas, con ápice agudo, margen largamente ciliada, dorsalmente cubiertas de indumento denso y largo piloso en la mitad superior y hacia la margen, ventralmente glabras o escasamente pilosas hacia el ápice; las intermedias de 6,8-7,2 x 3-3,5 mm, ovadas, con ápice agudo, margen largamente ciliada, dorsalmente largo pilosas, indumento más denso hacia el ápice, ventralmente glabras; las internas de 12-13 x 3-5 mm, angosto ovadas, con ápice agudo u obtuso, margen escariosa cortamente ciliada, dorsalmente oscurecidas en la mitad superior y largo pilosas, indumento denso hacia el ápice, ventralmente glabras; en vivo las más internas presentan el ápice morado. **Flósculos** hermafroditas, fértiles, ca. 92 por capítulo, de 15-15,5 mm de largo, angosto infundibuliformes, los inmaduros con lóbulos purpúreos, que pasan a blancos al madurar, externamente glabros; lóbulos cinco, profundamente hendidos, de 5,2-5,8 x 0,6-0,8 mm, angosto ovados, con ápice agudo, margen entera y



**Figura 1.** *Lessingianthus yariguiensis* A. Filaria externa vista por el envés; B. Filaria intermedia vista por el envés; C. Filaria interna vista por el envés; D. Antera; E. Pistilo; F. Flósculo hermafrodita; G. Seta externa del papo; H. Seta interna del papo; I. Aquenio; J. Perfil foliar. Diseño digital de Betsy Viviana Rodríguez-Cabeza, elaborado con base en el ejemplar tipo (Aguilar-Cano 500, COL).

engrosada, glabros por ambas caras; porción tubular de 8-8,8 mm de largo. **Anteras** singenésicas de 5,2 mm de largo, apéndice apical de 0,7 x 0,2 mm, angosto ovado, caudas 1,5 mm de largo; porción libre de los filamentos 3 mm de largo. **Pistilo** ca. 18 mm de largo y con un nectario basal, estilo de ca. 14,5 mm de largo, piloso en el ápice, ramas estigmáticas 3,5 mm de largo, pilosas y con ápice agudo. **Aquenios** de 3 x 1,5 mm, obcónicos, larga y densamente pilosos; papo biseriado con setas membranáceas, planas, agudas y fimbriadas, las externas de 4,7 x 0,3 mm, las internas de 11 x 0,1 mm.

**Afinidad.** Esta especie es afín a *L. gonzalezii* de la Serranía de San Lucas, y difiere de ella por presentar ramas con denso indumento lanoso, peciolos más largos (3,3-4 cm vs 1,5-2,5 cm), lámina foliar opaca, con indumento piloso cervino o leonado en ambas caras, capítulos menores (2,2 x 2 cm vs 3,5 x 3-3,5 cm), con menor número de filarias y de flósculos (92 vs 223), y lóbulos de la corola menores (5,2-5,8 mm x 7-9 mm) y completamente glabros.

A continuación se presenta la clave para las tres únicas especies de *Lessingianthus* registradas para Colombia.

1. Arbustos con tallo simple o escasamente ramificado. Hojas sésiles, lámina foliar angosto elíptica a lineal de 3.5-13.5 x 0.2-1 cm. Capítulos hasta de 1.5 cm de alto y con 22-24 flósculos ..... *L. rubricaulis*
- 1'. Árboles hasta de 12 m de altura. Hojas pecioladas, peciolos hasta de 4 cm de largo, lámina foliar elíptica u obovada de 22-25 x 7.6-11 cm. Capítulos hasta de 3.5 cm de alto y con 90-223 flósculos ..... **2**
2. Ramas con indumento lanoso, cervino o leonado. Lámina foliar cubierta por la haz y el envés con indumento largo piloso cervino o leonado que se hace más denso sobre los nervios principal y secundarios. Capítulos con ca. 92 flósculos ..... *L. yariguensis*
- 2'. Ramas glabras. Lámina foliar glabra por la haz y con escaso indumento seríceo por el envés. Capítulos con ca. 223 flósculos ..... *L. gonzalezii*

## 2. Eupatorieae

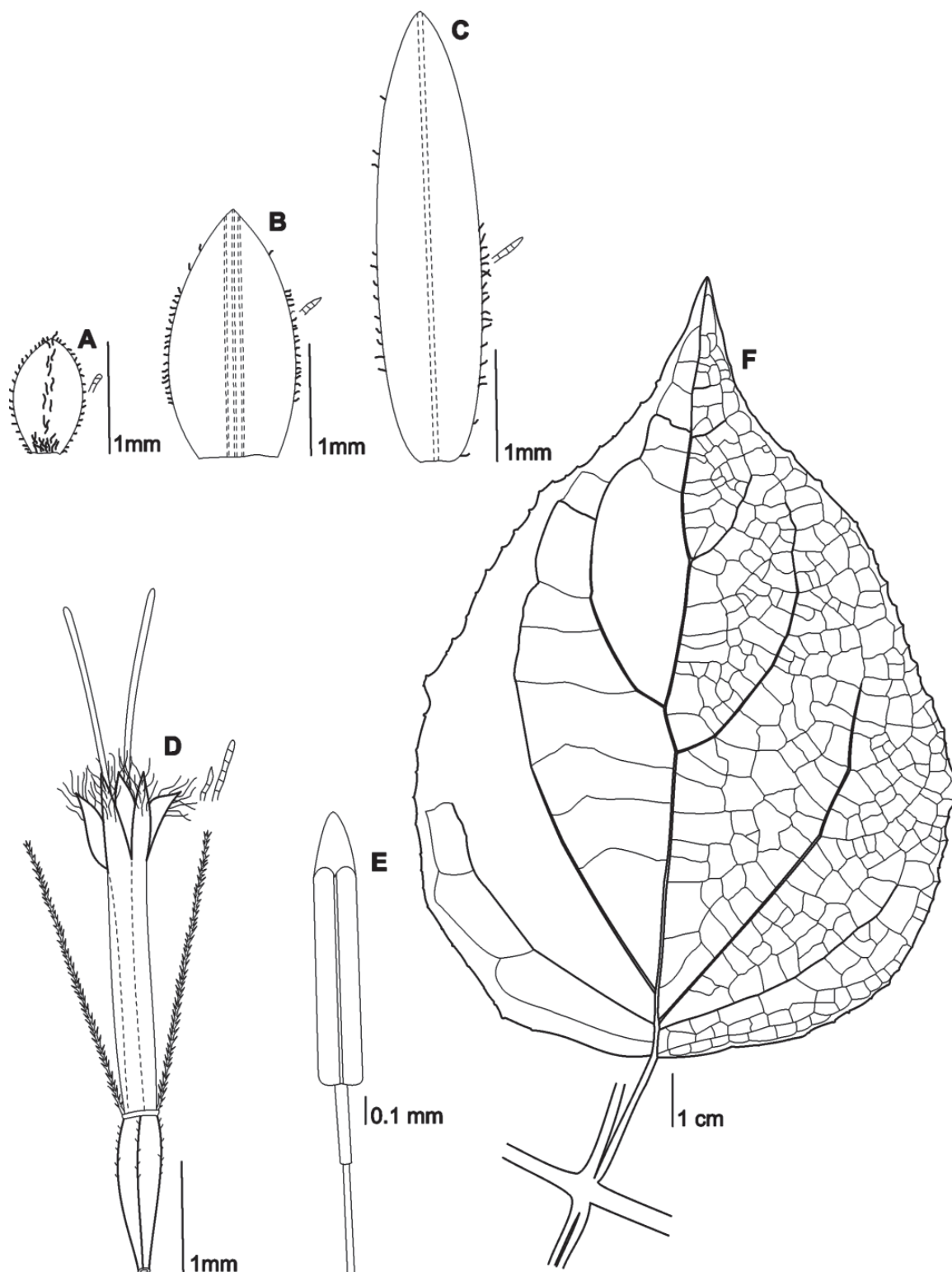
- 2.1 *Hebeclinium squamosum* S. Díaz & Rodr.-Cabeza, sp. nov. **Figs. 2, 4B**

**TYPUS:** COLOMBIA. **SANTANDER:** En inmediaciones del Parque Nacional Natural Serranía de Los Yarigués, municipio de Hato, vereda Hoya Negra, quebrada La Vega, predio Golconda, 06°36'27.8" N, 73°21'33.7" W, 20 feb 2010, C. Marín, 4277 (holotypus COL [555404]; isotypus UIS).

*Hebeclinium sericeo* (H.B.K.) R.M. King & H. Robinson affinis a quo imprimis differt ramis, foliis et inflorescentiis cum indumento piloso cervino vestitis; petiolis 5-plo brevioribus; foliis brevibus, basi foliorum rotundatis, margine dentata, lamina superne squamata, venis dense pilosis, venulis villosis; bracteis involucrorum copiosis (52-54 vs. 30); corolla flosculorum candida.

**Etimología.** El epíteto hace referencia a los pelos escamosos propios del envés foliar y que caracterizan a esta especie.

Arbustos escandentes. **Tallos** y **ramas** cilíndricos, opacos, con indumento piloso castaño a cervino. **Hojas** pecioladas, peciolos de 2,5-2,6 cm de largo, cubiertos por indumento piloso; lámina papirácea de 14,5-15 x 10-10,2 cm, anchamente ovada, ápice largamente acuminado, base redondeada, margen revoluta, dentada, con 34-38 dientes por lado, dientes de 0,4-1 x 3-6,5 mm; haz pilosa, con indumento más denso sobre las venas principales, envés densamente piloso sobre las venas principales, viloso sobre las venas terciarias y escamoso sobre el resto de la lámina; venación triplinerve y con dos pares de nervios menores en la parte inferior, prominulos por la haz y prominentes por el envés, venas terciarias reticuladas. **Inflorescencias** en tirso terminales, con abundantes capítulos pequeños dispuestos en ramas cimosas y patentes, dos veces más largas que las hojas, hasta de 29 cm de largo y cubiertas con indumento piloso castaño o cervino. **Capítulos** discoideos de 5,7-6,3 x 3,5-3,8 mm, pedicelados, pedicelos de hasta 6 mm de largo, densamente pilosos, subtendidos por brácteas de hasta 1 mm de largo, ovadas y densamente pilosas; involucre de 5-5,5 x 3,5-3,8 mm, acampanado; receptáculo de 1,2-1,6 x 0,8-0,9 mm, convexo y piloso. **Filarias** 52-54 por capítulo, dispuestas en 9-12 series, las exteriores de 0,7-1,3 x 0,4-0,9 mm, oblongas, elípticas u ovadas, las intermedias de 1,4-2,3 x 0,9-1 mm, ovadas, las interiores de 3,1-4,2 x 0,8-1 mm, angosto ovadas; todas con ápice agudo u obtuso, margen cortamente ciliada, dorsalmente glabras o pubérulas y con tinte verdoso en el ápice, ventralmente glabras, con 1-3 nervios longitudinales. **Flósculos** hermafroditas, 23-24 por capítulo, de 3,1-3,7 x 0,4-0,5 mm, tubulares, blancos, externamente glabros, internamente provistos en la garganta de largos tricomas pluricelulares; porción tubular de 1,4-1,6 mm de largo; lóbulos de 0,6-0,9 x 0,3-0,4 mm, triangulares, agudos y externamente largo pilosos. **Anteras** de 0,9-1 mm de largo, apéndice apical de 0,2-0,3 x 0,1 mm, conectivo de 0,3-0,4 mm de largo, porción libre de los filamentos de 0,3-0,5 mm de largo. **Pistilo** de 4,5-6,8 mm de largo, estilo de 2-2,8 mm de largo, ramas estigmáticas de 2,5-3 mm de largo, papilosas y glabras. **Aquenios** de 1,3-1,6 x 0,3-0,4 mm, obcónicos; con 4-5 costillas pilosas en la mitad superior;



**Figura 2.** *Hebeclinium squamosum* A. Filaria externa vista por el envés; B. Filaria intermedia vista por el envés; C. Filaria interna vista por el envés; D. Flósculo hermafrodita; E. Antera; F. Perfil foliar. Diseño digital de Betsy Viviana Rodríguez-Cabeza, elaborado con base en el ejemplar tipo (Marín, 4277, COL).

espacios intercostales glabros; papo de 3-3,7 mm de largo, con 37 cerdas desiguales.

**Afinidad.** A primera vista esta especie recuerda a *Hebeclinium sericeum* (Kunth) R.M. King & H. Rob. especie presente en territorio de los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Santander. Difiere por presentar tallos, hojas e inflorescencias con indumento piloso castaño o cervino (vs. indumento denso seríceo blanco), peciolos de 2,5-2,6 cm de largo (vs. 10-15 cm de largo), lámina foliar menor de 14,5-15 x 10-10,2 cm (vs. 14-30 x 10-22 cm) con base redondeada (vs. cordada), margen dentada (vs. aserrada), capítulos con mayor número de filarias (52-54 vs. 30) y flósculos blancos (vs. lila o rosados).

En la clave publicada por Díaz-P. & Méndez (2000), página 26, la especie aquí descrita puede ser incluida en la siguiente forma:

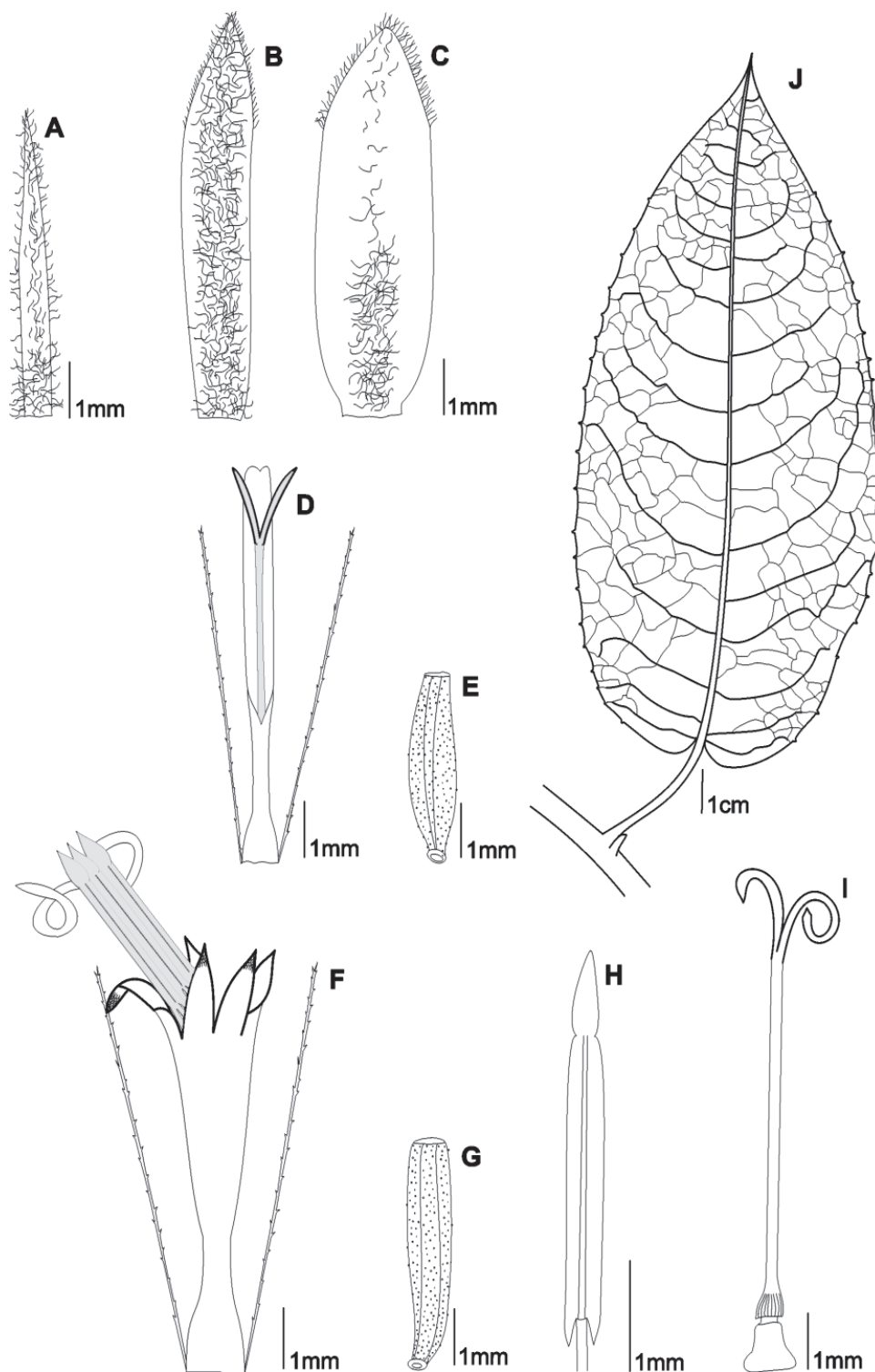
1. Corolas provistas de largos tricomas pluricelulares en la parte interior de la garganta ..... **2**
  - 1'. Corolas carentes de pelos en su interior (a partir de este enunciado la clave continúa como aparece publicada en **Díaz-Piedrahita & Méndez, 2000**).
  2. Tallos y hojas cubiertos de pubescencia blanca (pelos densos, largos y sedosos), flósculos 50-70 por capítulo ..... ***H. sericeum***
  - 2'. Tallos y hojas con pubescencia corta, dispersa y de color castaño pálido, flósculos 20-30 por capítulo .. **3**
  3. Flósculos ca. 20 por capítulo ..... **4**
  - 3'. Flósculos ca. 30 por capítulo ..... ***H. wurdackianum***
  4. Venación pinnada (cerca de 10 nervios por lado). Lámina foliar con margen crenada ..... ***H. guevarae***
  - 4'. Venación triplinerve o trinerve. Lámina foliar con margen aserrada o dentada ..... **5**
  5. Lámina foliar con margen dentada, triplinerve con dos pares de nervios menores hacia abajo, indumento escamoso por el envés. Filarias 52-54 por capítulo .....  
..... ***H. squamosum***
  - 5'. Lámina foliar con margen aserrada, trinerve, indumento piloso por el envés. Filarias 30-35 por capítulo .....  
..... ***H. killipi***
- 3. Senecioneae**
- 3.1. ***Pentacalia guanentana*** Rodr.-Cabeza & S. Díaz, sp. nov. **Figs. 3, 4C**

**TYPUS:** COLOMBIA. **Santander:** Santuario de Fauna y Flora Guanentá Alto Río Fonce, municipio El Encino, vereda Ríonegro, microcuencas de las quebradas Chontales y Aguas Claras, 2900 m, 12 dic 1999, *R. Galindo-T., et al.* 195 (Holotypus COL [441690]; isotypi COL, UIS).

*Pentacaliae axillariflorae* S. Díaz & P. Pedraza affinis a qua imprimis differt ramis indumento villosa gerentibus mox glabrescentibus, basi foliorum cordata aliquando inaequali; floribus disci maioribus atque numerosioribus (12-14 vs. 8); achaenis ipsis maioribus (2.8-3.6 mm. vs. 1.1-1.6 mm longis).

**Etimología.** El epíteto específico hace referencia al Santuario de Flora y Fauna Guanentá, localidad tipo de la especie.

Planta escandente. **Tallos y ramas** cilíndricos, acanalamados, nítidos, con indumento villosa caduco. **Hojas** pecioladas, peciolos de 2,8-3,3 cm de largo, ensanchados y ligeramente abrazadores en la base, cubiertos de indumento villosa y caduco; lámina coriácea de 13-16 x 5,5-7,8 cm, angosta ovada, ápice largamente acuminado, base cordada, algunas veces desigual; margen revoluta, denticulada excepto en el ápice y la base, con 16-23 dientes por lado, separados entre sí 0,3-1 cm; haz glabra y nítida, envés con indumento denso villosa, generalmente caduco sobre las venas; reticulación pinnada con 9-12 venas por decímetro, arqueadas en ángulo de 65°-75°, ascendentes y anastomosadas cerca de la margen, nervios impresos por la haz y prominentes por el envés. **Inflorescencias** en panículas, axilares, casi equilongas o algo más largas que las hojas, de 17-24 cm de largo, porción fértil de 13,2-20,6 cm de largo, con 40-70 capítulos, porción vegetativa de 3,5-6,7 cm de largo, ebractéolada y con indumento villosa cervino o leonado; ramas florales subtendidas por brácteas sésiles de 1,2-2,3 x 0,1-0,3 cm, lineales, que a veces alternan con brácteas pseudopecioladas cuyo pseudopecíolo alcanza hasta 1 cm de largo, porción laminar de 2,5-3 cm x 1,1-2 cm, elíptica, denso villosa por el envés. **Capítulos** radiados de ca. 12,5 x 8 mm, pedicelados, pedicelos de 0,2-1 cm de largo, villosos, subtendidos por brácteas sésiles de 0,5-0,9 mm de largo, angosto triangulares a lineales; cálculo reducido a tres bractéolas de 4,5-6 x 0,5-0,7 mm, de angosto triangulares a lineales, con ápice largamente agudo, margen ciliada, dorsalmente cubiertas por indumento villosa, ventralmente pilosas hacia el ápice; involucro de 7 x 7 mm, acampanado; receptáculo plano o ligeramente convexo de 2 mm de ancho. **Filarias** ocho por capítulo, dispuestas en dos series, las tres exteriores de 5,5-7 x 1-1,5 mm, angosto obovadas y con el ápice triangular, las cinco interiores de 6-7 x 1,8-2,8 mm, angosto elípticas, con



**Figura 3.** *Pentacalia guanentana* A. Bráctea del cálculo; B. Filaria externa vista por el envés; C. Filaria interna vista por el envés; D. Flor del radio, ligulada; E. Aquenio de la flor del radio; F. Flósculo hermafrodita; G. Aquenio del flósculo hermafrodita; H. Antera; I. Pistilo; J. Perfil foliar. Diseño digital de Betsy Viviana Rodríguez-Cabeza, elaborado con base en el ejemplar tipo (Galindo., et al. 195, COL).



el ápice agudo y la margen ciliada en la parte superior, dorsalmente oscuras en la porción central y cubiertas por una lista longitudinal de indumento viloso que se ensancha hacia el ápice, quedando a cada lado un área glabra, ventralmente pilosas en el ápice. **Flores del radio**, liguladas, femeninas, 4-5 por capítulo, amarillas, glabras; corola de 6,5-7,5 mm de largo, porción tubular de 1,7-2,5 mm de largo y notablemente ensanchada en la base, lígula lineal de 4,7-5 x 0,5-0,7 mm, apicalmente con 2-3 dientes. **Pistilo** de 7,2-7,5 mm de largo; estilo de 5-5,6 mm de largo; ramas estigmáticas de 1,8-2,5 mm de largo, delgadas, con el ápice glabro y la margen engrosada. **Aquenios** de las flores radiales de 3,1-3,6 x 0,7-0,8 mm, elípticos, glandulosos y con 5-7 costillas; papo con setas escabrosas desiguales de 5-7 mm de largo, unidas en la base. **Flósculos** hermafroditas, 12-14 por capítulo, infundibuliformes, amarillos y glabros; corola de 7-7,8 mm de largo, glabra; porción tubular de 2,3-2,8 mm de largo, notablemente ensanchada en la base; porción superior pentalobulada, lóbulos triangulares de 1,4-1,8 x 0,5-0,8 mm, externamente glabros y papilosos en el ápice, ápice agudo y márgenes engrosadas. **Anteras** de 2,8-3,5 x 0,3 mm, base caudada con caudas agudas de 0,25-0,4 mm de largo, apéndice apical angosto-ovado de 0,5-0,7 x 0,2-0,25 mm, conectivo de 0,3-0,4 mm de largo, porción libre de los filamentos de 3,2-4,2 mm de largo. **Pistilo** de 7,5-9,2 mm de largo, estilo de 6-6,7 mm de largo (sin incluir el apéndice basal), ensanchado en la base; ramas estigmáticas de 1,5-2,5 mm de largo, pilosas en el ápice y engrosadas en la margen; apéndice basal de 0,5-0,9 x 0,5-1 mm. **Aquenios** de 3,5-4 x 0,6-0,8 mm, obcónicos, glandulosos y con 7-8 costillas; papo de 5-6 mm de largo, con setas escabrosas unidas en la base.

**Afinidad.** Especie afín a *P. axillariflora* descrita con material obtenido en el Parque Nacional Natural Chingaza en Cundinamarca, de la cual difiere por presentar tallos y ramas con indumento viloso caduco, lámina foliar con indumento viloso por el envés, generalmente caduco sobre las venas, base foliar cordada, algunas veces desigual, inflorescencias con indumento viloso cervino o leonado, flores del disco más abundantes (12-14 vs 8 por capítulo) y de mayor longitud (7-7.8 mm vs 5.2-5.9 mm de largo) y aquenios mayores (2.8-3.6 mm vs 1.1-1.6 mm de largo).

**3.2. *Pentacalia carmelitana*** S. Díaz & Rodr.-Cabeza, sp. nov. **Figs. 4D, 5**

**TYPUS:** COLOMBIA. CAUCA: Municipio de Inzá, vereda El Carmen, en la vía Popayán - Inzá en inmediaciones de las torres 162 y 164, 02°29'53.3"N, 076°06'08.6"W, 2425 m, 24 nov 1998, O. Rivera-Díaz, et al. 0953 (Holotypus COL [492754])

*Pentacaliae axillariflorae affinis* S. Díaz & P. Pedraza a qua imprimis differt caulibus et ramis opacis villosis, flocoso indumento superposito; foliis ellipticis superne opacis, subtus pilosis; ramis floriferis longitudinem foliorum duplo superantibus; ramis subtendentibus usque ad 6 bracteolas habentibus (vs. ebracteatis); floribus disci numerosioribus pro capitulo.

**Etimología.** El epíteto recuerda el nombre de la vereda El Carmen en la vía Popayán-Inzá en el departamento del Cauca, localidad de donde proviene el ejemplar tipo.

Plantas escandentes, con tallos hasta de 3 cm diámetro. **Tallos y ramas** cilíndricos, acanalados, corteza opaca cubierta de indumento piloso formado por tricomas articulados de color marrón en las uniones intercelulares, sobrepuesto por indumento flocoso estramineo. **Hojas** pecioladas, peciolas de 2,5-3,7 cm de largo, ensanchados y ligeramente abrazadores en la base, cubiertos de indumento piloso sobrepuesto por denso indumento flocoso estramineo; lámina elíptica, de 10-14,5 x 4-7,5 cm, coriácea, ápice acuminado, base obtusa y algunas veces asimétrica, margen revoluta, denticulada con 28-35 dientes por lado, separados entre sí 2-7 mm; haz glabra y opaca, envés con indumento piloso formado por tricomas articulados; venación pinnada con 10-12 venas por decímetro, nervios secundarios ascendentes, arqueados en ángulo de 55°-75° y anastomosados cerca de la margen, ligeramente prominentes tanto por la haz como por el envés. **Inflorescencias** en panículas, axilares, dos veces más largas que las hojas, de ca. 28 cm de largo, cubiertas de indumento piloso sobrepuesto por indumento flocoso de estramineo a blanquecino, porción fértil de ca. 14,5 cm de largo, con ca. 56 capítulos, porción vegetativa de ca. 13,5 cm de largo, con 6 bractéolas alternas de 0,6-0,8 cm de largo, angosto ovadas; ramas secundarias subtendidas por brácteas sésiles, decrecientes hacia el ápice y de hasta 1,5 cm x 0,15 cm, lineales, pilosas y flocosas. **Capítulos** radiados, de 6-7 x 4-5 mm, pedicelados, pedicelos de 0,2-0,6 cm de largo, pilosos y flocosos, subtendidos por brácteas de 0,3-0,4 mm de largo, lineales; cálculo reducido a 2-3 bractéolas de 2-2,5 x 0,3 mm, lineales, con ápice agudo, margen ciliada, dorsalmente cubiertas por indumento flocoso; involucro acampanado de 5 x 4-5 mm; receptáculo plano de ca. 1,8 mm de ancho. **Filarias** ocho por capítulo, dispuestas en dos series; las tres exteriores de 5-5,7 x 1-1,1 mm, angosto-obovadas, las cinco interiores de 5-5,7 x 1,3-1,7 mm, angosto-oblongas, todas con ápice agudo, margen ciliada hacia el ápice, dorsalmente oscuras en la porción central y con indumento piloso en el ápice, ventralmente pilosas en el ápice. **Flores del radio** liguladas, femeninas, 4-5 por capítulo, glabras; corola de 4,3-5 mm de largo, porción tubular

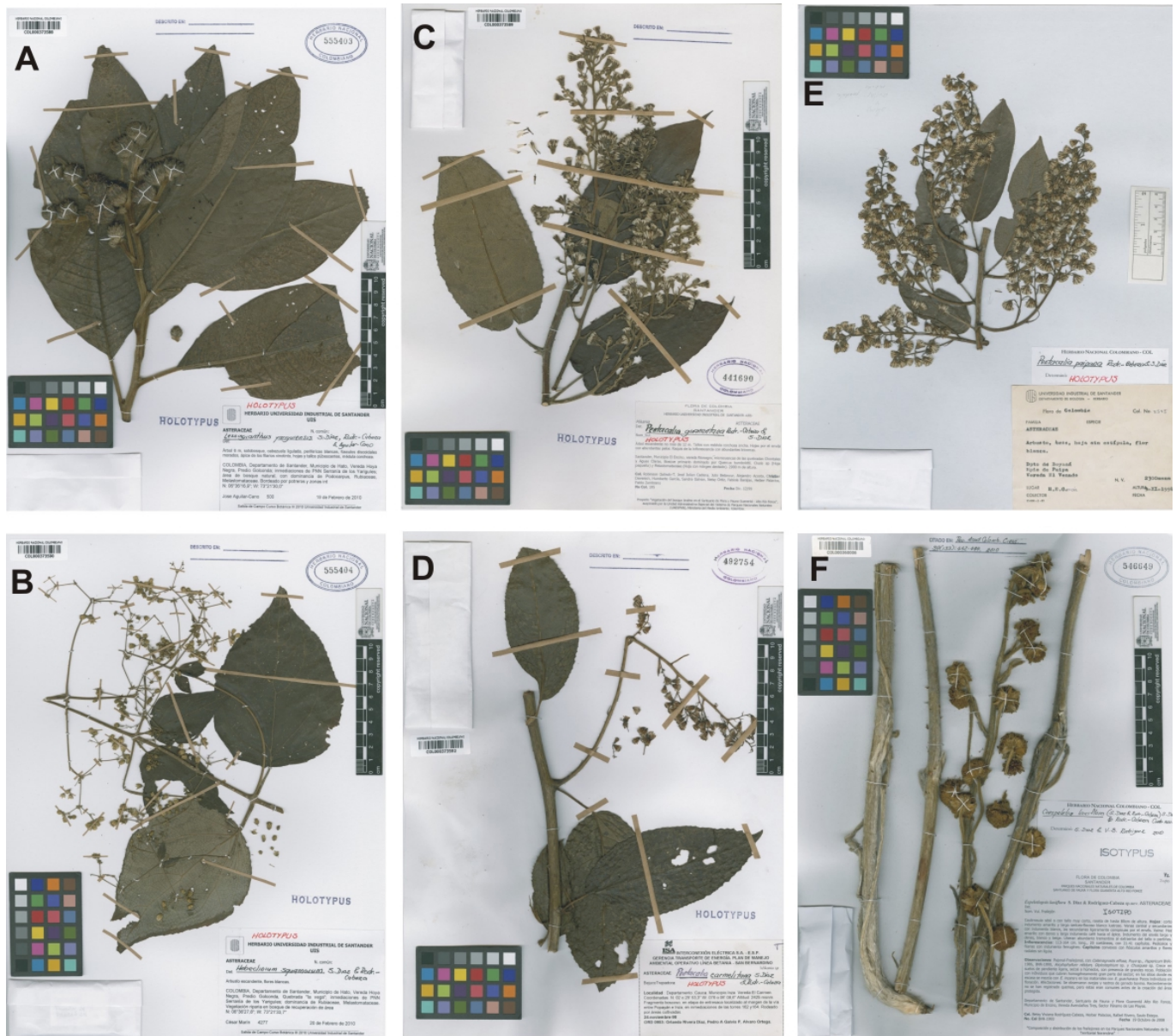


Figura 4. A. *Lessingianthus yariguiensis* S. Díaz, Rodr.-Cabeza & Aguilar-Cano; B. *Hebeclinium squamosum* S. Díaz & Rodr.-Cabeza. C. *Pentacalia guanentana* Rodr.-Cabeza & S. Díaz; D. *Pentacalia carmelitana* S. Díaz & Rodr.-Cabeza; E. *Pentacalia paipana* Rodr.-Cabeza & S. Díaz; F. *Coespeletia laxiflora* (S. Díaz & Rodr.-Cabeza) S. Díaz & Rodr.-Cabeza.

de 1,3-1,9 mm de largo, lígula angosto-elíptica de 3-3,2 x 0,5-0,8 mm, apicalmente con 2-3 dientes. Pistilo de 3,7-5 mm de largo; estilo de 2,5-3,6 mm de largo; ramas estigmáticas de 1,2-1,5 mm de largo, delgadas, con el ápice piloso y la margen engrosada. **Aquenios** de las flores radiales de 1-1,4 x 0,4-0,8 mm, obcónicos, eglandulados, glabros y con 6 costillas; papo de 4,5-5 mm de largo, con setas escabrosas desiguales unidas en la base. **Flósculos** hermafroditas, once por capítulo, angostamente infundi-

buliformes y glabros; corola de 4,8-5,5 mm de largo; porción tubular de 1,5-2 mm de largo; porción ensanchada rematada por cinco lóbulos angosto-trianguulares y agudos de 1,1-1,5 x 0,5-0,6 mm, externamente pilosos en el ápice y con las márgenes engrosadas. **Anteras** de 2,5-3,2 x 0,5 mm, base caudada, caudas agudas de 0,4-0,5 mm de largo, apéndice apical angosto-elíptico o elíptico de 0,4-0,7 x 0,1-0,3 mm, conectivo de 0,4-0,5 mm de largo, porción libre de los filamentos de 1-1,3 mm de largo. **Pistilo** de 4,5-5,1 mm

de largo, estilo de 2,5-3,5 mm de largo; ramas estigmáticas de 1,8-2,2 mm de largo, pilosas en el ápice y engrosadas en la margen; apéndice basal de 0,4 x 0,4 mm. **Aquenios** de 1,2-1,5 x 0,4-0,6 mm, obcónicos, eglandulados, glabros y con 5-7 costillas; papo de 4,8-5 mm de largo, con setas escabrosas unidas por la base.

**Afinidad.** Especie afín a *P. axillariflora* descrita con base en material recolectado en el Parque Nacional Natural Chingaza en Cundinamarca, de la cual difiere por presentar tallos y ramas opacas con indumento villosos sobrepuerto por indumento flocooso (vs ramas y tallos nítidos, glabros o glabrescentes en las porciones juveniles), lámina foliar elíptica (vs. angosto ovada), opaca por la haz (vs. nítida), por el envés pilosa (vs. con escaso indumento aracnoide), inflorescencias dos veces más largas que las hojas (vs. más o menos equilongas), porción vegetativa de las ramas floríferas con 6 bractéolas alternas (vs. ebractéoladas), pedicelos más cortos (0,4-0,6 cm vs. 1,4 cm de largo), mayor número de flósculos (11 vs. 8 por capítulo) y porción libre de los filamentos menor (1-1,3 mm vs. 4,4 mm de largo).

**3.3. *Pentacalia paipana* Rodr.-Cabeza & S. Díaz, sp. nov. Figs. 4E, 6**

**TYPUS:** COLOMBIA. **BOYACÁ:** Municipio de Paipa, vereda El Venado, 2300 m, 9 nov 1994, *H.E. García*, 2575 (Holotypus UIS)

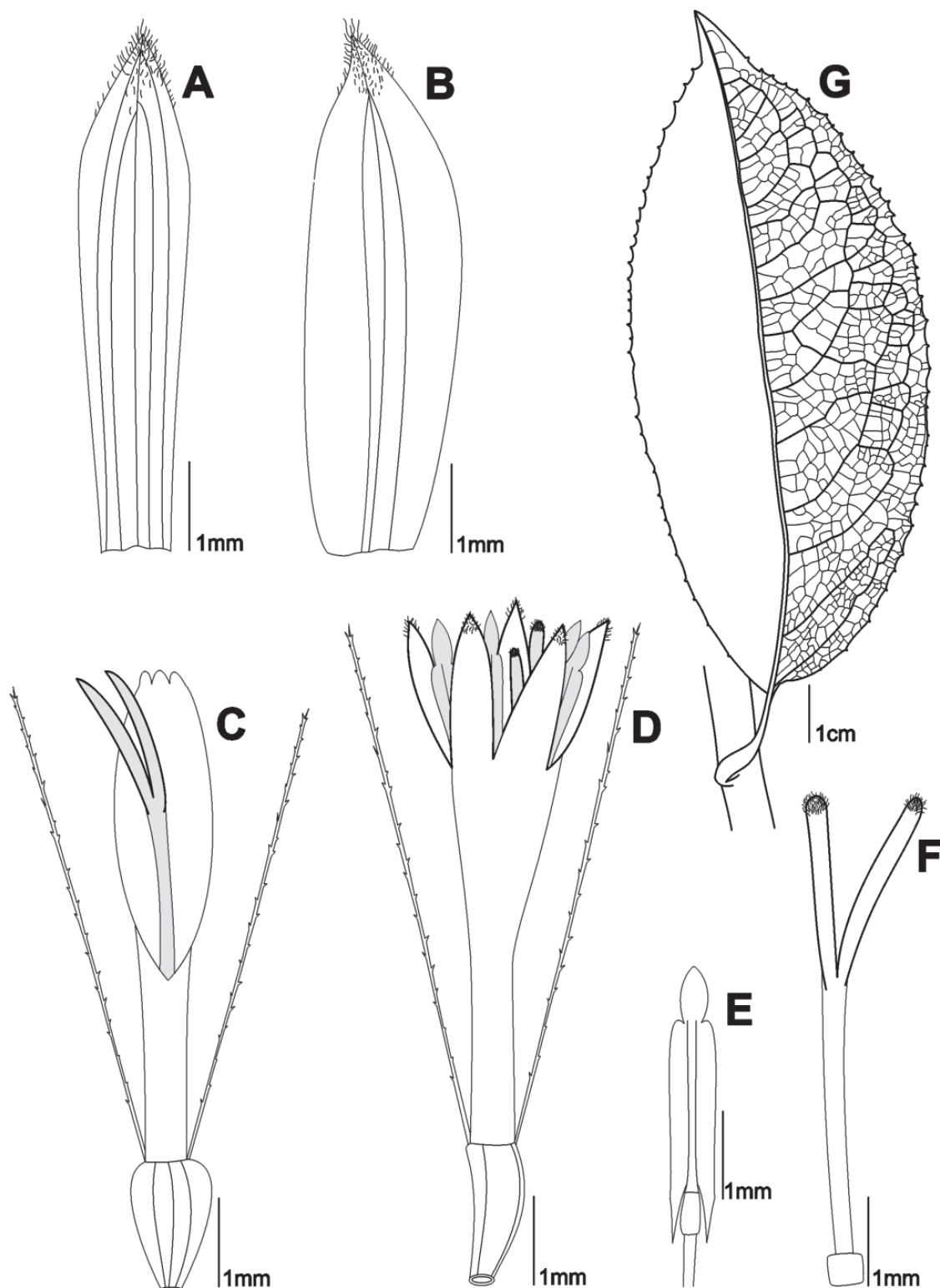
*Pentacaliae* guanentanae S. Díaz & Rodríguez-Cabeza affinis a qua imprimis differt foliis minoribus, pagina anguste oblonga, basi foliorum rotundata, margine integerrima, superne aracnoidea; floribus omnibus minoribus; achaeniis ipsis minoribus.

**Etimología.** El epíteto alude a la ciudad de Paipa en cuya jurisdicción se encuentra la localidad típica de esta especie.

Planta escandente. **Tallos** y **ramas** cilíndricos, acanalados; corteza opaca cubierta de indumento aracnoideo blanco-grisáceo y caedizo. **Hojas** pecioladas, peciolo de 2-2,3 cm de largo, ensanchados y ligeramente abrazadores en la base, cubiertos de indumento densamente aracnoideo blanco-grisáceo; lámina coriácea de 7,5-10,3 x 2,8-3,4 cm, angosto oblonga, ápice largamente acuminado, base redondeada, margen entera y revoluta; haz glabra o con escaso indumento aracnoideo y blanquecino, envés densamente aracnoideo; venación pinnada, hojas con 22-26 venas por lado, ascendentes, arqueadas en ángulo de ca. 50°, y anastomosadas cerca de la margen, prominulas por la haz, prominentes y cubiertas por indumento aracnoideo por el envés. **Inflorescencias** en panículas,

axilares péndulas, casi dos veces más largas que las hojas, de 13,5-19 cm de largo, cubiertas por indumento aracnoideo blanco-grisáceo, porción fértil de 11,7-16 cm de largo, con 48-77 capítulos, porción vegetativa de 2,7-3,4 cm de largo, ebracteada; ramas florales subtendidas por brácteas sésiles, decrecientes hacia el ápice, de hasta 2 x 0,15 cm, lineales y dorsalmente cubiertas con indumento aracnoideo blanco-grisáceo. **Capítulos** radiados de 7,8-8 x 5 mm, pedicelados, pedicelos de 0,2-1,2 cm de largo, con indumento aracnoideo blanco-grisáceo, subtendidos por brácteas de 0,3-0,6 mm de largo, lineales; cálculos con 5-6 bractéolas de 3,5-4 x 0,4 mm, lineales, con el ápice largamente agudo, la margen ciliada, dorsalmente pilosas; involucro acampanado de 5 x 5 mm; receptáculo plano. **Filarias** ocho por capítulo, dispuestas en dos series; las tres exteriores de 5-5,2 x 1 mm, las cinco interiores de 5 x 1,6-2 mm, todas angosto elípticas, con el ápice largamente acuminado o agudo, la margen lisa, dorsalmente oscuras y pilosas en la porción central y en el ápice, ventralmente pilosas hacia el ápice. **Flores del radio** femeninas, cinco por capítulo, blancas y glabras; corola de 5,6-6 mm de largo, porción tubular de 2,4-2,5 mm de largo, lígula oblonga de 3,1-3,5 x 0,7-0,9 mm, apicalmente con 2-3 dientes. Pistilo de 5,2-5,5 mm de largo; estilo de 3,7-4 mm de largo; ramas estigmáticas de 1,5-1,8 mm de largo, ápice piloso, margen engrosada y papilosa. **Aquenios** de las flores radiales de 1,5 x 0,5-0,7 mm, obcónicos, eglandulados, glabros y con costillas inconspicuas; papo de 5-5,7 mm de largo, con ca. 51 setas escabrosas unidas en la base. **Flósculos** hermafroditas, 14-15 por capítulo, angosto infudibuliformes, blancos y glabros; corola de 5,8-6,2 mm de largo, porción tubular de 2-2,5 mm de largo, porción ensanchada rematada por cinco lóbulos angosto triangulares, agudos y con las márgenes engrosadas de 1,5-1,6 x 0,4-0,5 mm, externamente papilosos en el ápice. **Anteras** de 1,9-2,8 mm de largo, base caudada, caudas agudas de 0,5-0,7 mm de largo, apéndice apical angosto ovado, de 0,4-0,5 x 0,15 mm, conectivo de 0,5-0,7 mm de largo, porción libre de los filamentos de 1 mm de largo. **Pistilo** de 5,5 mm de largo, estilo de 3,4-3,5 mm de largo; ramas estigmáticas de 2-2,1 mm de largo, pilosas en el ápice, engrosadas y papilosas en la margen; apéndice basal de ca. 0,5 x 0,2 mm. **Aquenios** de 1,5-2 x 0,5-0,6 mm, obcónicos, eglandulados, glabros y con costillas inconspicuas; papo de 5,5-6,3 mm de largo, setas escabrosas unidas en la base.

**Afinidad.** Especie afín a *P. guanentana*, descrita con material proveniente del Santuario de Fauna y Flora Guanentá, Alto Río Fonce en el departamento de Santander, de la cual difiere por presentar hojas menores y angostas (7,5-10,3 x 2,8-3,4 cm vs. 13-15 x 5,5-7,8 cm), con lámina angosto oblonga (vs. angosto ovada), base



**Figura 5.** *Pentacalia carmelitana* **A.** Filaria externa vista por el envés; **B.** Filaria interna vista por el envés; **C.** Flor del radio, ligulada; **D.** Flósculo hermafrodita; **E.** Antera; **F.** Pistilo; **G.** Perfil foliar. Diseño digital de Betsy Viviana Rodríguez-Cabeza, elaborado con base en el ejemplar tipo (Rivera-Díaz, et al. 0953, COL).

redondeada (vs. cordada), margen entera (vs. denticulada), dorsalmente con indumento aracnoideo (vs. denso viloso), flores del radio menores (5,6-6 mm de largo vs. 6,5-7,5 mm de largo), limbo de las flores liguladas más corto y más ancho (3,1-3,5 x 0,7-0,9 mm vs. 4,7-5 x 0,5-0,7 mm), flósculos menores (5,8-6,2 cm de largo vs. 7-7,8 cm de largo), filamentos más cortos (1 mm de largo vs. 3,2-4,2 mm de largo), pistilo más corto (5,5 mm de largo vs. 7,5-9,2 mm de largo) y aquenios menores (1,5-2 x 0,5-0,6 mm vs. 3,1-4 x 0,6-0,8 mm).

El ejemplar correspondiente al holótipo fue montado en forma invertida, pero un análisis del espécimen muestra que las inflorescencias son péndulas y no erectas como lo hace ver el montaje.

En la clave para *Pentacalia* publicada por Díaz-P. & Cuatrecasas (1999) página 40 y en la clave posteriormente modificada por Díaz-P. & Pedraza (2002), las tres especies aquí descritas pueden ser incluidas en la siguiente forma:

1. Inflorescencias exclusivamente axilares, generalmente numerosas, que igualan o superan en longitud a las hojas ..... 2
- 1'. Inflorescencias terminales tirsoideas o corimbiformes, a veces con ramas floríferas robustas que superan en longitud a las hojas axilares (a partir de este enunciado la clave continúa como aparece publicada en Díaz-Piedrahita & Pedraza, 2002).
2. Capítulos discoideos ..... 3
- 2'. Capítulos radiados ..... 4
3. Inflorescencias erectas, ramas floríferas lanuginosas, generalmente equilongas con las hojas ..... *P. uribei*
- 3'. Inflorescencias reflejas, ramas floríferas ligeramente pubérgulas, que superan ampliamente en longitud a las hojas ..... *P. retroflexa*
4. Lámina foliar con la margen entera ..... 5
- 4'. Lámina foliar con la margen dentada o denticulada 6
5. Tallos, ramas y hojas glabras. Lámina foliar ovado elíptica, ápice agudo u obtuso o bien subredondeado, base cuneada, venación pinnada con 6-8 venas por lado ..... *P. scortifolia*
- 5'. Tallos, ramas y hojas con indumento aracnoide blanco-grisáceo. Lámina foliar angosto oblonga, ápice largo acuminado, base redondeada, venación pinnada con 22-26 venas por lado ..... *P. paipana*

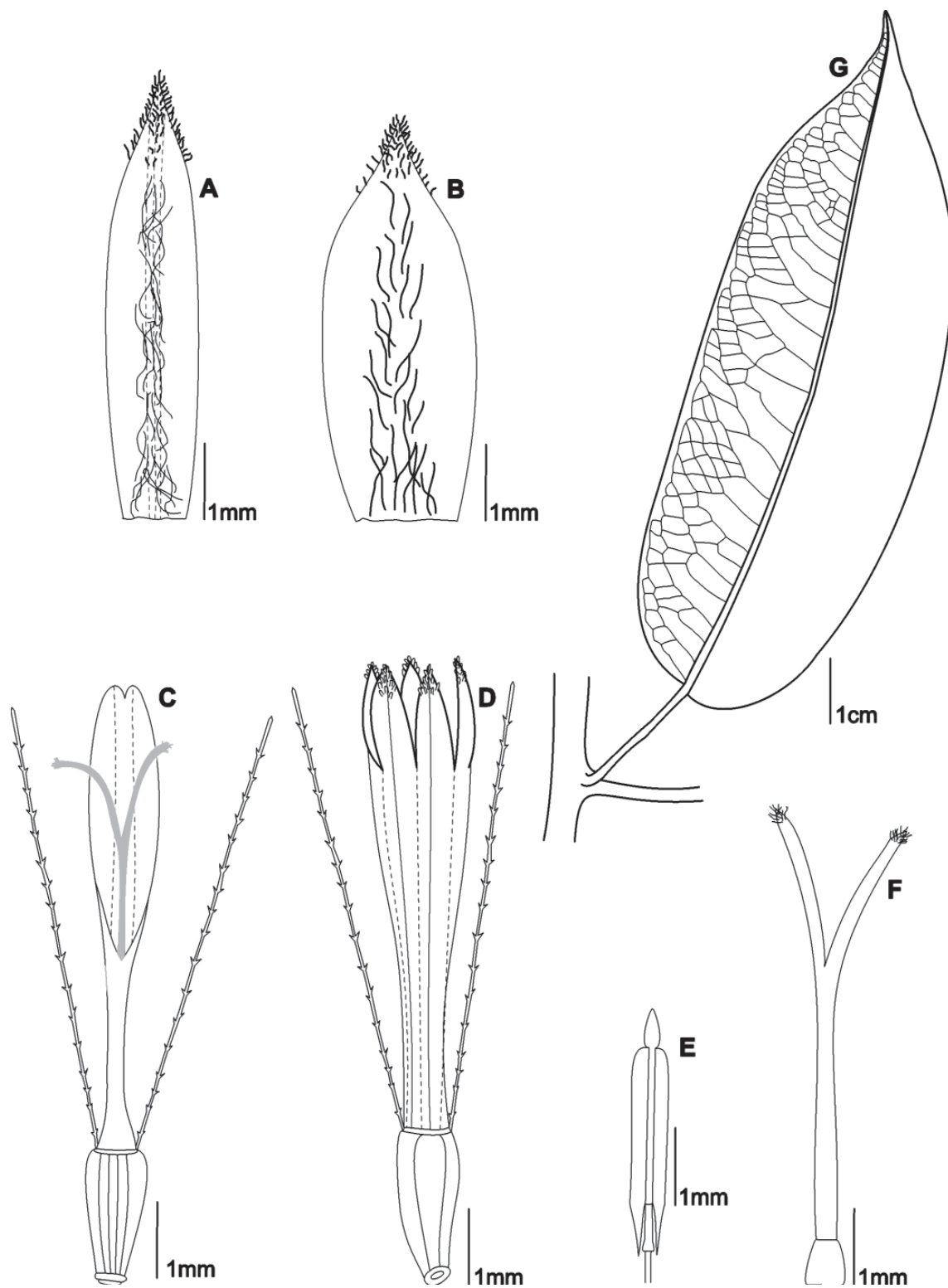
6. Tallos y ramas nítidas en seco. Lámina foliar elíptica, por la haz opaca. Inflorescencias dos veces el largo de las hojas, ramas subtendentes con 6 bractéolas alternas ..... *P. carmelitana*
- 6'. Tallos y ramas opacas en seco. Lámina foliar angosto ovada, por la haz nítida. Inflorescencias equilongas o un poco más largas que las hojas, ramas subtendentes ebractéoladas ..... 7
7. Tallos y ramas glabras o con escaso indumento aracnoide. Lámina foliar por el envés glabra o con restos de indumento aracnoide principalmente sobre las venas, base redondeada y desigual. Inflorescencias con indumento aracnoide blanquecino a grisáceo. Flores del disco 8 por capítulo, 5.1-5.9 mm de largo. Aquenio 1.1-1.6 mm de largo ..... *P. axillariflora*
- 7'. Tallos y ramas con indumento viloso caduco. Lámina foliar por el envés con indumento denso viloso, generalmente caduco sobre las venas, base cordada, algunas veces desigual. Inflorescencias con indumento viloso cervinus o leonado. Flores del disco 12-14 por capítulo, 7-7.8 mm de largo. Aquenios 2.8-3.6 mm de largo ..... *P. guanentana*

#### 4. Heliantheae

*Coespeletia laxiflora* (S. Díaz & Rodr.-Cabeza) S. Díaz & Rodr.-Cabeza, comb. nov. **Fig. 4F**

*Espeletiopsis laxiflora* S. Díaz & Rodr.-Cabeza, Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (133): 442-444. 2010.

El género *Coespeletia* Cuatrec. estaba conformado hasta el presente por siete especies y una variedad confinadas a los páramos de Mérida en los Andes de Venezuela. Este taxón incluye plantas caulirrosulares, erectas o subsésiles con tallo simple, vaina foliar abierta y por lo general grande, sinflorescencias dicasiales o bien racemiformes, con brácteas alternas en la porción vegetativa, capítulos con flores radiales provistas de lígulas bien desarrolladas o reducidas a denticulos. Un análisis detenido del material de *Espeletiopsis laxiflora* y su comparación con ejemplares de *Coespeletia* indica que la especie pertenece a este último taxón. En esta forma, el área geográfica de *Coespeletia* se extiende hacia el sudoeste a través de los Andes llegando hasta la zona limítrofe de los departamentos de Santander y Boyacá, concretamente a los páramos del Santuario de Fauna y Flora Guanentá; así, la distribución del género presenta una discontinuidad de más de 220 km en línea recta y con notables depresiones de la Cordillera. La aparición de po-



**Figura 6.** *Pentacalia paipana* **A.** Filaria externa vista por el envés; **B.** Filaria interna vista por el envés; **C.** Flor de radio, ligulada; **D.** Flósculo hermafrodita; **E.** Antera; **F.** Pistilo; **G.** Perfil foliar. Diseño digital de Betsy Viviana Rodríguez-Cabeza, elaborado con base en el ejemplar tipo (García, 2575 UIS).

blaciones aisladas de *Coespeletia* en Colombia, plantea diversos interrogantes en relación con los procesos de especiación, los cambios climáticos, las barreras geográficas y reproductivas y el parentesco entre las especies de *Espeletia*, *Espeletiopsis* y *Coespeletia* que ameritan un estudio detenido.

*Coespeletia laxiflora* (S. Díaz & Rodr.-Cabeza) S. Díaz & Rodr.-Cabeza muestra su mayor afinidad con *C. elongata* (A.C. Smith) Cuatrec. de la que se separa entre otros caracteres por las clases de indumento en hojas e inflorescencias y por presentar lámina foliar angosto elíptica (vs. ovadas lineales), ápice largamente agudo (vs. subagudo), menor número de venas por decímetro (11-15 vs. 17-24), inflorescencias mayores (113-164 cm vs. un poco más de 45 cm de largo), capítulos con menor número de filarias (7 vs. 15,20) y flores femeninas con corolas reducidas a un anillo de 0,5-1 mm de long. (vs. flores femeninas de hasta 4 mm de long. con lígula desarrollada).

#### Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a José Aguilar Cano y Cesar Marín del Herbario de la Universidad Industrial de Santander (UIS) por los ejemplares facilitados para la realización de este trabajo y a los funcionarios del Parque Nacional Natural Serranía de Los Yariguíes por facilitar la recolección de muestras en su jurisdicción. Al padre Pedro Ortiz Valdivieso S.J. por la revisión de las diagnosis latinas. Al profesor John Lynch de la Universidad Nacional de Colombia por la revisión del abstract. A la Dirección de

Investigación de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá –DIB- por el apoyo financiero concedido al proyecto “El género *Chromolaena* (Eupatorieae: Asteraceae) en Colombia: Revisión taxonómica y evaluación de su estatus generico” mediante la convocatoria “Apoyo de la DIB a tesis de investigación en posgrado”.

#### Literatura citada

- Díaz-Piedrahita, S. & Cuatrecasas, J. 1999. Asteráceas de la Flora de Colombia. Senecioneae I. Géneros *Dendrophorbium* y *Pentacalia*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Colección Jorge Álvarez Lleras 12. Pág. VIII+389. Bogotá D.C.
- & Méndez-R. G. 2000. El género *Hebeclinium* (Asteraceae, Eupatorieae) en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **24**(90):25-44.
- & Pedraza, P. 2002. Una especie particular de *Pentacalia* (Senecioneae, Asteraceae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **26**(98):9-11.
- & Rodríguez-Cabeza, B.V. 2008. Novedades en los géneros *Espeletia* Mutis ex Humb. & Bonpl. y *Espeletiopsis* Cuatrec. (Asteraceae, Heliantheae, Espeletiinae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(125):455-464.
- & Rodríguez-Cabeza, B.V. 2010. Nuevas especies colombianas de *Espeletiopsis* Cuatrec. y de *Espeletia* Mutis ex Humb. & Bonpl. (Asteraceae, Heliantheae, Espeletiinae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34**(133):441-454.

Recibido: octubre 21 de 2011.

Aceptado para su publicación: diciembre 15 de 2011.

# CONTRIBUCIONES A LA BIOTA LIQUÉNICA FOLIÍCOLA DE COLOMBIA. I. NUEVOS REGISTROS DEL GÉNERO *COENOGONIUM* (ASCOMYCOTA-OSTROPALES: COENOGONIACEAE)

Nancy Mateus<sup>1</sup>, Robert Lücking<sup>2</sup>, Jaime Aguirre-C.<sup>1</sup>

## Resumen

**Mateus N., R. Lücking, J. Aguirre-C.:** Contribuciones a la biota líquénica foliícola de Colombia. I. Nuevos registros del género *coenogonium* (Ascomycota-ostropales: coenogoniaceae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (137): 425-430, 2011. ISSN 0370-3908.

Seis especies pertenecientes al género *Coenogonium* son registradas por primera vez para Colombia; *Coenogonium barbatum*, *C. geralense*, *C. lisowskii*, *C. minimum*, *C. moniliforme* y *C. siquirrense*, todos provienen de la Estación Ambiental de Tutunendó en el departamento del Chocó (Colombia).

**Palabras clave:** líquenes foliícolas, *Coenogonium*, nuevos registros, Chocó, Colombia.

## Abstract

Six species of the genus *Coenogonium* are reported for the first time for Colombia: *Coenogonium barbatum*, *Coenogonium geralense*, *Coenogonium lisowskii*, *Coenogonium minimum*, *Coenogonium moniliforme* and *Coenogonium siquirrense*. All originate from the Estación Ambiental de Tutunendó in the department of Chocó (Colombia).

**Key words:** foliicolous lichens, *Coenogonium*, new report, Chocó, Colombia.

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales, Carrera 30 No. 45-03, Edificio 425, Bogotá, D.C. Colombia, [lnmateusv@unal.edu.co](mailto:lnmateusv@unal.edu.co), [jaguirrec@unal.edu.co](mailto:jaguirrec@unal.edu.co).

<sup>2</sup> The Field Museum of Natural History, Department of Botany, 1400 S. Lake Shore Drive, Chicago, Illinois 60605-2496, USA. [rlucking@fieldmuseum.org](mailto:rlucking@fieldmuseum.org).



## Introducción

El género *Coenogonium* pertenece a la familia *Coenogoniaceae*, en el orden Ostropales, la cual presenta formas de crecimiento filamentosas y costrosas. Estos últimos fueron incluidos en un principio dentro del género *Dimerella*; sin embargo, la diferencia entre estos géneros se basa más en la presencia de diferentes morfotipos de fotobiontes que en la morfología y anatomía de los cuerpos fructíferos (Lücking, 2008).

*Coenogonium* es un género bastante amplio, con más de 80 especies, principalmente tropicales. Se caracteriza por la presencia de un exípulo bien desarrollado de tipo paraplectenquimatoso conformando apotecios biatorinos de color amarillo a naranjado a casi rojo, sésiles a ligeramente estipitados, con el himenio amiloide, ascas unitunicadas de paredes delgadas y ascosporas generalmente uniseptadas y la presencia de *Trentepohlia* como fotobionte. La mayoría presentan picnidios en forma de verruga hasta globosos con conidios fusiformes a bacilares, no septadas o uniseptadas (Rivas-Plata *et al.* 2006, Lücking, 2008).

Las especies de *Coenogonium* crecen en sustratos orgánicos incluyendo corteza, briofitos y hojas, aunque también se las encuentra sobre rocas. Casi la mitad de las especies son típicamente o en ocasiones facultativamente foliícolas y 22 de estas están presentes en el Neotrópico (Rivas-Plata, 2006, Lücking, 2008). Para Colombia se han registrado, hasta la fecha, 15 especies (Sipman *et al.* 2008), nueve de los cuales presentan un crecimiento foliícola. En este trabajo se presentan seis nuevos registros de especies foliícolas como resultado del proyecto "Composición y riqueza de los líquenes foliícolas de la estación ambiental de Tutunendo en el departamento del Chocó (Colombia)".

## Materiales y métodos

La Estación Ambiental de Tutunendo (EAT) es una de las seis estaciones propuestas por el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico, ubicada en el corregimiento de Tutunendo a 05°48' de latitud norte y a 76°31' de longitud oeste, en la parte nororiental del municipio de Quibdó, departamento del Chocó (Figura 1). La estación tiene una extensión de 80,72 ha y se localiza en el borde de la planicie central del Chocó a una altitud de 100 m, donde inicia la influencia de la cordillera occidental; tiene una topografía suave con colinas redondeadas muy bajas y con pendientes moderadas a fuertes. Se registran precipitaciones hasta de 12000 mm al año, temperaturas entre 28°C- 30°C y humedad relativa que oscila alrededor de 87%, condiciones que corresponden a la

formación bosque húmedo pluvial tropical (bh-PT) según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (Cuessta, *et al.* 2009).

Para la colecta del material se siguieron los lineamientos propuestos por Lücking & Lücking (1996) en la evaluación de la diversidad local de los líquenes foliícolas. El muestreo se realizó de forma sistemática estableciendo un transecto en línea recta dentro del bosque, sobre la cual se levantaron 11 puntos de muestreo distantes aproximadamente 100 m, recorriendo un total de 1000 m. En cada uno de los puntos de muestreo se seleccionaron diez plantas dentro del sotobosque, colectando una rama con hojas con evidente crecimiento de líquenes, en cada una de las plantas.

El material colectado se trató de manera similar al modo en que se preparan las colecciones de las plantas superiores, prensándolas en periódico y secándolas de forma moderada. En el laboratorio el material se determinó a especie por medio de observaciones del talo y estructuras vegetativas al microscopio estereoscópico, se elaboraron cortes a mano alzada de estructuras reproductivas y observación de esporas al microscopio óptico. Con las características obtenidas se realizó la determinación de los líquenes foliícolas, utilizando las claves de Santesson (1952), Kalb & Vezda (1988), Lücking (1992, 1997, 2008), Farkas & Sipman (1997) y Rivas Plata *et al.* (2006).

## Resultados

- ***Coenogonium barbatum*** Lücking, Aptroot & Umaña in Rivas Plata, *et al.*, Fungal Diversity 23: 273. 2006. (Fig. 2A).

Talo filamentosos con proyección horizontal del margen del sustrato (hoja), cespitoso o en forma de barba, conformado por una o varios mechones de filamentos unidos por un punto en la base, verde amarillento, hasta 10 mm de largo.

*Distribución y ecología:* Neotropical. Típicamente foliícola, característico del sotobosque.

*Ejemplares estudiados:* COLOMBIA. Chocó: Corregimiento de Tutunendo, Estación Ambiental de Tutunendo, sendero turístico, 100 m, sep. 2009, *Mateus* 531, 1210, 1240, 1418, 1582, 1855, 2029, 2248, 2257, 2386 (COL).

- ***Coenogonium geralense*** (P. Henn.) Lücking Fl. Neotrop. Monogr. 103: 579. 2008; *Ombrophila geralensis* P. Henn., Hedwigia 38 (Beibl.): 65. 1899. (Fig. 2B).

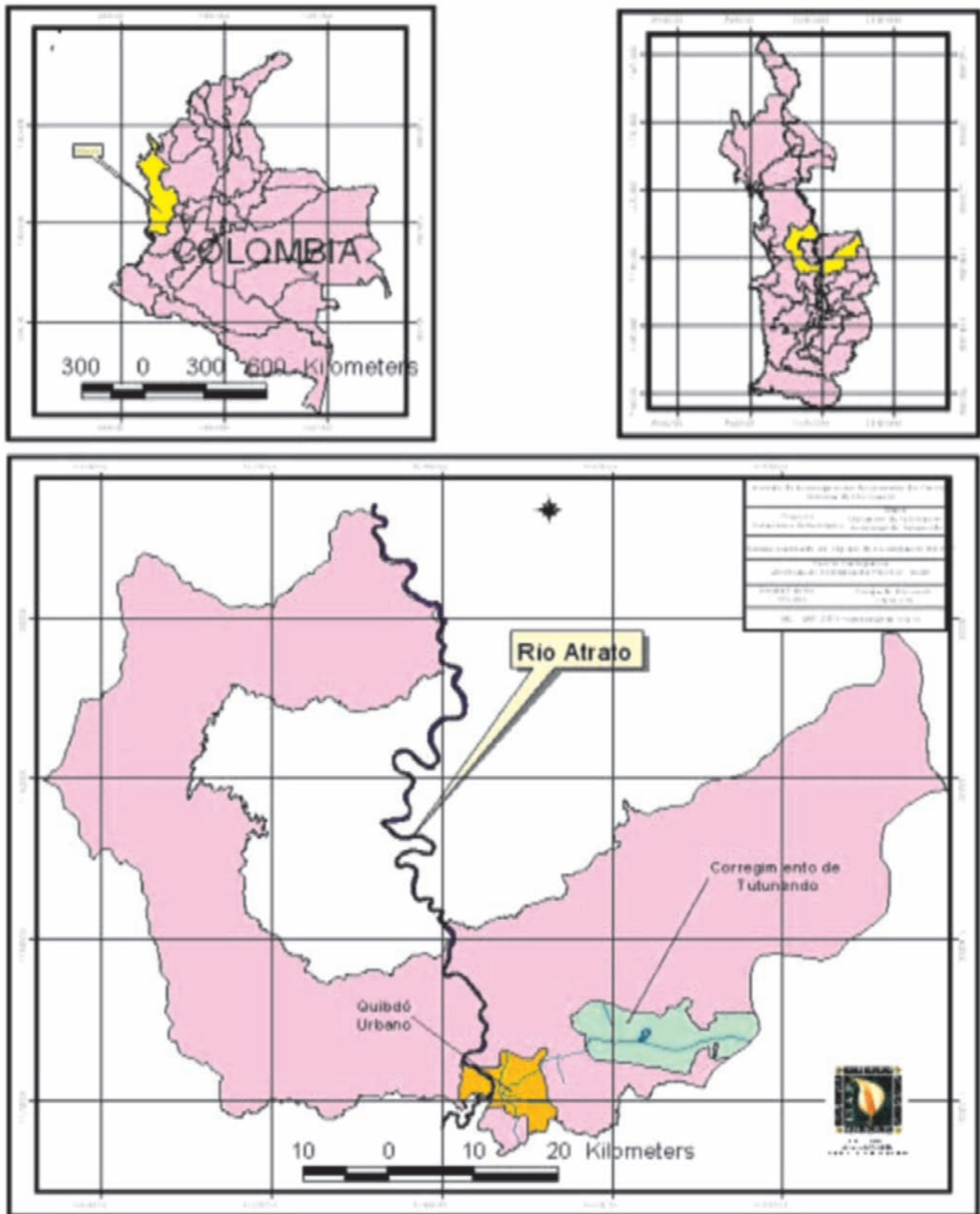
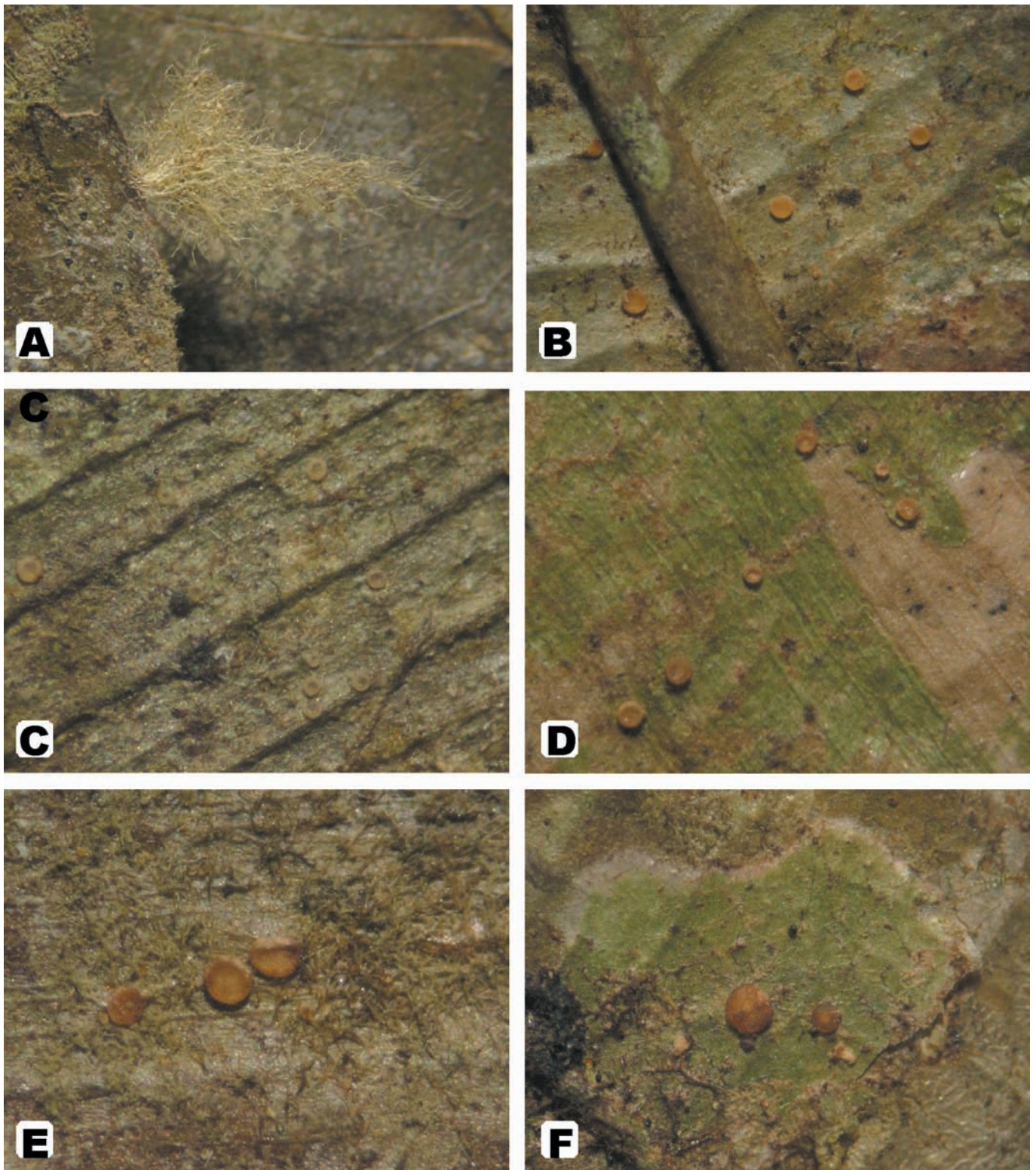


Figura 1. Ubicación geográfica de la Estación Ambiental de Tutunendo (tomado de Cuesta *et al.* 2009).



**Figura 2.** Hábitos de las especies Foliícolas de *Coenogonium*. **A.** *Coenogonium* aff. *barbatum*, talo en forma de barba (tomada de Mateus 2029). **B.** *C. geralense*, talo con apotecios (tomada de Mateus 1256). **C.** *C. lisowskii*, talo con apotecios (tomada de Mateus 1256). **D.** *C. minimum*, talo con apotecios (tomada de Mateus 371). **E.** *C. moniliforme*, talo con apotecios (tomada de Mateus 3449). **F.** *C. siquirrense*, talo con apotecios (tomada de Mateus 457).

Presenta apotecios amarillos, brillantes a pálidos, margen delgada ligeramente prominente, liso. Ascas 45-55 x 6-8 mm. Ascosporas irregularmente biseriadas, elipsoides, 1 septo, 6-9 x 1,5-2,5 mm. Esta especie es anatómicamente similar con *C. siquirrense*, pero esta última se diferencia por sus apotecios, de color naranja con una zona marginal más oscura.

*Distribución y ecología:* Pantropical. Típicamente foliícola, es una de las especies costrosas más comunes del género.

*Ejemplares estudiados:* COLOMBIA. Chocó: Corregimiento de Tutunendo, Estación Ambiental de Tutunendo, sendero turístico, 100 m, sep. 2009, *Mateus* 566, 205, 2085 (COL).

- **Coenogonium lisowskii** (Vezda) Lücking, Lichenologist 33: 201. 2001. (Fig. 2C).

Se caracteriza por la presencia de apotecios cóncavos (urceolados), pálidos, translúcidos, pequeños, 0,05-0,15 mm de diámetro, con un margen prominente, siendo estos los más pequeños dentro del género. Ascosporas elipsoides, 1 septo, 7-9 x 1,8-2,2 mm. Morfológicamente es similar a *C. minimum* pero esta última se diferencia por los apotecios de color naranja, más urceolados y ascosporas mayores.

*Distribución y ecología:* Pantropical. Típicamente foliícola, característico del sotobosque, muy frecuente pero en ocasiones puede pasar desapercibido.

*Ejemplares estudiados:* COLOMBIA. Chocó: Corregimiento de Tutunendo, Estación Ambiental de Tutunendo, sendero turístico, 100 m, sep. 2009, *Mateus* 1249, 1256, 1386, 1389, 1393, 1630, 2883 (COL).

- **Coenogonium minimum** (Müll. Arg.) Lücking, Fl. Neotrop., Monogr. 103: 572. 2008. (Fig. 2D).

La principal característica de esta especie es la presencia de un apotecio pequeño de color naranja a marrón pálido, fuertemente cóncavos (urceolados). Ascosporas elipsoides-fusiformes, 1 septo, 10-14 x 3-4 mm. Presenta similitud con *C. lisowskii* en el tamaño de apotecio, pero difieren en la forma de los apotecios y el tamaño de sus ascosporas, siendo en este último caso más pequeñas.

*Distribución y ecología:* Neotropical. Típicamente foliícola, se ha reportado restringida para Centro América y el Caribe.

*Ejemplares estudiados:* COLOMBIA. Chocó: Corregimiento de Tutunendo, Estación Ambiental de Tutunendo, sendero turístico, 100 m, sep. 2009, *Mateus* 22, 176, 177, 371, 373, 382, 394, 559, 580, 771, 1059, 2654, 2655, 2665, 3443 (COL).

- **Coenogonium moniliforme** Tuck., Proc. Am. Acad. Arts Sci. 5: 416. 1862. (Fig. 2E).

Talo filamentosos a piloso, continuo, formando densos parches sobre el sustrato, verde pálido a oscuro; fotobionte filamentosos con células globosas. Apotecios sésiles, redondeados, 0,2-0,4 mm de diámetro, disco plano, naranja, margen delgado, no prominente, pálido. Ascas 40-55 x 6-8 mm. Ascosporas irregularmente biseriadas, fusiformes, 1 septo, 11-13 x 3-4 mm. Picnidios no observados. Esta especie se caracteriza por el talo filamentosos que se encuentra adherido al sustrato y el fotobionte formando células globosas.

*Distribución y ecología:* Pantropical. Ampliamente distribuido como epifito cortícola en zonas tropicales y subtropicales.

*Ejemplares estudiados:* COLOMBIA. Chocó: Corregimiento de Tutunendo, Estación Ambiental de Tutunendo, sendero turístico, 100 m, sep. 2009, *Mateus* 40, 1336, 3446, 3449, 3461, 3463, 3465 (COL).

- **Coenogonium siquirrense** (Lücking) Lücking, Fl. Neotrop., Monogr. 103: 580. 2008. (Fig. 2F).

Se caracteriza por presentar un hipotalo blanco grisáceo, brillante y apotecios de gran tamaño, de color naranja que toma una tonalidad más oscura hacia el margen. Ascosporas elipsoides a oblongas, 1 septo, 6-9 x 2-2,5 mm. Suele confundirse con *C. luteum*, pero esta especie presenta apotecios más pálidos y prominentes y ascosporas más anchas.

*Distribución y ecología:* Neotropical. Típicamente foliícola y es un elemento característico de las comunidades de sotobosque.

*Ejemplares estudiados:* COLOMBIA. Chocó: Corregimiento de Tutunendo, Estación Ambiental de Tutunendo, sendero turístico, 100 m, sep. 2009, *Mateus* 201, 457 (COL).

## Agradecimientos

Agradecemos la cooperación del Instituto de Investigaciones del Pacífico, en la realización del proyecto

“Composición y Riqueza de los Líquenes Foliícolas en la Estación Ambiental de Tutunendo (Chocó)”, al igual que el apoyo de la NSF bajo el proyecto “Neotropical Epiphytic Microlichens” (DEB 0715660). También agradecemos al Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia y al Herbario UDBC Sección Criptógamas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por el soporte logístico.

### Bibliografía

- Cuesta, T. & Machado, R.** 2009. Producción y evaluación de la calidad nutricional del forraje verde hidropónico (FVH) a base de maíz (*Zea mays*) como alternativa para la alimentación de pollos de engorde en la Estación Ambiental Tutunendo, Chocó, Colombia. *Bioetnia* 6(2):127-137.
- Farkas, E. & Sipman, H.** 1997. Checklist of foliicolous lichenized fungi. In e. Farkas & t. Pócs (Eds). *Cryptogams in the phyllosphere: systematics, distribution, ecology, and use. Abstr. Bot.* 21:173-206.
- Kalb, K. & Vezda, A.** 1988. Neue oder bemerkenswerte Arten der Flechtenfamilie Gomphillaceae in der Neotropis. *Bibl. Lichenol.* 29:1-80, 39 p.
- Lücking, R. & Lücking, A.** 1996. Foliicolous lichens and bryophytes. In P. Hietz, R. Lücking, A. Lücking, H. J. M. Sipman, H. F. M. Vester, H. F. M., J. H. D. Wolf & E. Gardette. How to sample the epiphytic diversity of tropical rain forests. *Ecotropica* 2:59-72.
- \_\_\_\_\_. 1992. Foliicolous Lichens - A Contribution to the Knowledge of the Lichen Flora of Costa Rica, Central America. *Beihefte zur Nova Hedwigia* 104:1-179.
- \_\_\_\_\_. 1997. Additions and corrections to the knowledge of the foliicolous lichen flora of Costa Rica. The family Gomphillaceae. *Bibl. Lichenol.* 65:1-109.
- \_\_\_\_\_. 2008. Foliicolous Lichenized Fungi. Organization for Flora Neotropica by the New York Botanical Garden Press. Volume 103.
- Rivas Plata, E., Lücking, R., Aptroot, A., Sipman, H.J.M., Chaves, J.L., Umaña, L. And Lizano, D.** 2006. A first assessment of the Ticolichen biodiversity inventory in Costa Rica: the genus *Coenogonium* (Ostropales: Coenogoniaceae), with a world-wide key and checklist and a phenotype-based cladistic analysis. *Fungal Diversity* 23:255-321.
- Santesson, R.** 1952. Foliicolous lichens. I. A revision of the taxonomy of the obligately foliicolous lichenized fungi. *Symb. Bot. Ups.* 12(1):1-590.
- Sipman, H. J. M., Hekking, W. & Aguirre-C., J.** 2008. Checklist of lichenized and lichenicolous fungi from Colombia. *Bibliotheca José Jerónimo Triana* 20. Instituto de Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Recibido: octubre 26 de 2011.

Aceptado para su publicación: diciembre 15 de 2011.

# ANÁLISIS CLADÍSTICO DE *CENTRONIA* (MERIANIEAE/MELASTOMATACEAE) CON BASE EN CARACTERES MORFOLÓGICOS

Humberto Mendoza-Cifuentes<sup>1</sup>, José Luis Fernández-Alonso<sup>2</sup>

## Resumen

**Mendoza-Cifuentes, H., J. L. Fernández-Alonso:** Análisis cladístico de *Centronia* (Merianieae/Melastomataceae) con base en caracteres morfológicos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (137): 431-450, 2011. ISSN 0370-3908.

*Centronia* es un género neotropical de 15 especies que presenta problemas de circunscripción con otros géneros de la Tribu Merianieae como son *Meriania* y *Graffenrieda*. Para evaluar su monofilia, se realizó un análisis cladístico con base en caracteres morfológicos. En el muestreo se incluyeron 45 especies de 10 géneros; como grupo más externo se utilizó una especie del género *Miconia* de la tribu Miconieae; para *Centronia* se consideraron 13 especies. Un total de 103 caracteres morfológicos fueron utilizados en el análisis. *Centronia* es un grupo polifilético con 10 especies que se asocian al género *Meriania*, una al género *Wurdastom*, dos de posición genérica incierta y un grupo monofilético de dos especies que conforman a *Centronia* "sensu stricto". *Centronia s. str.* no posee sinapomorfías y los caracteres que lo sustentan también se encuentra en *Graffenrieda*, pero la resolución del análisis no permitió concluir aun sobre su transferencia a este género. Se propone que el grupo de especies de *Centronia* del norte de los Andes sea transferido a *Meriania*.

**Palabras clave:** *Centronia*, filogenia, *Graffenrieda*, Melastomataceae, *Meriania*, Merianieae, *Wurdastom*.

## Abstract

*Centronia* is a neotropical genus with 15 species that present circumscription problems with other genus of the tribe Merianieae like *Meriania* and *Graffenrieda*. To test its monophyly, a cladistic analysis of the genus based on morphological characters was carried out. Fourth five species of 10 genera there were included in the sample; one species of *Miconia* from tribe Miconieae was the most external group; of *Centronia* we considered 13 species. A whole of 103 morphological characters was employed. *Centronia* is a polyphyletic group with 10 species associated to the

<sup>1</sup> Investigador independiente, Claustro de San Agustín, Villa de Leyva, Boyacá, Colombia. Correo electrónico: hummendoza@gmail.com

<sup>2</sup> Real Jardín Botánico RJB-CSIC, Plaza de Murillo 2, 28014 Madrid, España. Correo electrónico: jlfernandez@rjb.csic.es

genus *Meriania*, one to *Wurdastom*, 2 of general uncertain position and 2 species that conform the monophyletic group *Centronia* "sensu stricto". *Centronia s.str.* don't has sinapomorphies its characters support also been in *Graffenrieda*, however the resolution of this analysis is not enough to merge it in *Graffenrieda*. Here we propose that the Andean group of this genus should be transfer to *Meriania*.

**Key words:** *Centronia*, *Graffenrieda*, Melastomataceae, *Meriania*, Meranieae, phylogeny, *Wurdastom*.

## Introducción

*Centronia* D. Don es un género neotropical conformado por 15 especies distribuidas entre Colombia, Venezuela y Perú. Las especies se encuentran desde el nivel del mar hasta zonas de páramos, pero la mayoría crecen en el norte de los Andes entre los 1200 y 3000 m de altitud. Dos de sus especies se encuentran en el Escudo Guayanés de Colombia y Venezuela y otras dos en las zonas de la Cordillera del Cóndor en Ecuador y Perú (Wurdack, 1980; Lozano & Becerra, 1999a; Mendoza & Ramírez, 2006). El género fue descrito por Don (1823) y su especie tipo es *C. laurifolia* D. Don.

*Centronia* se ubica dentro de la tribu Meranieae, la cual está constituida por 15 géneros y alrededor de 280 especies neotropicales (Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso, 2010). Triana (1871) y Cogniaux (1891) produjeron monografías del género como parte de sus tratamientos de toda la familia, pero desde entonces no se ha realizado una evaluación taxonómica integral y la literatura existente sólo comprende publicaciones de nuevas especies y tratamientos en floras regionales (Almeda, 1993; Lozano & Becerra, 1999a; Wurdack, 1973, 1980).

La circunscripción de *Centronia* comprende la presencia de cáliz caliptrado con dehiscencia circuncísil y estambres con poro de las anteras orientado ventralmente (Wurdack, 1973). No obstante, estos caracteres son variables dentro del género y además se encuentran en otros de la misma tribu como son *Graffenrieda* DC. y *Meriania* Sw. (Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso, 2010). Todas las especies de *Centronia* poseen caliptras, sin embargo, son de diferentes formas y tienen dehiscencias variables, no sólo circuncísil (Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso, 2010). La orientación del poro de la antera, que se ha utilizado para separar este género de *Meriania* (Wurdack, 1973), es polimórfico en *Centronia*, pues el 67% de sus especies presentan poros dorsales, el 26% ventrales y el 7% apicales (Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso, 2010). *Centronia* es el único género en Meranieae con un taxón con flores haplostemonas y con caracteres que se asocian al género *Wurdastom* B. Wall., de posición tribal

incierto (Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso, 2010). Estas variaciones e inconsistencias en los caracteres diagnósticos no permiten actualmente diferenciar a *Centronia* de géneros cercanos como *Graffenrieda* y *Meriania* y es un indicio de que este taxón no es un grupo natural.

Considerando lo expuesto, este trabajo evaluó la monofilia de *Centronia* por medio de un análisis filogenético basado en caracteres morfológicos. También buscó establecer pautas para redefinir su circunscripción o la posible inmersión de sus especies en otros géneros de la tribu.

## Métodos

### Taxones analizados

Se consideraron 45 especies que representan 10 géneros, 9 de ellos pertenecientes a Meranieae. De las especies se evaluaron un total de 192 ejemplares de 11 herbarios en Colombia, Ecuador y EE.UU. (Apéndice 1). Como grupo más externo se utilizó a *Miconia dodecandra* (Desr.) Cogn. de Miconieae, tribu hermana de Meranieae (Clausing & Renner, 2001; Michelangeli *et al.*, 2004). De Meranieae se consideraron los siguientes géneros reconocidos para la tribu (Renner, 1993): *Phainantha* Gleason (1 sp), *Pachyloma* DC. (1 sp), *Huberia* DC. (1 sp), *Meriania* (13 spp), *Graffenrieda* (7 spp), *Adelobotrys* DC. (3 sp) y *Axinaea* Ruiz & Pav. (3 spp).

Como grupo interno de *Centronia* se consideraron 13 de las 15 especies del género. Se excluyeron *C. pulchra* Cogn. por contar con poco material y ser muy similar a *C. brachycera* (Naudin) Triana (Wurdack, 1973), y *C. eximia* (Naudin) Triana por no encontrarse ejemplares en los herbarios visitados o tener dudas de las determinaciones. También se excluyeron especies inéditas (nomen nudum) como *C. nobilis*, *C. lehmannii* y *C. subrotundifolia*. De *C. reticulata* Triana se utilizaron ejemplares determinados como afín, pero cuya morfología y descripción coinciden con la del tipo. Dada la afinidad de *C. ruizii* Lozano con el género *Wurdastom*, en el análisis filogenético se incluyeron dos especies de este último.

### Caracteres y estados

Se examinaron ejemplares vivos (8 especies) cuando fue posible. Se colectaron flores y frutos en alcohol para realizar disecciones. En caso de no contar con material fresco, se rehidrataron con agua caliente estructuras florales y del fruto obtenidas de ejemplares de herbario plenamente identificados y en algunos pocos casos se observaron directamente los tipos. Se obtuvieron semillas de ejemplares de herbario, las cuales fueron fotografiadas con un microscopio electrónico de barrido (SEM). Las semillas fueron recubiertas con Gold-Paladium por 2 minutos y luego fueron fotografiadas en un microscopio marca Hitachi 4500S-SEM. Para algunas especies se establecieron los estados de caracteres con observación por medio de un microscopio óptico.

Los caracteres y sus estados, en parte, se basaron en los trabajos de **Becquer** (2008), **Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso** (2010), **Michelangeli** (2000), **Penneys** (2007) y **Schulman & Hyvönen** (2003). Los caracteres de las semillas fueron basados parcialmente en **Michelangeli** (2000). En total se consideraron 103 caracteres, de los cuales 48 fueron doble-estado y los demás multiestado; ningún carácter fue considerado como aditivo.

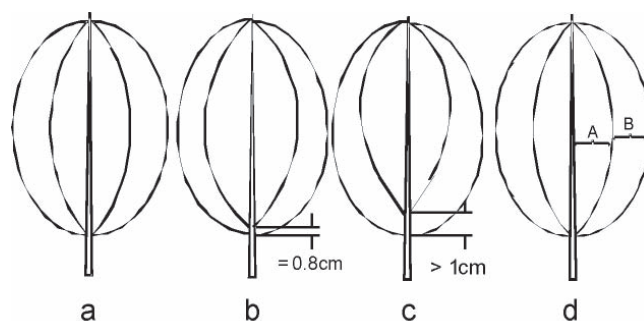
La terminología empleada se basó en **Mendoza & Ramírez** (2006) y **Wurdack** (1973, 1980), y para caracteres referentes al concepto de sinflorescencia se empleó la terminología propuesta por **Mora-Osejo** (1992). Los caracteres utilizados se presentan en el Apéndice 2 y en las Figuras 1 a 8; la lista de los caracteres excluidos se presenta en el Apéndice 3.

### Análisis cladístico

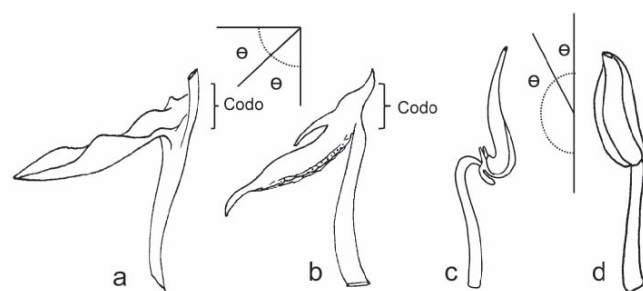
La matriz de datos fue construida y editada con WinClada (**Nixon**, 1999). La filogenia fue realizada por medio del programa Nona y utilizando su interfase WinClada (**Golobof**, 1993). Se consideraron los siguientes parámetros de análisis: estrategia de búsqueda heurística de árboles más parsimoniosos con un número máximo de árboles retenidos de 10000, 1000 réplicas y 10 árboles por réplica de inicio; todos los caracteres fueron pesados igual; finalmente se obtuvo el árbol de Consenso Estricto. Se obtuvieron soportes de los clados usando el Índice de Soporte de Bremer (SB) por medio del programa Paup\* versión 4.0b10 (**Swofford**, 2002), y de acuerdo al procedimiento propuesto por **Hovekamp** (2005).

### Resultados y discusión

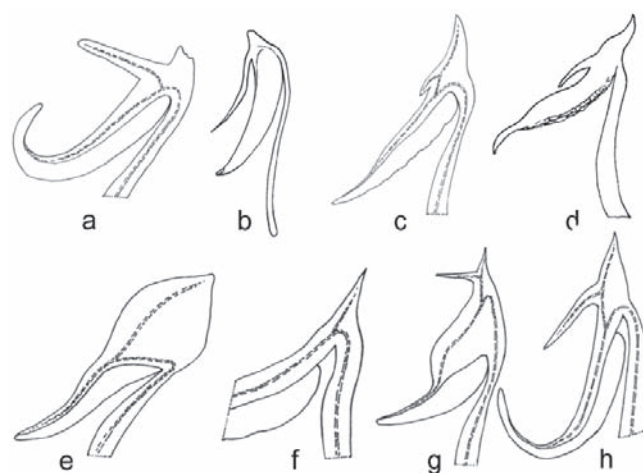
La matriz morfológica construida tuvo un total de 3,1% de caracteres perdidos por desconocimiento de estados



**Figura 1.** Caracteres de la nerviación foliar. **a, b, c,** Carácter 13; **a,** nerviación basal; **b,** nerviación levemente plinervia; **c,** nerviación fuertemente plinervia; **d,** carácter 15, medidas de la relación A/B.

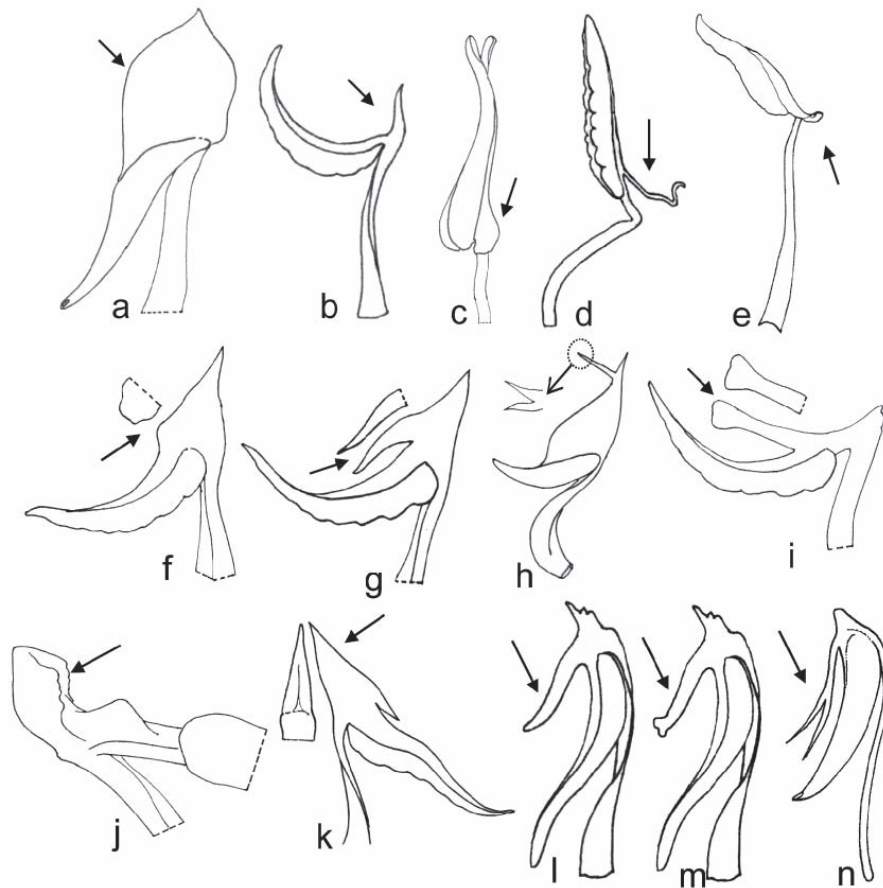


**Figura 2.** Carácter 55 del estambre, disposición filamento-antera. **a, b,** estambre no geniculado, anteras en ángulo agudo a recto con respecto al filamento; **c, d,** estambre geniculado, antera dispuesta en ángulo de 180° o no recto con respecto al filamento.

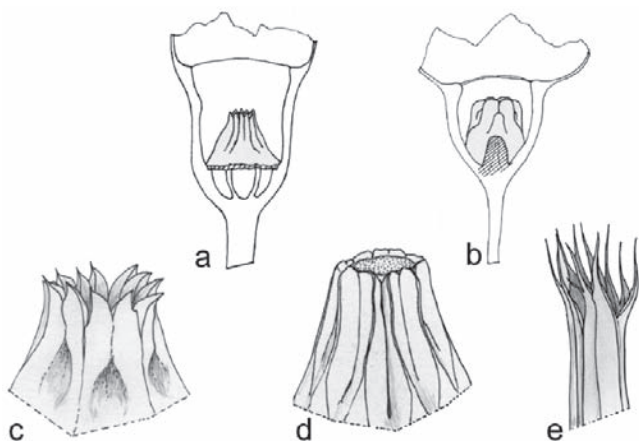


**Figura 3.** Caracteres 57 y 58 del conectivo dorsal de la antera. **a-b,** estambres con haz vascular orientado hacia el ápice de la antera; **a,** representación del haz vascular; **b,** morfología externa de un estambre; **c-d,** estambre con el haz vascular orientado hacia la base de la antera; **c,** representación del haz vascular; **d,** morfología externa del estambre; **e-h,** representación de estambres con haces vasculares orientados hacia la base de la antera; **e, f,** estambres con el haz no bifurcado; **g, h,** estambres con el haz bifurcado.

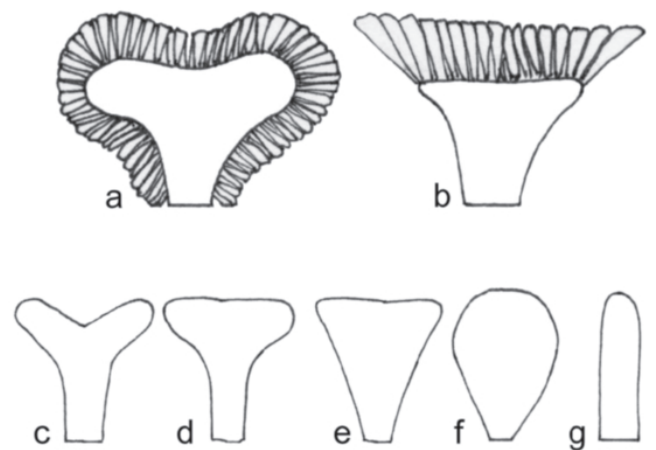




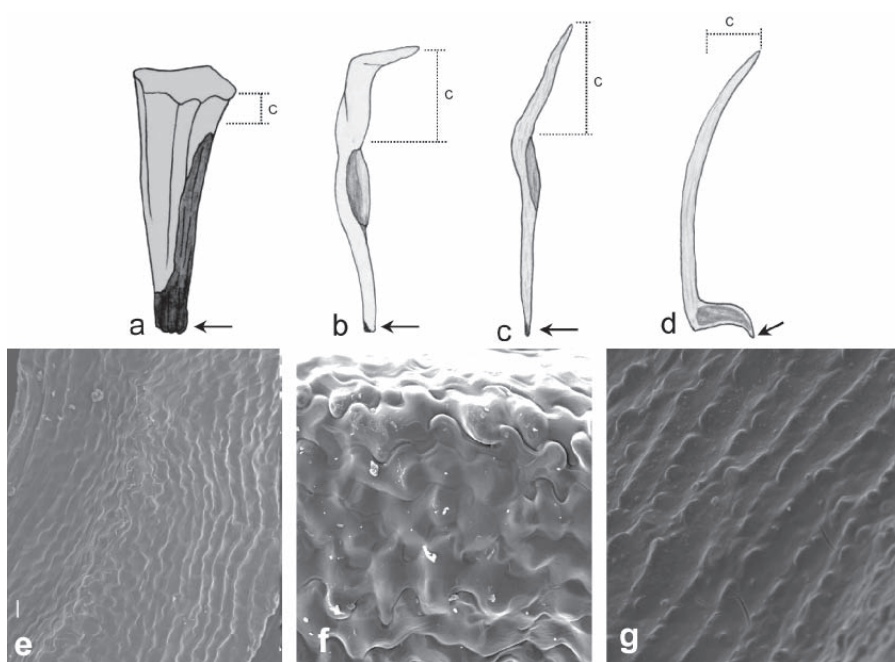
**Figura 4.** Caracteres del conectivo dorsal de la antera. a-e, Caracter 59; a, apéndice globoso; b, subulado; c, a manera de almohadilla; d, filiforme; e, lenguiforme; f-i, Caracter 97; f, apéndice romo o dentiforme; g, subulado; h, bifido; i, cilíndrico; j-k, Caracter 98; j, codo del ápice del filamento truncado e irregularmente rugoso o dentiforme; k, de forma subulada; l-n, Caracter 99; l, apéndice subulado; m, ensanchado en el ápice; n, bifido.



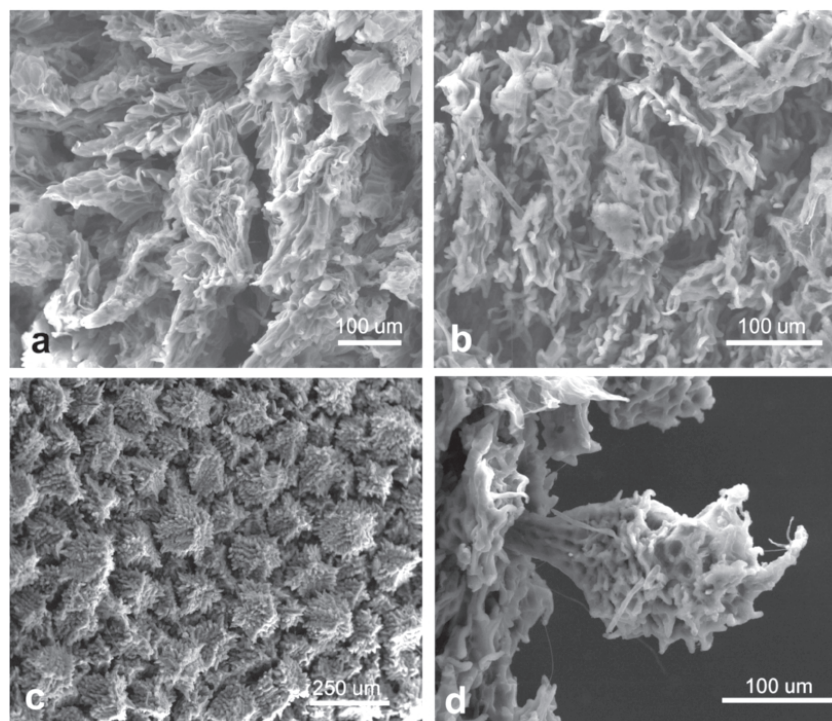
**Figura 5.** Caracteres del ovario. a-b, Caracter 75, forma de fusión del ovario al hipanto; a, en una circunferencia continua; b, en aristas intercaladas; c-e, Caracter 79, forma de los apéndices divididos del ápice del ovario; c, a manera de dientes triangulares; d, redondeados o truncados; e, largos subulados y bifidos.



**Figura 6.** Caracteres de la placenta. a-b, Caracter 84, distribución de los rudimentos seminales; a, sobre todas las superficies; b, sólo en el dorso. c-g, Caracter 83, forma en corte transversal; c, d, en forma de Y o T; e, triangular; f, obovada; g, lineal.



**Figura 7.** Caracteres de la semilla. **a-d**, Caracter 90, forma del ápice (C) de las semillas rectas, las flechas representan el hilo; **a**, de ápice corto y recto; **b**, de ápice largo y recto; **c**, de ápice alargado y filamentososo; **d**, de ápice con pico frontal tan o más largo que el embrión; **e**, Caracter 93, tipo de escultura de la testa a manera de líneas a lo largo de la testa; **f-g**, Caracter 95, notoriedad de las divisiones celulares de la testa; **f**, conspicuas; **g**, no conspicuas.



**Figura 8.** Caracteres de cubiertas ferrugíneas del hipanto. **a-b**, Caracter 101, tipo de tricomas del hipanto; **a**, triangular deltoides; **b**, esponjosos irregulares; **c-d**, Caracter 102, tipo de tricomas triangulares; **c**, deltoides simétricos; **d**, asimétricos irregulares.

de carácter, y 11,8% por estados inaplicables; el 3,6% de los datos representan polimorfismos (Apéndice 4). De la totalidad de caracteres, el 14,5% (15) fueron autopolimórficos, el 44,7% (44) presentaron IR menor de 0,50 y el 44,7% (44) IR mayor o igual de 0,50. Con NONA se obtuvieron 356 árboles más parsimoniosos de 515 pasos incluyendo todos los caracteres y valores del IC de 0,33 y del IR de 0,58 (Farris, 1989).

### Clados que consideran a *Centronia*

La Figura 9 muestra uno de los árboles más parsimoniosos y en donde se mapean los caracteres diagnóstico de *Centronia*. Se observa que el género se anida en siete clados distintos, lo que indica su artificialidad. La especie tipo de *Centronia* (*C. laurifolia*) se anida con *C. reticulata* en un clado junto con *Graffenrieda rupestris*, mientras que el resto de especies se encuentran asociadas en diferentes clados, algunas asociadas a los géneros *Meriania* y *Wurdastom*. El clado con mayor número de especies de *Centronia* se asocia a *Meriania huilensis* en una de las partes más derivadas del árbol.

Los caracteres diagnósticos de *Centronia*, como son la presencia de caliptra (36/3), la dehiscencia circuncísil de la caliptra (37/2) y el poro de la antera orientado ventralmente (53/0) (Triana, 1871; Wurdack, 1973), se encuentran en diferentes partes del cladograma indicando que son homoplásicos. Estos caracteres diagnósticos del género, ya sean considerados de forma individual o como un conjunto de caracteres, no constituyen una sinapomorfía de *Centronia* o de un subgrupo de sus especies (Fig. 9).

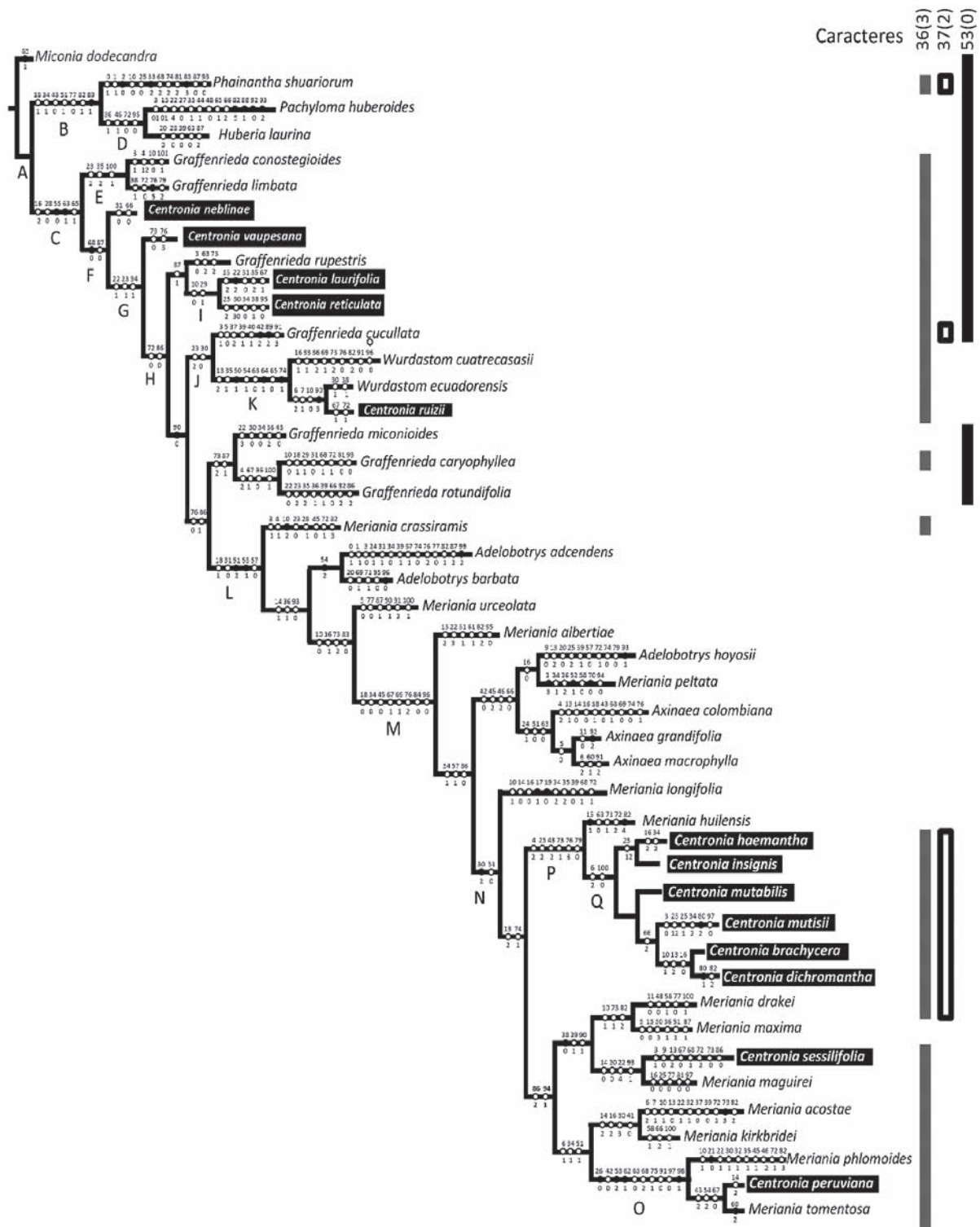
En el árbol de consenso estricto colapsaron 23 nodos y los valores del Índice de Soporte de Bremer (SB) fluctuaron entre 1 y 11 (Fig. 10). En este árbol *Centronia* se anida en siete diferentes clados confirmando su naturaleza polifilética mostrada en uno de los árboles más parsimoniosos. De acuerdo con esto, *Centronia* está conformado por los siguientes grupos: 1) *C. laurifolia* y *C. reticulata* en el clado I; 2) *C. neblinae*, sin una relación de parentesco definida con estos resultados; 3) *C. vaupesana*, sin una relación de parentesco definida con estos resultados; 4) *C. ruizii*, que se relaciona con el género *Wurdastom* en el clado k; 5) *C. sessilifolia*, que se asocia al género *Meriania* en el clado N; 6) *C. peruviana*, asociada con especies de *Meriania* en el clado O; 7) *C. haemantha*, *C. insignis*, *C. mutabilis*, *C. mutisii*, *C. brachycera* y *C. dichromantha*, asociadas al género *Meriania* en el clado Q (Fig. 10).

**Clado I.** Se puede considerarse como *Centronia* “*sensu stricto*” puesto que contiene a la especie tipo del género.

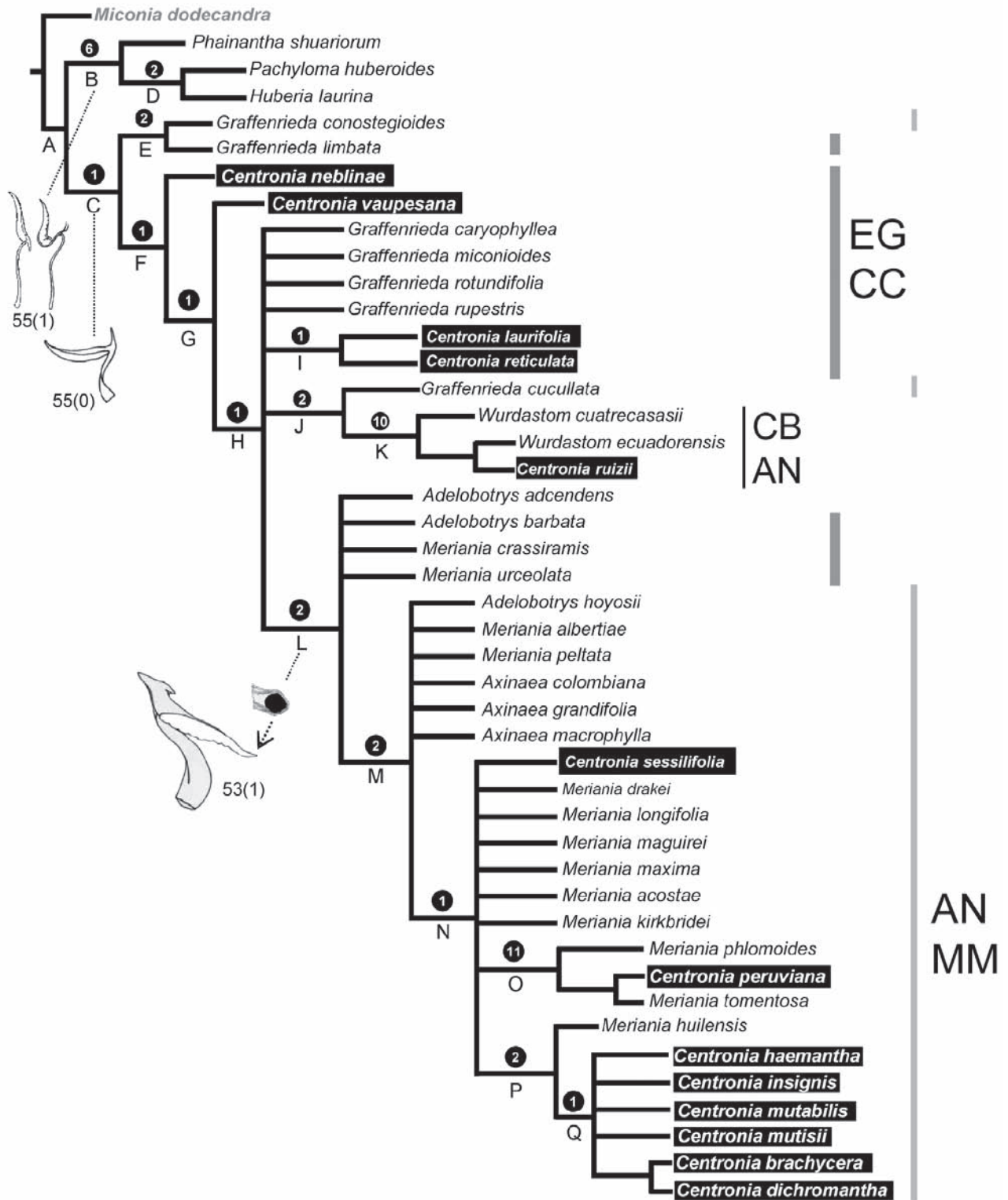
No posee sinapomorfías y el conjunto de caracteres que lo soporta se asocian a la forma del peciolo (10/0), las flores sésiles (29/1), el ovario levemente fusionado al hipanto (74/0), el ápice del ovario con apéndices fimbriados (79/2), y las semillas de ápice alargado (90/1); todos estos caracteres resultaron ser poco informativos. Este conjunto de dos especies, junto con *C. neblinae* y *C. vaupesana*, comparten con el género *Graffenrieda* caracteres como el poro de la antera orientado ventralmente (53/0), las anteras fuertemente arqueadas hacia el dorso (63/1), las placentas triangulares en corte transversal y con rudimentos seminales sólo en la superficie dorsal (83/1, 84/1), y las anteras con el haz vascular del conectivo dorsal no bifurcado (58/1). A pesar de estas semejanzas, el nivel de resolución del árbol de consenso estricto, no permite considerar estas especies como parte de *Graffenrieda* y su resolución demandaría un análisis con mayor muestreo. Este último género cuenta con 54 especies (Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso, 2010) y sólo siete de ellas fueron consideradas en este trabajo.

**Clado K.** El clado K con el género *Wurdastom* y donde se encuentra *C. ruizii*, indica que esta última especie está mal ubicada genéricamente. Este clado está fuertemente soportado (SB = 10) y cuenta con tres caracteres sinapomórficos como son flores haplostemonas (50/1), ovario ínfero (74/1) y anteras oblongas (64/1) (Figs. 9 y 10). El primer carácter no es conocido en la tribu Merianieae, el segundo sólo se conoce en el género *Merianthera* Kuhlman y el último se encuentra sólo en algunas especies de *Behuria* Cham. y *Bisglaziovia* Cogn. (Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso, 2010). *Wurdastom* es un género reciente y de posición tribal incierta (Wallnöfer, 1996), aunque los caracteres del ovario y el número de estambres permiten asociarlo al género *Allomaeita* Gleason de la tribu Cyphostileae (Lozano & Becerra, 1999b). Su anidamiento cerca de algunas especies de *Graffenrieda* se deba a efectos de muestreo, ya que este análisis no incluyó taxones de la tribu Cyphostileae. *Centronia ruizii* indudablemente debe ser transferida a *Wurdastom* y, en especial, ser confrontada con *W. sneidernii* (Wurdack) B.Wal., pues comparten muchos caracteres y la localidad tipo.

La totalidad de las especies restantes de *Centronia* se ubicaron a partir del clado N, en donde sólo se encuentran, adicionalmente, especies del género *Meriania*. Dentro de este grupo se encuentra el clado O, con *C. peruviana*, *M. tomentosa* y *M. phlomoides* el cual presentó el mayor soporte de todo el árbol de consenso estricto con un SB de 11. Este clado se caracteriza por las corolas tubulosas (42/0), inflorescencias con grandes forófilos en inflorescencias jóvenes (26/0), anteras seudoresupinadas y con



**Figura 9.** Uno de los 356 árboles más parsimoniosos del análisis cladístico de *Centronia* D. Don (Meranieae), realizado con NONA. Letras mayúsculas representan nodos que no colapsan en el Consenso Estricto; los números son los caracteres (parte superior) y sus estados (parte inferior). Los puntos negros corresponden a sinapomorfias o autapomorfias. En la derecha se mapean los caracteres diagnósticos de *Centronia*: 36(3) cáliz caliptrado, 37(2) caliptra con dehiscencia circuncisil, 53(0) anteras con poros ventrales.



**Figura 10.** Árbol de Consenso Estricto de 356 árboles más parsimoniosos de la evaluación filogenética de *Centronia* D. Don (Merianieae), realizado con NONA. Ilustraciones con números representan caracteres sinapomórficos de los principales clados; (E) Índice de Soporte de Bremer. En la derecha se mapean regiones geográficas: CB, Chocó biogeográfico; AN, norte de los Andes; EC, Escudo Guayanés; CC, Cordillera del Cóndor en Ecuador-Perú; MM, Magdalena Medio de Colombia.

poro apical (53/2, 62/0), y conectivo dorsal de forma irregular (98/1). *Centronia peruviana* fue descrita por Macbride (1941) en "Flora of Peru" y fue considerada dentro de *Centronia* por la presencia de la caliptra a pesar de que su dehiscencia es por fisuras irregulares. La especie comparte muchos caracteres con *M. tomentosa* a tal punto que puede ser considerada como una forma de ésta última y debe ser sinonimizada. El clado O se puede decir que representa un grupo muy particular dentro de *Meriania* por los caracteres de la corola tubulosa (40/2) y las anteras pseudoresupinadas (53/2). Este grupo está conformado por unas 18 especies que crecen desde Bolivia hasta Venezuela y Costa Rica, a lo largo de los Andes y el Chocó biogeográfico, y también por algunas especies que crecen en las Antillas, como *M. involucrata* (Desr.) Naudin. Dentro de *Meriania*, este grupo es plenamente reconocible con el anterior conjunto de caracteres.

**Clado Q.** El clado Q, es el mayor grupo constitutivo de *Centronia* con cinco especies. Este grupo de *Centronia* se caracteriza por los estambres isomórficos (51/0), las caliptras de ápice agudo (38/1-2), cubierta del hipantocaliptra de tricomas ferrugíneos pinoide-deltoides (100/1), y cambio de coloración de los pétalos de rojo púrpura a violeta (47/0). De acuerdo con estos resultados, este conjunto de especies puede ser transferido a *Meriania* y es posible considerarlo como un grupo natural dentro de este género ya que el anterior conjunto de caracteres no se encuentra en otras especies de *Meriania* (Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso, 2012).

**Clado N.** Finalmente, la especie *C. sessilifolia*, presente en el clado N, tiene caracteres que permiten transferirla a *Meriania* como son el tamaño de los pétalos y la forma de los estambres (caracteres 30/2, 57/1, 58/0). Esta especie comparte caracteres particulares con *M. maguirei* como son las caliptras de ápice redondeado (38/0), presencia de dientes dorsales del cáliz (39/1) e inflorescencias reducidas (20/0).

#### Clados basales (Meranieae)

En el árbol de consenso estricto se diferencian dos grupos en la tribu Meranieae: el de *Phainantha*, *Huberia* y *Pachyloma* (clado B) con valor del SB de 6, y el grupo de *Graffenrieda*, *Meriania*, *Axinaea*, *Adelobotrys* y *Centronia* (clado C), con valor del SB de 1 (Fig. 10). El clado B presentó estambres geniculados, semillas aladas o cocleadas y placentas lineares excepto por *Pachyloma*. El clado C presentó dos sinapomorfías que son los estambres no geniculados y las anteras rectas o curvadas hacia el dorso y no hacia el vientre; este clado también se caracterizó por las semillas cuneiformes o filamentosas. Resultados similares documentan Schulman & Hyvönen (2003),

donde separan a "Core Meranieae" de otros géneros entre los que se encuentran *Pachyloma*, *Behuria* y *Huberia* (PBH Clade). Se puede decir que en Meranieae existen dos grupos de géneros: los de estambres geniculados y los de estambres no geniculados (Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso, 2010). Este último grupo constituye el clado C de este trabajo y comprende cinco de los 15 géneros que constituyen la tribu; no obstante, estos cinco géneros poseen el 80% de las especies de Meranieae (Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso, 2010).

#### Clados relacionados con *Graffenrieda* y *Meriania*

Considerando que la mayor parte de las especies de *Centronia* se asocian ya sea a *Graffenrieda* o a *Meriania*, es importante comentar aspectos de las diferencias entre estos dos géneros de acuerdo con los resultados de este análisis cladístico.

**Graffenrieda.** Los subclados basales dentro del clado C involucraron principalmente a especies del género *Graffenrieda* (clados E, H, J). El nivel de resolución del árbol de consenso estricto no permite establecer mayor comentario sobre este género, no obstante, *Graffenrieda* tiene caracteres estables del cáliz y los estambres (Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso, 2010), así como del ovario y de los pétalos, que permiten separarlo de otros géneros de Meranieae. Entre estos caracteres se encuentran: el poro de la antera orientado ventral o apicalmente (53/0-2); las anteras arqueadas hacia el dorso (63/1), placentas triangulares en corte transversal y con rudimentos seminales sólo en la superficie dorsal (83/1, 84/1), y estambres con un haz vascular del conectivo dorsal no bifurcado (58/1). El anterior conjunto de caracteres, junto con los pétalos diminutos a medianos y de coloración blanca o rosada, sólo se encuentra en *Graffenrieda* y permite diferenciarlo principalmente de *Meriania*. Como se comenta párrafos arriba, cuatro especies de *Centronia* comparten algunos de estos caracteres con *Graffenrieda*, lo que sugiere su posible transferencia en este último género, no obstante, el árbol de consenso estricto no muestra suficiente resolución al respecto y es necesario un análisis con mayor muestro.

**Meriania.** Por otro lado, el género *Meriania* se muestra más derivado en el árbol de consenso estricto con respecto a *Graffenrieda*, y se encuentra a partir del clado L (Fig. 10). Este clado presenta SB de 2 y 11 caracteres de soporte, dos de ellos sinapomórficos: dimorfismo estaminal (51/2), y anteras con poros dorsales (53/1). Los bajos valores del SB, el anidamiento de especies de los géneros *Adelobotrys*, *Axinaea* y *Centronia* dentro de este clado, y

la gran variabilidad en los caracteres de los estambres y el cáliz (**Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso**, 2010) permite sugerir que *Meriania* no es un grupo natural. Considerando futuros arreglos o depuraciones de este género, algunos de los caracteres importantes que pueden sustentar a *Meriania* son: anteras con poros dorsales (53/1) y pétalos de tamaño grande a gigante (30/2-3). El carácter de la placenta con rudimentos seminales en todas las superficies (84/0) fue estable en todas las especies de este género en este análisis, pero aun falta mayor evaluación en otras especies.

### Aspectos biogeográficos

Las consideraciones biogeográficas que pueden deducirse del árbol de consenso estricto no son muy amplias dado el grado de resolución dentro del clado C. En la parte basal de este clado son coincidentes grupos del Escudo Guayanés y zonas de los Andes asociadas a la Cordillera del Cóndor en los límites entre Ecuador y Perú. En la parte más derivada se encuentran grupos de los Andes del norte (Fig. 10). Todas las especies de *Centronia* no asociadas a *Meriania* se encuentran en el Escudo Guayanés y Cordillera del Cóndor, mientras que las especies que se asocian a *Meriania* se restringen a los Andes excepto por *C. ruizii*. Esta asociación geográfica respalda aun más los distintos orígenes de grupos de especies de *Centronia* y su artificialidad taxonómica.

El grupo con mayor número de especies de *Centronia*, clado Q, se concentra en el norte de los Andes, en especial en la Cordillera Oriental de Colombia y su continuación en Venezuela entre los 1200 m hasta zonas de páramo. En Ecuador este grupo solo está representado en el norte, cerca de la frontera con Colombia, y vuelve a aparecer en el norte de Perú (*C. haemantha*). Esta asociación geográfica confirma la necesidad de transferir las especies de *Centronia* de los Andes del norte al género *Meriania* (**Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso**, 2012).

El clado K, en donde se encuentra *Centronia ruizii* y especies de *Wurdastom*, se encuentra en la planicie del Chocó biogeográfico y a lo largo del piedemonte occidental de los Andes hasta los 2000 m de altitud. Como se discute arriba, su presencia dentro del clado C obedece a efectos de muestreo, por lo que no se puede establecer alguna relación biogeográfica con estos resultados.

### Variación y evolución de caracteres

A continuación se discuten algunos de los caracteres con mayores valores del IR y que pueden ser importantes taxonómicamente dentro del clado C de Meranieae. También se consideran algunos caracteres ampliamente utilizados dentro de la tribu.

Entre los caracteres vegetativos es importante resaltar la nerviación foliar. Los caracteres 14 y 15, con valores del IR de 0,54 y 0,72 respectivamente, mostraron correspondencia geográfica y taxonómica. La nerviación con sólo un par de venas secundarias y cercanas a la margen (broquidódroma) fue constante en todas las especies de *Graffenrieda* no andinas consideradas en el análisis, lo que indica que puede ser un carácter útil dentro de este género. En *Meriania* el carácter 14 es variable pero predomina la nerviación con varios pares de venas secundarias.

Caracteres del cáliz han sido utilizados clásicamente para diferenciar géneros y establecer secciones dentro de géneros en Meranieae (**Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso**, 2010). Esta estructura es bastante plástica en la tribu y algunos de sus caracteres resultaron ser homoplásicos en este análisis. Los caracteres 36 al 40 corresponde al cáliz y sus valores del IR fluctuaron entre 0,0 y 0,32, excepto por el carácter 37 (forma de apertura de las caliptras). Este último carácter muestra ser plesiomórfico en su estado “apertura por fisuras irregulares”. El carácter “presencia de caliptra” ha emergido varias veces en Meranieae (clado C) y no es útil para establecer diferencias genéricas en la tribu. Este carácter se encuentra en la tribu Cyphostileae (**Lozano & Becerra**, 1999b) y en varios géneros de Miconieae, Blakeeae y Henrietteae (**Mendoza & Ramírez**, 2006; **Penneys**, 2007; **Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso**, 2010; **Penneys et al.**, 2010), lo que muestra que también es homoplásico al nivel de la familia.

El tamaño de los pétalos (30) mostró un IR de 0,64 y es un subrogado del tamaño de la flor. De acuerdo con los resultados, los pétalos grandes a gigantes es el estado derivado y caracteriza al grupo netamente andino de *Meriania* (clado O). Los pétalos de tamaño pequeño a mediano predominaron en las especies de *Graffenrieda*. Otro carácter de los pétalos es el cambio de coloración de rojo púrpura a violeta (47), con un IR de 1, siendo este cambio un carácter derivado que caracteriza al clado Q. El tipo de corola (42) también presentó un valor alto del IR y los resultados indican que las corolas tubulosas son un carácter derivado y en *Meriania* ha emergido en dos grupos distintos: en el grupo de *Meriania tomentosa* y en el grupo de especies asociado a *Meriania peltata*.

De caracteres de los estambres es importante resaltar la orientación del poro de la antera en estambres opositipétalos (53), con un IR de 1. En *Graffenrieda* este carácter varía en especies asociadas a los Andes, como *G. cucullata*, con poros apicales, pero en el resto de especies siempre es ventral. En *Meriania*, *Adelobotrys* y *Axinaea*,

la orientación del poro es dorsal excepto por un pequeño grupo en *Meriania* con poros apicales (clado O). El carácter 55 es igualmente importante pues permite separar dos grandes grupos dentro de Meranieae. Este carácter es invariable dentro del clado C, donde se encuentran estambres no geniculados (55/0); no obstante, este estado de carácter también se encuentra en algunas especies de *Blakea* de la tribu Blakeeae (Penneys, 2007).

Los caracteres asociados a la placenta han sido poco utilizados en Melastomataceae, no obstante, trabajos como el de Schulman & Hyvönen (2003) y de Becquer (2008) documentan que poseen valor filogenético. Dentro de Meranieae clado C, los caracteres 83 y 84 de forma de la placenta y distribución de los rudimentos seminales, respectivamente, presentaron altos valores del IR y mostraron ser congruentes. El carácter 84 muestra una clara diferencia entre taxones como *Graffenrieda* y los géneros *Meriania*, *Adelobotrys* y *Axinaea*. De acuerdo con estos resultados las placentas con rudimentos sólo en dorso corresponde al estado plesiomórfico dentro del clado C.

La forma de la semilla también es otro carácter importante para establecer el clado C de Meranieae. Sin embargo, dentro de este clado los caracteres como la forma del ápice o “cabeza” de la semilla y de la testa presentaron bajos valores del IR y variaciones dentro de subclados, que indican cierto nivel de plasticidad. Por ejemplo, la cabeza de las semillas en *Adelobotrys* y *Meriania* es variable entre cabeza alargada y cabeza corta.

## Conclusiones

La evaluación filogenética de *Centronia* con base en caracteres morfológicos indica que el género es polifilético. Las especies del género se anidaron en siete lugares distintos del árbol de consenso estricto. De acuerdo con esto *Centronia s. str.* se reduce a *C. laurifolia* y *C. reticulata*; una especie debe ser transferida al género *Wurdastom* (*C. ruizii*), y 10 especies deben transferirse al género *Meriania* (*C. sessilifolia*, *C. peruviana*, *C. haemantha*, *C. insignis*, *C. mutabilis*, *C. mutisii*, *C. brachycera*, *C. dichromantha*, *C. pulchra* y *C. eximia*). Las especies *C. neblinae* y *C. vaupesana* se consideran de posición genérica incierta y para su plena resolución filogenética es necesario realizar un análisis cladístico completo del género *Graffenrieda*.

*Centronia s. str.* no posee caracteres sinapomórficos y el conjunto de caracteres que lo sustenta también se encuentra en *Graffenrieda*. No obstante, el nivel de resolución del árbol de consenso estricto no permite concluir aun sobre su inmersión o fusión con *Graffenrieda*.

## Agradecimientos

Este proyecto (Núm. 201010011273) contó con la financiación de la Dirección de Investigación (DIB) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá a quien expresamos nuestro agradecimiento. Del mismo modo, el segundo autor agradece al Ministerio de Ciencia e Investigación de España, el apoyo del Proyecto CGL 2010-19747 (Subprograma BOS) para la finalización de este trabajo. Nuestros sinceros agradecimientos a las siguientes instituciones por la ayuda prestada para el desarrollo de este trabajo: Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia; Instituto Alexander von Humboldt; Field Museum de Chicago, Missouri Botanical Garden, New York Botanical Garden, Instituto Smithsonian; los herbarios COL, COAH, FMB, CUVC, HUQ, CAUP, QCA, QCNE, MO, F, NY, UPTC, US. A los colegas Fabian Michelangeli, Carmen Ulloa, Corine Vriecendrop, Tyana Wachter, Robin Foster, William Ariza, Gorky Villa, Wilson Quishpe y Janet Muñoz quienes contribuyeron de forma variada, suministrando imágenes, ejemplares o facilitando el apoyo logístico. A Fernando Alzate, Fabio González, Carlos Parra y a dos evaluadores anónimos por sus valiosas observaciones al manuscrito.

## Referencias bibliográficas

Considera las referencias citadas en el Apéndice 2

- Almeda, F. 1993. An evaluation of the mesoamerican species of *Meriania* (Melastomataceae: Meranieae). Proceedings of the California Academy of Sciences 48(7):141-152.
- Becquer, E. R. 2008. Taxonomía y filogenia del género *Pachyanthus* (Melastomataceae: Miconieae). Universidad de la Habana, Jardín Botánico Nacional, Cuba. Tesis de Doctorado.
- Clausing, G. & S. S. Renner. 2001. Molecular phylogenetics of Melastomataceae and Memecylaceae: implications for character evolution. American Journal of Botany 88(3):486-498.
- Cogniaux, A. 1891. Melastomatacées. (p. 425). En: de Candolle (ed.), Monographie Phanerogamarum 7. Paris.
- Don, D. 1823. An Illustration of the natural family of plants called Melastomataceae. Memoirs of the Wernerian Natural History Society. Edinburgh.
- Farris, J. S. 1989. The retention index and the rescaled consistency index. Cladistics 5:417-419.
- Goloboff, P. 1993. Nona. Versión 2.0. Software and documentation by the author. Tucuman, Argentina.
- Hovenkamp, P. 2005. Branch Support. Nationaal Herbarium Nederland, Leiden University. Leiden (Fecha de consulta: 5/ Jun/2009. <http://www.nationaalherbarium.nl/taskforcemoleculair/PDF/Branch%20supporters.pdf>).
- Lozano, G. & N. Becerra. 1999a. Notas sobre el género *Centronia* (Melastomataceae) en Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias 23:79-83.



- Lozano, G. & N. Becerra.** 1999b. Los géneros *Allomaieta* y *Cyphostyla* (Melastomataceae). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias* **23**(86):5-18.
- Macbride, J. F.** 1941. Melastomataceae - Flora of Peru. Publications of the Field Museum of Natural History. Botanical series 13, pt. 4:327.
- Mendoza-Cifuentes, H. & B. Ramírez.** 2006. Guía ilustrada de géneros de Melastomataceae y Memecylaceae de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt; Universidad del Cauca, Bogotá D.C. 288 p.
- \_\_\_\_\_, **J. L. Fernández-Alonso.** 2010. Evaluación de caracteres del cáliz y los estambres en la tribu Merianieae (Melastomataceae) y definición de homología. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias* **34**(131): 143-172.
- \_\_\_\_\_, **J. L. Fernández-Alonso.** 2012. Novedades en *Centronia* y *Meriana* (Merianieae, Melastomataceae) y revisión taxonómica del "Grupo Brachycera". *Anales del Jardín Botánico de Madrid -Entregado-*.
- Michelangeli, F.** 2000. A cladistic analysis of the genus *Tococa* (Melastomataceae) based on morphological data. *Systematic Botany* **25**(2):211-234.
- \_\_\_\_\_, **D. S. Penneys, J. Giza, D. Soltis, M. H. Hils & J. D. Skean Jr.** 2004. A preliminary phylogeny of the tribe Miconieae (Melastomataceae) based on nrITS sequence data and its implications on inflorescence position. *Taxon* **53**(2):279-290.
- Mora-Osejo, L. E.** 1992. La evolución de la reproducción en la cormobionta y de las unidades de crecimiento y floración de las Angiospermae. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias* **18**(70):311-322.
- Nixon, K. C.** 1999. WinClada. Version 1.00.08. Software and documentation distributed by the author. Cornell University, Ithaca, N.Y.
- Peneys, D. S.** 2007. Phylogeny and character evolution in the Blakeeae (Melastomataceae). Tesis de Doctorado, University of Florida. 176 p.
- \_\_\_\_\_, **F.A. Michelangeli, W.S. Judd & F. Almeda.** 2010. Henrietteae (Melastomataceae): A new neotropical berry-fruit tribe. *Systematic Botany* **35**(4):783-800.
- Renner, S. S.** 1993. Phylogeny and classification of the Melastomataceae and Memecylaceae. *Nordic Journal of Botany* **13**(5):519-550.
- Schulman, L. & J. Hyvönen.** 2003. A cladistic analysis of *Adelobotrys* (Melastomataceae) based on morphology, with notes on generic limits within the Tribe Merianieae. *Systematic Botany* **28**(4):738-756.
- Swofford, D. L.** 2002. Paup\* Phylogenetic Analysis Using Parsimony (\*and other methods). Versión 4.0b10 para Macintosh. Sinauer, Sunderland.
- Triana, J.** 1871. Les Melastomacées. *Transactions of the Linnean Society of London* **28**:1-188.
- Varassin, I. G., D. S. Penneys & F. A. Michelangeli.** 2008. Comparative anatomy and morphology of nectar-producing Melastomataceae. *Annals of Botany* **102**:899-909.
- Wallnöfer, B.** 1996. A revision of the genus *Alloneuron* Pilg. and segregation of *Wurdastom* gen. n. (Melastomataceae). *Annalen Naturhistorischen Museums in Wien* **98B** Supplement: 447-462.
- Wurdack, J. J.** 1973. Melastomataceae (Memecyleae by T. Morley). P 1-819. En: T. Lasser (ed.). *Flora de Venezuela*. No. 8. Instituto Botánico, Ministerio de Agricultura y Cría, Caracas.
- \_\_\_\_\_. 1980. Melastomataceae. En: G. Harling & B. Sparre (eds.). *Flora of Ecuador*. No. 13. Univ. Göteborg & Riksmuseum, Stockholm. 406 p.

Recibido: abril 13 de 2011.

Aceptado para su publicación: diciembre 2 de 2011.

### Apéndice 1. Lista de ejemplares revisados.

#### \* Ejemplares evaluados con flores o frutos fresco preservados en alcohol

*Adelobotrys adscendens* (Sw.) Triana - C. Barbosa 1449 (FMB), A. Gentry 15243 (COL), M. Silva 2383 (COL), J. Cuatrecasas 26079 (COL), D. Soejarto 2664 (COL), E. Renteria 29 (COL), D.D. Soejarto 3211 (COL), M. Correa 3506 (COL), J.D. Shepherd 690 (COL) / *A. barbata* Triana - R. E. Schultes 15908 (COL), R. E. Schultes 17129 (COL), C. Sastre 218 (COL), M. Colella 2195 (NY), J. G. Wessels 2361 (US), M. Córdoba 410 (COL), H. Poppendieck 79-183 (US) / \**A. hoyosii* Wurdack - H. Mendoza 16884 (FMB), H. Mendoza 16918 (FMB) / *Axinaea colombiana* Lozano & Alvear - W. Devia 1960 (COL), W. Devia 2042 (COL), H. Sánchez 819 (FMB), Wolf 910 (COL) / *A. grandifolia* (Naudin) Triana - H. G. Barclay 10320 (COL), B. Maguire 62098 (COL), W. Schwabe sn (COL) / \**A. macrophylla* Triana - B. Ramírez 12613 (FMB), H. Mendoza 16719 (FMB), A. S. Barclay 3207 (FMB) / *Centronia insignis* (Naudin) Triana - J. A. Steyermark 100822 (COL), H. Mendoza 14677 (FMB), H. García-Barriga 20726 (COL), H. Mendoza 7207 (FMB) / *C. aff. reticulata* Triana - F. Woytkowski 8029 (US), T. B. Croat 8029 (MO) / \**C. brachycera* (Naudin) Triana - A. Prieto 1768 (FMB), A. Prieto 1921 (FMB), A. Prieto 1928 (FMB), S. Cortés 3077 (COL), R. Schultes 3186A (COL), M. Hernández 979 (COL), J. Duran sn (COL) / \**C. dichromantha* L. Uribe - M. Melampy 1226 (FMB), A. Prieto 1543 (FMB), A. Prieto 1564 (FMB), H. Mendoza 17376 (FMB), C. Rodríguez 23 (FMB), L. Uribe 4246 (COL), L. Uribe 5219 (COL), J. Betancur 9833 (FMB) / \**C. haemantha* (Planch. & Linden) Triana - H. Mendoza 2249 (FMB), H. Mendoza 2330 (FMB), H. Mendoza 2960 (FMB), H. Mendoza 3205 (FMB), H. Mendoza 3258 (FMB), H. Mendoza 4089 (FMB), R. Ardila 82 (FMB), R. López 7500 (FMB) / *C. laurifolia* D. Don - W. Quishpe 2050 (QCNE), W. Quishpe 2058 (QCNE), W. Quishpe 2071 (QCNE), T. B. Croat 97310 (QCNE) / *C. mutabilis* Gleason - C. R. Fernández 15 (HUQ), C. A. Agudelo 1540 (HUQ, COL), W. Vargas 578 (HUQ), H. Rincón sn (HUQ) / \**C. mutisii* (Bonpl.) Triana - H. Mendoza 16974 (FMB), G. Téllez 631 (UDBC, FMB, COL), G. Téllez 632 (UDBC, FMB, COL) / *C. neblinae* Wurdack - M. Nee 31183 (MO), M. Nee 31183 (NY), B. Maguire 42195 (NY), B. Maguire 42507 (F) / *C. peruviana* J.F. Macbr. - M. Dillon 2602 (F), B. Maguire 44432 (COL, NY), J. L. Luteyn 5477 (NY), H. E. Stork 9928 (F) / *C. ruizii* Lozano - J. Díaz 8 (FMB), C. Acevedo 8719 (COL) / *C. sessilifolia* Cogn. - J.G. Sánchez 302 (F), I. Sánchez Vega 4531 (F) / *C. vaupesana* Wurdack - R.E. Schultes 17100 (COL) / *Graffenrieda caryophyllea* Triana - B. Maguire 41596 (COL), J. Cuatrecasas 6881 (COL) / *G. conostegioides* Triana - C. I. Orozco 1116 (COL), H. García-Barriga 12406 (COL), S. Espinal 1508 (COL), G. Lozano 3741 (COL) / *G. cucullata* (Triana) L.O. Williams - H. Mendoza 4005 (FMB), H. Mendoza 828 (FMB), G. Herrera 9593 (FMB), Acosta Solis 12760 (F) / *G. limbata* Triana - E. W. Davis 111 (COL), H. García-Barriga 16033 (COL), J. Zarucchi 1681 (COL), P. H. Allen 3380 (F) / *G. miconioides* Naudin - R.E. Schultes 12936 (COL), M. P. Galeano 1765 (COL), J. Schunke 12554 (F), S. Knapp 8283 (F) / \**G. rotundifolia* (Bonpl.) DC. - A. Cuervo 11 (FMB), P. Vincelli 1128 (FMB), H. Mendoza 15687 (FMB), J. Zarucchi 3415 (FMB), J. Zarucchi 3654 (FMB) / *G. rupestris* Ducke - R. E. Schultes 14566 (COL), J. Espina 297 (COL), J. M. Cardiel 6452 (COL), G. Galeano CHAN 160 (COL), S. Castroviejo CHIN 320 (FMB) / *Huberia laurina* DC. - H. S. Irwin 27911 (COL), W. R. Anderson 8969 (COL) / *Meriania acostae* Wurdack - G. Herrera 9586 (FMB), R. Fonnegra 5711 (MO) / *M. crassiramis* (Naudin) Wurdack - B. Maguire 33336 (MO) / *M. drakei* (Cogn.) Wurdack - Macbride 1001 (QCA, MO), J. Jaramillo 12483 (COL), H. Vargas 2450 (QCNE), W. Palacios 9601 (QCNE, MO) / *M. huilensis* Wurdack - J. Cuatrecasas 11627 (COL), A. Álvarez 1722 (MO), J. E. Henao 223 (COL), J. Cuatrecasas 8614 (COL), G. Mahecha 8868 (COL), E. L. Little 8872 (COL) / *M. kirkbridei* Wurdack - J. H. Kirkbride 4208 (F, Q) / *M. longifolia* (Naudin) Cogn. - R. Jaramillo 102 (COL), H. García-Barriga 17235 (COL), L. Uribe 1824 (COL), W. R. Phillipson 2242 (COL), J. M. Duque-Jaramillo 2645 (COL), S. Díaz 3270 (COL), L. Uribe 3790 (COL), P. Ortíz Valdivieso 4289 (COL), J. M. Idrobo 5338 (COL) / *M. maguirei* Wurdack - D. Neill 12857 (MO), J. Homeier 162 (MO), Carlos Chimbo 25 (MO), G. P. Lewis 3615 (MO) / *M. maxima* Markgr. - D. Neill 11866 (MO), W. Ramírez 161 (MO), E. Cotton 1702 (MO), L. Holm-Nielsen 24460 (MO), A. Gentry 34981 (COL), B. Maguire 44257 (COL), D. Neill 9810 (MO) / \**M. peltata* L. Uribe - H. Mendoza 16641 (FMB), L. Uribe 3285 (MO) / *M. phlomoides* (Triana) Almeda - W. R. Stevens 13985 (MO), B. Hammel 14240 (MO), F. Almeda 2728 (MO), F. Almeda 2872 (MO), W. A. Haber 5337 (MO), M. H. Grayum 7730 (MO) / *M. tomentosa* (Cogn.) Wurdack - E. Gudiño 149 (MO), I. Sánchez Vega 5788 (MO), A. Gentry 65357 (MO), W. Palacios 9838 (MO) / *M. urceolata* Triana - R. Liesner 19279 (MO), R. Liesner 20187 (MO), R. Liesner 20655 (MO), B. Maguire 35409 (MO), S. Elcoro 625 (MO), D. Cárdenas 6966 (MO) / *Miconia dodecandra* Cogn. - J. Cuatrecasas 13369 (COL), R. Fonnegra 4524 (COL), V. Rico 599 (COL) / *Pachyloma huberoides* (Naudin) Triana - D. Cárdenas 14726 (COL), G. T. Prance 16173 (COL), G. Davidse 17109 (MO), H. García-Barriga 20862 (COL), G. Davidse 27795 (MO) / *Phainantha shuariorum* C. Ulloa & D.A. Neill - J. Homeier 1503 (MO), T. B. Croat 96563 (MO), D. Neill 15853 (QCNE) / *Wurdastom cuatrecasasii* (Wurdack) B. Walln. - J. Cuatrecasas 15565 (US) / *Wurdastom ecuadorensis* (Wurdack) B. Walln. - J. Bittner 2753 (FMB), G. Herrera 9664 (FMB).

## Apéndice 2. Caracteres utilizados para el análisis cladístico de *Centronia* D. Don.

Notas: <sup>1</sup> basado en Schulman & Hyvönen (2003); <sup>2</sup> Michelangeli (2000);

<sup>3</sup> Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso (2010); <sup>4</sup> Becquer (2008).

**0. Tallo - Estado del hábito:** (0) Tallo erecto; (1) Tallo flexuoso y trepador / **1. Entrenudos - Raíces adventicias**<sup>1</sup>: (0) Ausente; (1) Presente / **2. Hoja - simetría entre hojas**<sup>1</sup>: (0) Anisófilas (una de las hojas del mismo nudo al menos 2 o más veces mayor en longitud a la otra o una de las hojas completamente atrofiada); (1) Isófilas (ambas hojas del mismo nudo de igual tamaño o levemente disímiles pero en menor proporción de longitud 2:1) / **3. Hoja - forma de la base de la lámina.** Este carácter y el siguiente son continuos y mostraron ser polimórficos en algunas especies, pero en otras estables: (0) Cordada; (1) Trunca-da o redondeada; (2) Aguda a obtusa; (3) Peltada / **4. Hoja - forma ápice de la lámina:** (0) Aguda a acuminada; (1) Redondea-do; (2) Obtuso; (3) Emarginado-asimétrico / **5. Hoja - forma base de la lámina:** (0) Revoluta hacia el envés; (1) No revoluta / **6. Hoja - margen lámina:** (0) Entera (lisa o con un reborde grueso); (1) Denticulada (sobresalen las venas terciarias formado protuberancias minúsculas de ápices redondeados, entre estas denticulaciones la margen es lisa); (2) Dentada o serrada (la margen es la que se deforma y origina dientes triangulares grandes o pequeños) / **7. Hoja - superficie adaxial lámina:** (0) Lisa (sin ninguna clase de protuberancias, retículo o tricomas); (1) No lisa (rugosa o con tricomas tuberculados) / **8. Hoja - Haz no lisa, tipos:** (0) Con tricomas de base tuberculada (como en *Tibouchina lepidota*); (1) Rugosa (con celdas reticuladas y separadas por fisuras dando una apariencia de piel vieja) / **9. Hoja - desarrollo del pecíolo:** (0) Poco o no desarrollado (hojas sésiles o con pecíolo menor de 0,5 cm); (1) Desarrollado (pecíolo = 1 cm longitud) / **10. Hoja - forma del pecíolo en corte seccional en la mitad de su longitud:** (0) Terete; (1) Acanalado en la superficie abaxial y redondeado en la adaxial / **11. Hoja - forma ápice (Parte distal) del pecíolo:** (0) Con escutelo; (1) Liso, sin ninguna tipo de ensanchamiento / **12. Hoja - con domacios tipo penacho en las axilas de las venas principales por el envés:** (0) No presentes; (1) Presentes / **13. Nerviación lámina – Tipo** (Fig. 1): (0) Basal (también en hojas peltadas como en *Meriania peltata*); (1) Levemente plinervia (primer par de venas suprabasales a = 0,8 cm de la base foliar); (2) Fuertemente plinervia (primer par de venas suprabasales a > 1 cm de la base foliar) / **14. Nerviación lámina - Número de pares de venas:** se cuentan sólo las venas secundarias que recorren de forma notoria la longitud de la hoja hasta el ápice; algunas venas cerca de la margen se disipan antes de llegar al ápice, éstas no se consideran en el número de venas: (0) 1 par; (1) 2 pares; (2) 3 pares; (3) 4 pares / **15. Nerviación lámina - Relación de la distancias A (entre la vena media y la primera vena secundaria) y B (la distancia entre la primera vena secundaria y la margen) en la parte media de la lámina**<sup>1</sup> (Fig. 1d): (0) < 2,5; (1) = 2,5 o < 7; (2) = o > 7 / **16. Nerviación lámina - Densidad-distancia entre las venas inter-secundarias aledañas a la vena media en la parte media de la lámina**<sup>1</sup>: (0) Densa, 1-2 mm separadas; (1) Semidensa, >2-5 mm separadas; (2) Laxa, >5 mm separadas / **17. Nervia-ción lámina - Forma de las venas intersecundarias aledañas a la vena media:** (0) No anastomosadas ni interrumpidas; (1) Reticulada o anastomosada a partir de la mitad de su recorrido (semejante a *Meriania longifolia*) / **18. Nerviación lámina - Reticulación terciaria del envés:** (0) Conspicua y sobresalientes; (1) Inconspicua o no sobresaliente (superficie entre las venas principales es completamente lisa o no se nota el retículo formado por las venas de 3° y 4° orden). **19. Sinflorescencia - Tipo** (considerando el modelo tipológico seguido por Mora-Osejo, 1992): (0) Holocaulo (sinflorescencia con forófilos semejantes a hojas fotosintéticas, es decir son autótrofas; se asimila a la inflorescencia axilar); (1) Antoblasto (sinflorescencia especializada, heterótrofa, es decir sin brácteas fotosintéticas semejantes a hojas; se asimila a la inflorescencia terminal plenamente diferenciable de la parte vegetativa del vástago) / **20. Sinflorescencia - Patrón de ramificación y desarrollo.** No aplica a holocaulos o sin inflorescencias unifloras: (0) Con truncamiento del antotagma o parte final de la sinflorescencia (de apariencia dicasial abierta en donde los ejes laterales son más largos que el eje central o de igual longitud); (1) Con el eje central desarrollado y sin truncamiento y con paracladios laterales de 1 a 3 ordenes de ramificación (de apariencia paniculada) / **21. Sin inflorescencia - Tendencia a la reducción de ejes** (paracladios con ejes atrofiados formando puntos de vericilos a lo largo de un eje como en *Meriania phlomoides*). No aplica a sinflorescencias de ejes unifloros y holocaulos: (0) Con paracladios reducidos, flores aglomeradas en verticilos; (1) Con paracladio con ejes definidos / **22. Sinflorescencia - Tipo de ramificación de los ápices** (de acuerdo a la terminología propuesta por Rua, 1999): (0) Dicasial (con una flor central y dos brácteas opuestas con yemas activas que desarrollan ejes laterales o flores; también aplica a tres flores sésiles en el ápice de un eje); (1) Corimbiforme (múltiples brotes floríferos con entrenudos muy cortos); (2) Cefaloide (múltiples flores sésiles insertas en un mismo punto); (3) Sciaciode (múltiples flores pediceladas insertas en el mismo punto); (4) Uniflora (es un dicasio con las yemas laterales atrofiadas generando sólo una flor como en *Meriania longifolia*; generalmente se presenta una sola flor en un pedúnculo largo); (5) Helicoide / **23. Sinflorescencia - Nivel de ramificación de los paracladios** (nivel de ramificación de las ramas basales de la inflorescencia): (0) 1° orden;

(1) 2° orden; (2) 3° o más órdenes / **24. Sinflorescencia - Orientación de la seudoflorescencia o paracladios:** (0) Erecta; (1) Péndula / **25. Sinflorescencia - Forma del eje central basal de la seudoflorescencia en corte seccional:** (0) Terete u oblongo; (1) Cuadrangular, rectangular acanalado; (2) Aplanado-elíptico / **26. Brácteas - Inflorescencias juveniles con grandes brácteas protectoras** (similar a como ocurre en *Meriania phlomoides* y *Meriania tomentosa*): (0) Presente; (1) Ausente / **27. Brácteas - Presencia en las ramificaciones o base de los paracladios:** (0) Presencia; (1) Ausencia / **28. Brácteas - Bracteolas conspicuas en la base de las flores o botones florales:** (0) No presentes; (1) Presentes. **29. Flor – Pedicelo:** (0) Flores pediceladas; (1) Flores sésiles o muy corto pediceladas (pedicelo < 0,2cm) / **30. Flor - Tamaño pétalo.** Este es un subrogado del tamaño de la flor y se da en términos de longitud. Es un caracter continuo y los intervalos se establecieron con base en la observación de los tamaños de flores que exponen los géneros de Melastomataceae de Colombia (Mendoza & Ramírez, 2006). Con base en este trabajo se pudo establecer que géneros como *Adelobotrys* y *Graffenrieda* tienen flores medianas a pequeñas, *Meriania* y *Centronia* grandes a gigantes, y *Axinaea* flores medianas: (0) Pequeño = 0.5 cm; (1) Mediano > 0.5 hasta 2 cm; (2) Grande > 2 hasta 3,5 cm; (3) Gigante > 3,5 cm / **31. Hipanto - Textura-grosor:** (0) Carnoso - cartáceo grueso; (1) Membranoso - papiráceo delgado (= 0.8 mm grosor) / **32. Hipanto - Forma superficie externa:** (0) Terete y liso; (1) Acostillado en igual o doble número que lóbulos calicinos / **33. Hipanto - Forma en corte horizontal:** (0) Circular; (1) Triangular; (2) Cuadrangular / **34. Hipanto - Nivel-posición del torus en flores en antesis.** Este caracter no aplica a taxones con ovarios completamente ínferos; en especies con dientes en el ápice del ovario se considera donde nace el estilo: (0) Torus a la altura del ápice del ovario o por debajo de éste (la longitud del tálamo del hipanto es más corto o igual que la longitud del ovario); (1) Torus por encima del ápice del ovario (la longitud del tálamo del hipanto más la longitud del ovario es 1-2 a 2 veces más largo que la longitud del ovario solo); (2) Torus por debajo del ápice del ovario conspicuamente / **35. Hipanto - Superficie interna del tálamo:** (0) Liso o con cicatrices lineares longitudinales (paredes lisas o con huellas pero sin protuberancias); (1) Con tabiques o ribetes longitudinales dando la apariencia de celdas (como en *Wurdastom cuatrecasatii*); (2) Con costillas o ribetes pero poco sobresalientes (como en *Graffenrieda rupestris*) / **36. Cáliz - Forma del ápice<sup>3</sup>.** Este caracter corresponde a una nueva interpretación de lo que generalmente se considera en Melastomataceae como la presencia o el desarrollo de lóbulos calicinos. Se combina el desarrollo de estructuras foliosas en el ápice del cáliz y el grado de desarrollo de líneas de división que origina los lóbulos calicinos. De acuerdo con esto, pueden encontrarse estados sin desarrollo del ápice del cáliz y con desarrollo del ápice del cáliz pero con líneas de división o no (para mayor detalle ver caracter 0 en Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso (2010): (0) Lobulado (con lóbulos evidentes ya sean triangulares, redondeados, subulados o lineares); (1) Truncado (ápice abierto pero con tálamo de los lóbulos poco desarrollado y sin zonas o líneas de separación de los lóbulos como en *Meriania pastazana*; aquí también se consideran aquellos tálamos calicinos con lóbulos anchamente triangulares poco desarrollados y cálices ondulados); (2) Subcaliptrado (el cáliz es levemente cerrado pero en el ápice sobresalen los pétalos y durante la antesis hay rompimiento parcial del cáliz); (3) Caliptrado (cuando el ápice del cáliz es completamente cerrado formando una capucha; hay desarrollo del ápice del cáliz pero no hay ejes de división que generen lóbulos) / **37. Cáliz - Forma de apertura de la caliptra<sup>3</sup>** (aplica sólo a cálices caliptrados o subcaliptrados; para mayor detalle ver Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso (2010): (0) Apertura por fisuras regulares que genera lóbulos en igual número que pétalos; (1) Apertura por fisuras irregulares; (2) Dehiscencia circuncísil, o cuando la caliptra cae de forma íntegra / **38. Cáliz - Forma de la caliptra<sup>3</sup>:** (0) Caliptras apicalmente redondeadas, (1) Caliptras apicalmente obtusas; (2) Caliptras apicalmente agudas o apiculadas / **39. Cáliz - desarrollo de dientes calicinos dorsales<sup>3</sup>.** Regularmente en Melastomataceae se considera que el ápice del cáliz puede desarrollar lóbulos internos y externos (Wurdack, 1973, 1980). En este trabajo se consideran sólo una serie de lóbulos, que se asimila a lo que usualmente se refiere como lóbulos internos. En el dorso central de estos lóbulos se pueden desarrollar en diferentes grados dientes que se asimilan a lo que se conocen como los lóbulos calicinos externos (para mayor detalle ver Mendoza-Cifuentes & Fernández-Alonso, 2010): (0) Dientes dorsales conspicuamente desarrollados; (1) Dientes dorsales poco desarrollados y a manera de protuberancias, como en *Meriania maxima*; (2) Sin dientes dorsales / **40. Cáliz - Textura de la caliptra:** (0) Caliptras papiráceas o cartáceas; (1) Caliptras membranáceas, transparentes y muy delgadas / **41. Torus – Forma:** (0) Ondulado con callosidades en la base de los estambres; (1) Liso y continuo / **42. Corola – tipo:** (0) Pseudotubular de acuerdo con Varassin *et al.* (2008) (los pétalos se disponen de tal forma que la corola despliega una forma cerrada acocada similar a lo que podemos observar en especies de *Axinaea* y en *Meriania tomentosa*); (1) Patente (pétalos expandidos completamente durante la antesis de tal forma que las flores parecen un disco) / **43. Corola - Número de pétalos:** (0) 4 pétalos; (1) 5; (2) 6; (3) 7; (4) 8; (5) 9; (6) 10 / **44. Pétalo – Color:** (0) Claros (color crema, verde claro, blanco o rosado. Los colores albos pueden presentar leves variaciones en flores de un mismo individuo; por ejemplo *Meriania phlomoides* puede tener flores de pétalos blancos o rosados al igual que en *Wurdastom cuatrecasatii* en donde puede darse pétalos

color crema y otros color rosado; en *Miconia dodecandra* se encuentran individuos que pueden exhibir flores de pétalos blancos o rosados. Por esto se incorporan en un solo estado las variaciones de colores poco llamativos); (1) Rojos, magenta o violeta (regularmente una misma flor puede variar de rojo a violeta dependiendo de su madurez por lo que aquí se consideran como el mismo estado); (2) Naranja / **45. Pétalo – Forma:** (0) Obovado, proporción largo ancho entre 1 y 1,3; (1) Obovado, más largo que ancho, proporción largo ancho > 1,5; (2) Oblongo / **46. Pétalo - Forma ápice:** (0) Emarginados-asimétrico (levemente cóncavo en el centro); (1) Agudo o acuminado; (2) Redondeado o truncado / **47. Pétalo - Cambio en la coloración.** Este cambio de coloración, posiblemente atribuible a la polinización, sólo se ha visto que ocurre en flores de pétalos color rojo púrpura o azul; por esto este carácter no aplica a taxones con pétalos albos o naranja: (0) Cambio de color rojo-morado a azul oscuro con la maduración de la flor; (1) Sin cambio drástico de rojo a azul oscuro / **48. Pétalo - Pubescencia** (presencia de tricomas): (0) Pétalos con pubescencia parca o densa; (1) Pétalos glabros / **49. Pétalo - Tipo de tricomas:** (0) Glandulares; (1) Pinoides. **50. Androceo - Proporción del número de estambres con relación al número de pétalos<sup>3</sup>:** (0) Doble número de estambres que de pétalos (flores diplostemonas); (1) Igual número de estambres que de pétalos (flores haplostemonas) / **51. Androceo - Dimorfismo estaminal<sup>3</sup>.** Corresponde a la simetría en forma-tamaño o variaciones en función entre verticilos de los estambres opositipétalos y los opositisépalos en flores diplostémonas: (0) Verticilos isomórficos (ambas series similares en tamaño y forma). En varios géneros de Merianieae es frecuente que se encuentren estambres conformando una estructura zigomorfa y en donde la totalidad de los estambres son disímiles en longitud del filamento. Esta asimetría del androceo se desarrolla en etapas adelantadas del botón floral y se acentúa en el momento de la antesis; no obstante, se considera que los dos verticilos son similares en tamaño y forma; (1) Verticilos levemente dimórficos. Dos formas levemente desiguales en tamaño o forma del filamento, antera o conectivo, pero funcionalmente similares; (2) Verticilos fuertemente dimórficos. Una de las series muy diferentes en tamaño o forma a la otra, o con diferencias en función. Conspicuamente dos tipos de estambres que se diferencian desde la fase de botón; algunas veces una de ellas es atrofiada. Aquí también se incluye cuando hay diferencias en la orientación del poro de la antera, pues esto se considera como una diferencia en función / **52. Androceo - Tipo de dimorfismo fuerte o funcional<sup>3</sup>:** (0) Los dos verticilos funcionales en producción de polen; (1) Uno de los verticilos sin función polínica o atrofiado por completo en función / **53. Antera - Orientación del poro en estambres opositipétalos<sup>3</sup>:** (0) Ventral; (1) Dorsal; (2) Apical (o cuando difícilmente se puede definir su orientación) / **54. Antera - Orientación del poro en estambres opositisépalos<sup>3</sup>:** (0) Ventral; (1) Dorsal; (2) Apical (o cuando difícilmente se puede definir su orientación) / **55. Estambre - Disposición filamento-antera** (Fig. 2). Este carácter hace referencia a la forma del estambre y disposición de la antera con respecto al filamento. En *Meriania*, *Centronia*, *Axinaea*, *Graffenrieda* y *Adelobotrys*, se observó que el filamento estaminal en fase de botón siempre es recto y no presenta ninguna clase de flexionamiento en el ápice como si ocurre con muchas especies de *Miconia* y *Clidemia* (ver Mendoza & Fernández, 2010). En Mendoza & Fernández (2010) se plantea que en los principales géneros de Merianieae en el ápice del filamento ocurrió una fusión de tejidos del filamento con tejidos de la base-dorsal y base ventral del conectivo que origina que la antera no se pueda descontorsionar y los estambres no sean geniculados: (0) Estambres no geniculados; filamento recto en la fase de botón, antera en la antesis orientada en ángulo agudo a recto con respecto al filamento; (1) Estambres geniculados; filamento inflexo hacia el ápice en botón, se endereza en la antesis; antera dispuesta en el mismo eje del filamento o levemente diferente pero o no en ángulo recto o agudo / **56. Apéndices conectivo de la antera - Ubicación en estambres opositipétalos<sup>3</sup>:** (0) Apéndices dorsales; (1) Apéndices ventrales; (2) Apéndices basales sin orientación definida / **57. Conectivo dorsal de la antera - Orientación del haz vascular<sup>3</sup>** (para estambres geniculados o no, observado sólo en estambres opositipétalos; para mayor detalle de este carácter y los cinco siguientes ver en Mendoza & Fernández (2010), caracteres 12<sup>a</sup> a 12<sup>f</sup>) (Fig. 3): (0) Hacia el ápice de la antera; (1) Hacia la base de la antera / **58. Conectivo dorsal de la antera - Forma del haz vascular en estambres opositipétalos<sup>3</sup>** (Fig. 3): (0) Conspicuamente bifurcado; (1) Sin bifurcación conspicua. En *Axinaea* es posible encontrar un haz muy ramificado dendríticamente (Wilson 1950), pero lo brazos de ramificación no son conspicuos; este carácter se considera en este estado / **59. Conectivo dorsal de la antera - Forma del apéndice dorsal propiamente en estambres con haces vasculares no divididos orientados hacia la base de la antera<sup>3</sup>** (Fig. 4): (0) Globoso; (1) Subulado; (2) A manera de almohadilla corta; (3) Filiforme; (4) Lingüiforme / **97. Conectivo dorsal de la antera - Forma del apéndice dorsal propiamente en estambres con el haz dividido y orientado hacia la base de la antera<sup>3</sup>** (Fig. 4): (0) Romo a dentiforme; (1) Subulado; (2) Bífido; (3) Cilíndrico / **98. Conectivo dorsal de la antera - Forma del codo del ápice del filamento en estambres con el haz dividido y orientado hacia la base de la antera (estambres no geniculados)<sup>3</sup>** (Fig. 4): (0) Conspicuamente subulado; (1) Truncado e irregularmente rugoso o dentiforme / **99. Conectivo dorsal de la antera - Forma del apéndice en estambres con el haz vascular orientado hacia el ápice de la antera<sup>3</sup>** (Fig. 4): (0) Cilíndrico a subulado; (1) Cilíndrico ensanchado en el ápice, algunas veces levemente bífido; (2) Conspicuamente bífidos en el ápice, ramas subuladas / **60. Androceo - Tamaño de los estambres<sup>3</sup>** (aplica

a taxones con androceos dimórficos): (0) Estambres opositipétalos más grandes; (1) Estambres opositisépalos más grandes; (2) Estambres entre verticilos sin diferencias notables en tamaño / **61. Color apéndice conectival:** (0) Blanco-crema; (1) Amarillo; (2) Rojizo; (3) Azul o violeta claro / **62. Lugar de conexión de las tecas y el conectivo**<sup>3</sup>: (0) Conectivo uniendo las tecas cerca o sobre su parte dorsal. El conectivo es conspicuo sobre el dorso de la antera y no es visible por el vientre de las tecas; (1) Cuando el conectivo se une a las tecas cerca de la parte abaxial y medial de éstas. Esto ocasiona que las anteras tengan apariencia resupinada como en *Meriania versicolor* y *Meriania tomentosa* / **63. Curvatura de la antera en anthesis en estambres opositipétalos:** (0) Recta; (1) Muy curva hacia el dorso; (2) Levemente curva, sigmoidea u ondulada; (3) Muy curva hacia la parte ventral / **64. Forma de la antera**<sup>3,4</sup>: (0) Subulada (se adelgaza hacia el ápice); (1) Oblonga u oblongo-ovovada / **65. Androceo - Disposición en flores abiertas:** (0) Alrededor del estilo de forma más o menos circular; (1) A un lado de la flor de forma zigomorfa / **66. Anteras - Color tecas:** (0) Blanco, crema o verde claro; (1) Amarillo; (2) Rojo, violeta, morado. **67. Estilo - Forma de ápice en la anthesis:** (0) Recto; (1) Curvo / **68. Estilo - Forma:** (0) Cónico; (1) Cilíndrico; (2) Abultado hacia el ápice / **69. Estilo - Grosor:** (0) Filiforme; (1) Robusto / **70. Parte distal del estilo y el estigma:** (0) Exserto en botones florales; (1) No exserto en botones / **71. Estigma - Superficie:** (0) Papilosa o farinácea; (1) Lisa / **72. Estigma - Forma**<sup>4</sup>: (0) Puntiforme (indiferenciado del ápice del estilo); (1) Glandiforme (como un glande, es decir, es notorio pero no es mucho más grueso que el diámetro del ápice del estilo); (2) Disciforme / **73. Longitud relativa del estilo.** Los rangos de los estados se basaron en observaciones de proporciones en los géneros colombianos de la familia (Mendoza & Ramírez, 2006): (0) Igual longitud que la del ovario o ligeramente más largo; (1) 1.5 – 2.5 veces más largo que la longitud del ovario; (2) 3 o más veces la longitud del ovario / **74. Ovario - Disposición.** Este caracter al parecer es aditivo si se compara entre géneros, pero dentro de cada género se encuentra plenamente diferenciado en alguno de los tres siguientes estados: (0) Parcialmente fusionado al hipanto; (1) Completamente ínfero; (2) Completamente súpero / **75. Forma de unión del ovario al hipanto** (no aplica a ovarios completamente súperos o ínferos) (Fig. 5): (0) En una circunferencia continua; (1) En aristas intercaladas de espacios sin unión (como en *Meriania tomentosa*) / **76. Número de lóculos:** (0) 3; (1) 4; (2) 5; (3) 6; (4) 7; (5) 8; (6) 9; (7) 10 / **77. Ovario - Forma del ápice** (no aplica a ovarios ínferos): (0) Liso (ya sea redondeado, truncado o cóncavo); (1) Con apéndices (la base del estilo inmersa en el ápice del ovario) / **78. Ovario - Forma de los apéndices del ápice:** (0) Divididos (como en *Graffenrieda*); (1) A manera de un anillo alrededor de la base del estilo / **79. Ovario - Forma apéndices divididos del ápice** (Fig. 5): (0) Cada lóculo con una proyección apical que remata en dos dientes triangulares, dentiformes o subulados; (1) Cada lóculo con una leve proyección apical redondeada o truncada; (2) Cada lóculo con una proyección apical larga y muy conspicua de ápice bifido / **80. Ovario - Forma de los dientes de los apéndices triangulares:** (0) Con dientes cortos tan largos como anchos; (1) Con dientes subulados; (2) Con dientes fimbriados / **81. Ovario - Forma en corte transversal** (no aplica a ovarios completamente ínferos): (0) Oblongo-circular (tan largo como ancho); (1) Ovoide a cónico; (2) Cilíndrico-oblongo (más largo que ancho) / **82. Placenta - Forma frontal.** Las placentas de los ovarios en Meranieae presentan variaciones notorias en forma y la disposición de los rudimentos seminales que pueden ser útiles para la circunscripción de los géneros. Los caracteres 82 a 84 exploran las variaciones observadas en los taxones muestreados: (0) Ovoide; (1) Linear; (2) Obovada, obovada delgada; (3) Oblonga; (5) Elíptica (ambos extremos igual de anchos y agudos) / **83. Placenta - Forma en corte seccional** (en caso de ser una prolongación; se determina en flores abiertas) (Fig. 6): (0) En forma de Y o T; (1) Triangular (en *Huberia* es triangular y muy delgada de dorso irregular); (2) Obovada; (3) Linear / **84. Placenta - Distribución de los rudimentos seminales** (no aplica en placentas lineares) (Fig. 6): (0) Sobre todas las superficies; (1) Sólo en el dorso. **85. Tipo de fruto:** (0) Capsular; (1) Tipo baya / **86. Relación fruto – hipanto** (no aplica a frutos de ovario ínfero): (0) Ápice del fruto sobresaliendo del hipanto-cáliz; (1) Ápice del fruto inmerso completamente en el tálamo del hipanto-cáliz; (2) Ápice del fruto al mismo nivel o levemente sobresaliendo del ápice del hipanto-cáliz (similar a *G. conostegioides*) / **87. Forma del hipanto en el fruto** (no aplica en taxones con ovarios completamente ínferos): (0) No constricto en el torus, en forma de copa; (1) Ligeramente constricto en el torus, cilíndrico a urceolado; (2) Fuertemente constricto en el torus, elipsoide a ovoide; (3) Fuertemente constricto en el torus, globoso / **88. Semilla - Forma:** (0) Con embrión recto – semillas filiformes, aladas o cuneiformes; (1) Con embrión curvado – semillas cocleadas o subcocleadas / **89. Semilla - Forma de las semillas con embrión recto** (no aplica a semillas con embrión curvado): (0) Cuneiformes (con la base aguda y engrosadas hacia el ápice, embrión lateral); (1) Elípticas aladas (con la base y el ápice agudos, de márgenes aladas, embrión central); (2) Filamentosas, ahusadas en ambos ápices / **90. Semilla - Forma del ápice en semillas rectas cuneiformes y filiformes** (no aplica a semillas cocleadas o aladas) (Fig. 7): (0) Ápice corto y recto; (1) Ápice alargado y recto; (2) Ápice alargado y agudo; (3) Ápice prolongado en un pico frontal tan o más largo que el embrión (cuerpo central) / **91. Semilla - Tamaño de las semillas rectas** (no aplica a semillas cocleadas o subcocleadas). Los rangos se establecieron considerando los tamaños de la totalidad de los taxones del muestreo y tratando de establecer rangos que generaran el menor número de especies con

medidas intermedias. Estos rangos coinciden aproximadamente con la forma de la cabeza de la semilla, siendo las de cabeza corta las diminutas y pequeñas, las de cabeza larga las medianas y las semillas filamentosas y algunas aladas las grandes: (0) = 0,6 mm (diminuta); (1) 0,75-1,3 mm (pequeña); (2) 1,5-2,5 mm (mediana); (3) > 2,7 mm (Grande) / **92. Semilla - células periclinales de la testa**. Se observa hacia el ápice de la semilla: (0) Tuberculada; (1) Lisa / **93. Semilla - Tipo de escultura de la testa** (Fig. 7): (0) Ausente; (1) A manera de líneas a lo largo de la semilla; (2) Compleja- tuberculada / **94. Semilla - Pared anticlinal de la testa**<sup>2</sup>. Se observa hacia el ápice de las semillas: (0) Derecha; (1) Curvada-sigmoidea; (2) Curveada a manera de rompecabezas / **95. Semilla - Notoriedad de las líneas de división de las células de la testa** (Fig. 7). Se observa en el ápice de la semilla: (0) Líneas no conspicuas (posiblemente se deba a una cutícula cerosa); (1) Líneas notorias / **96. Semilla - Color de la testa**<sup>2</sup>: (0) Área del rafe más oscura que la testa; (1) Área del rafe del mismo color que la testa; (2) Área del rafe más clara que la testa / **100. Hipanto - Cubierta ferrugínea** (conformada por tricomas aracnoides o cortos de paredes rizadas): (0) Ausente; (1) Presente / **101. Hipanto - Tipo de tricomas** (sólo aplica a taxones con cubiertas ferrugíneas en el hipanto) (Fig. 8): (0) Triangular deltoides, (1) Esponjosos irregulares; (2) Aracnoides / **102. Hipanto - Tipo de tricomas triangulares** (sólo aplica a taxones con cubierta ferrugínea de tricomas triangulares) (Fig. 8): (0) Deltoides - simétricos; (1) Asimétricos - irregulares.

### Apéndice 3. Caracteres excluidos del análisis cladístico de *Centronia* D. Don.

**1. Tallo - Desarrollo de tejidos leñosos** (sin variación en las especies consideradas) / **2. Condición del hábito de crecimiento** (se entrecruza con el carácter 0) / **3. Forma del entrenudo en corte seccional** (eliminado por subjetividad) / **4. Cubiertas del entrenudo** (carácter complejo y difícil de establecer las homologías) / **4. Disposición de las hojas** (no variable en los taxones evaluados excepto por *Phainantha*) / **5. Posición de la lámina en hojas maduras** (carácter fue retomado de Schulman & Hyvönen (2003) pero de difícil establecimiento de las homologías de los estados propuestos por estos autores) / **6. Cubiertas del envés foliar** (igual problema que en el carácter 4) / **7. Forma base del pecíolo** (ensanchado o no ensanchado) (sin variación en el grupo muestreado) / **8. Cubiertas ejes de la inflorescencia** (igual problema que 4) / **9. Cubiertas del hipanto** (igual problema que en el carácter 4) / **10. Número de poros de la antera** (igual problema que en el carácter 1) / **11. Longitud del filamento con respecto a la antera en estambres ubicados frente a los pétalos** (es muy variable dentro de individuos y dentro de especies) / **12. Forma de apertura de los carpelos del fruto** (sin variación, solo se presentaron aperturas loculicidas) / **13. Indumento del filamento** (sólo presentó variación en *Meriania drakei* con filamentos pubescentes) / **14. Forma del filamento en corte seccional en su parte media** (igual problema que en el carácter 1) / **15. Desarrollo apéndice conectival dorsal** (no desarrollado, levemente desarrollado, fuertemente desarrollado - replanteado pues los estados no corresponden a verdaderas homologías) / **16. Forma estilo en corte seccional cerca de la base** (difícil de definir en flores rehidratadas) / **17. Forma de la placentación** (sobre una prolongación, axilar-sésil - sin variación pues todos los taxones evaluados tienen placentas prolongadas y conspicuas) / **18. Grosor de la pared del hipanto en fruto** (puede ser lo mismo que el carácter grosor del hipanto en flores) / **19. Persistencia del hipanto** (retomado de Schulman & Hyvönen (2003); carácter subjetivo y difícil de evaluar) / **20. Semilla - Tamaño del rafe** (difícil de evaluar en semillas con igual color de la testa y el rafe; también se observó amplia variación dentro de las especie evaluadas).







# EFEECTO DE LAS SUPERFICIES E INTERFACES EN LAS PROPIEDADES DE LA MATERIA

María Elena Gómez\*, Lorena Marín\*+, Sandra Díez\*, Julio César Caicedo\*,  
Marlon Villareal\*, César Escobar\*

*Dios creó los sólidos, pero las superficies e interfaces  
fueron obra del demonio.  
W. Pauli*

## Resumen

**Gómez, M. E., L. Marín, S. Díez, J. C. Caicedo, M. Villareal, C. Escobar:** Efecto de las superficies e interfaces en las propiedades de la materia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (137): 451-462, 2011. ISSN 0370-3908.

Discutimos el efecto sobre las diferentes propiedades físicas que tienen las interfaces en materiales crecidos artificialmente en forma de heteroestructuras cuando sus dimensiones están en la escala nanométrica. Específicamente presentamos resultados de propiedades magnéticas en bicapas ferromagnética / antiferromagnética de la manganita de lantano dopada con calcio; las propiedades mecánicas y de corrosión en superredes de nitruros de metales de transición TiN/ZrN y HfN/VN.

**Palabras clave:** Interfaces sólido-sólido, rugosidad interfacial, propiedades magnéticas de interfaces en multicapas, propiedades mecánicas de películas delgadas, recubrimientos duros y anticorrosivos.

## Abstract

We discuss the effect of interfaces on different physical properties in artificially grown materials when their dimensions are in the nanometer scale. Specifically we present results of magnetic properties in ferromagnetic / antiferromagnetic bilayers based on calcium doped lanthanum manganite perovskite oxide; mechanical and corrosive properties in TiN/ZrN and HfN/VN superlattices.

**Key words:** solid-solid interfaces, interfacial roughness, magnetic properties of interfaces in multilayer thin film mechanical properties, hard coatings and corrosion.

\* Grupo de Películas Delgadas. Universidad del Valle, Ciudad Universitaria Meléndez, Calle 13 No. 100-00. Cali, Colombia.

+ Instituto de Nanociencia de Aragon, INA, Universidad de Zaragoza. Zaragoza, España.

## Introducción

Los desarrollos en tecnologías modernas involucran procesamiento de materiales con propiedades novedosas en los cuales las superficies e interfaces juegan un papel relevante<sup>1</sup>. Las interfaces dominan en muchos productos del mundo moderno a todo nivel: electrónica, informática y comunicaciones, medicina, agricultura, energía, transporte, etc.<sup>2</sup> Los sistemas con interfaces son importantes en los recubrimientos para grabación de información digital óptica ó magnética, en el mejoramiento de propiedades mecánicas y tribológicas, en propiedades de transporte térmico, en propiedades químicas, como corrosión; entre muchas otras aplicaciones<sup>3,4</sup>. Debido a que la relación superficie a volumen se incrementa en varios órdenes de magnitud en la medida en que el tamaño de la muestra disminuye, así sea en una sola de sus dimensiones, el desempeño o funcionalidad del material está determinado más por las propiedades de su superficie que por las del volumen: efecto de tamaño<sup>5</sup>. Esto es, las propiedades de los materiales son, en gran medida, expresadas en términos de escalas de longitud y sus interacciones, esto es, están determinadas en general por la competencia ó el acoplamiento entre dos dependencias de tamaño. Así pues, tenemos que tratar con la interacción de dos escalas de longitud: uno es la dimensión característica de los fenómenos físicos involucrados, llamada la longitud característica. El otro es una dimensión microestructural, que se denota como el parámetro de tamaño. El rango en el que estas dos cantidades se superponen es de particular interés: las leyes válidas para el material en bloque (tamaño convencional) aquí se rompen con frecuencia e incluso pueden ser no válidas. En el contexto de la física del estado sólido definimos una interfaz como la superficie límite entre dos materiales; llamamos superficie a la región cuyo espesor está en el rango entre 2 a 10 planos atómicos. Adicionalmente, las interacciones atómicas y moleculares que predominan en la interfaz entre dos materiales con inestabilidades estructurales, ó con propiedades electrónicas y magnéticas diferentes entran en contacto atómico, lo cual ha dado lugar a una nueva física sin precedentes que emerge en las interfaces<sup>6,7</sup>.

Una manera de disminuir el tamaño o volumen de un material es creciendo un material en forma de película delgada. El material crece átomo a átomo sobre un sustrato con espesores en el rango de 100 nm, pero puede llegar a ser tan delgada como el espesor de algunos planos atómicos (2 nm). Cuando un material se adelgaza (mecánicamente, electrolíticamente, por bombardeo con iones, etc.) no necesita de un sustrato, entonces hablamos de una lámina delgada. Las técnicas de crecimiento de películas son

muy variadas. El crecer un material átomo a átomo sobre un sustrato hace que las propiedades del material sean diferentes a las del material en bloque<sup>8</sup>. Tal vez la primera contribución a cambios en las propiedades se deba a la tensión interfacial, esto es, aquella fuerza mecánica en la interfaz sustrato/película ó película/película debida a interacciones intermoleculares; cerca de la superficie las moléculas se atraen con mayor intensidad. En general los materiales crecidos en forma de película delgada, comparados con el material en bloque, son menos densos, crecen bajo tensión interna, con defectos cristalinos diferentes, fuertemente influenciados por los efectos de superficie y de interfaz debido a que los átomos en la superficie no tienen átomos para enlazarse ó se enlazan a otros con propiedades electrónicas diferentes. Así, el enlace atómico cambia y con ello sus propiedades mecánicas; los portadores de carga son dispersados por la superficie o la interfaz entre película y sustrato, ó entre dos materiales diferentes, cambiando sus propiedades eléctricas; la interacción entre momentos magnéticos se ve afectada cambiando las propiedades magnéticas; los átomos del volumen pueden segregarse hacia la superficie para minimizar la energía libre cambiando sus propiedades químicas; etc.

Uno de los efectos fuertemente relacionado con la microestructura de la interfaz es el conocido como efecto de magnetorresistencia gigante<sup>9</sup>, GMR (de sus siglas en inglés Giant Magneto Resistance), hoy tecnológicamente usado en la lectura de información magnética. GMR aparece en superredes magnéticas tipo ferromagneto / metal no ferro magnético, como Fe/Cr y Co/Cu. El espesor de la capa de Cr ó Cu es del orden de 1,2 nanómetros y el de la capa ferro entre 2 y 10 nm. La magnitud de la magnetorresistencia (MR) depende de la interacción magnética entre las capas ferro y de la dispersión dependiente de espín; ambas magnitudes dependen fuertemente de la microestructura de la superred vía rugosidad interfacial, interdifusión en la interfaz, densidad de puntos de anclaje, defectos puntuales en la interfaz y en el volumen<sup>10</sup>. Nanomagnetismo es otro campo en donde los fenómenos de superficie e interfaz juegan un papel crucial. Un ejemplo, son las propiedades de magnetotransporte en heteroestructuras, las cuales están íntimamente relacionadas con la naturaleza interfacial de las capas y ha impulsado por ejemplo el desarrollo de una nueva disciplina como la magnetoelectrónica<sup>11</sup>.

Por otro lado, en el sector industrial de herramientas de corte, aeronáutica, metalmecánica industria automotriz, entre otros, en donde encontramos partes móviles sujetas a ambientes agresivos y/o a altas temperaturas, se constituye en un reto el obtener materiales con mejor resistencia al desgaste y a la corrosión. Esto se constituye en un reto

serio de funcionalización de superficies. Se usan recubrimientos tribológicos hechos de materiales duros para proveer protección al desgaste y la abrasión de partes duras y en algunos casos reducir la fricción. Podemos optimizar una gran variedad de propiedades funcionales de manera separada entre las del material en bloque y las de la superficie aplicando un recubrimiento apropiado. Por ejemplo, en herramientas de corte, el material en bloque provee la tenacidad mientras que el recubrimiento es el responsable de la resistencia a la abrasión y la reducción de la fricción<sup>12</sup>. Se han depositado recubrimientos basados en carbono tipo DLC, de sus siglas en inglés *diamond-like carbon*, junto con otros materiales más suaves que actúan como lubricante sólido y reduce la fricción, decrece la fatiga de contacto de rodadura y fractura por deslizamiento<sup>13</sup>. En todo caso, la protección de la superficie contra corrosión en ambientes agresivos y/o bajo temperaturas altas requiere de nuevos recubrimientos con un entendimiento de las propiedades de interfaz entre superficie del material a proteger, llamado técnicamente sustrato, y recubrimiento que suplan las necesidades tribológicas demandantes. En la última década se han formulado dos tipos de recubrimientos con aproximaciones nanométricas para buscar una solución a superficies con mejores propiedades tribológicas: multicapas<sup>14</sup> y nanocompuestos<sup>15</sup>. Adicional a los nanocompuestos y multicapas se plantea desde ahora la necesidad de un escalamiento de los procesos de deposición para el tratamiento de sustratos tridimensionales en donde el concepto de “línea de visión” no se debe usar más, crítico para depositar recubrimientos homogéneos en cavidades pequeñas, tales como herramientas micromanufacturadas para patrones de replicación superficial<sup>16</sup>.

Desde el punto de vista del procesamiento interfacial, la clave consiste en tener el control de uniformidad de una película y la adhesión en un proceso eficiente de producción. En el laboratorio de investigación de películas delgadas tenemos la fortaleza de poder crecer “*in-situ*” multicapas de óxidos de materiales usando la técnica de pulverización catódica (*sputtering*) en atmósfera de oxígeno a altas presiones (3 a 4 mbar); en colaboración con el Centro de Desarrollo Tecnológico (CDT-ASTIN) del SENA, sede Cali, crecemos multicapas de recubrimientos de nitruros, carburos y carburonitruros de metales de transición por medio de un sistema de pulverización catódica de 4 magnetrones, y con un sistema rotador de portasustratos. Los parámetros establecidos nos permiten obtener multicapas de alta calidad, esto es, capas consecutivas de dos materiales diferentes, con espesores nanométricos, entre 5 a 100 nm, depositadas en general sobre sustratos

monocristalinos, con interfaces abruptas con rugosidad interfacial del orden de 0.5 nm (4 a 8 celdas unitarias), con estructura cristalina epitaxial o texturizada, es decir, crecimiento preferencial en una dirección cristalográfica<sup>17</sup>. Por esa razón a estas multicapas se les llama también heteroestructuras. Una multicapa es una superred si hay una periodicidad de composición química o espacial.

La técnica de *sputtering* a altas presiones de oxígeno permite crecer artificialmente estas heteroestructuras con control de espesor de dos celdas unitarias y rugosidades muy bajas<sup>18</sup>. Hemos crecido superredes ferromagnéticas / antiferromagnéticas de la manganita de Lantano dopada con Calcio,  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ , las cuales presentan el fenómeno de polarización de intercambio<sup>19</sup> (*Exchange Bias effect*) y su dependencia con el espesor de las capas individuales. Hemos crecido superredes cerámicas tipo Ti/TiN, Zr/ZrN, TiN/ZrN, TiCN/Ti(Nb)CN, las cuales muestran mejoramiento de las propiedades mecánicas con el aumento del número de bicapas<sup>20,21</sup>. Hemos estudiado estos dos tipos de sistemas diferentes con propiedades diferentes pero fuertemente influenciadas por la presencia de interfaces y contribución del efecto de tamaño debido a que sus espesores están en el orden de los nanómetros

En este artículo presentamos resultados sobre la dependencia de propiedades magnéticas, mecánicas y anticorrosivas de materiales crecidos en forma de multicapa con el espesor de las capas y su periodicidad, dejando todos los demás parámetros de crecimiento idénticos. El estudio lo realizamos en dos tipos de heteroestructuras: la primera es una bicapa compuesta de dos materiales con propiedades magnéticas diferentes: uno ferromagnético y el otro antiferromagnético; la segunda son superredes compuestas de dos materiales con propiedades mecánicas y corrosivas diferentes. Los resultados obtenidos indican que, las bicapas magnéticas presentan una respuesta que depende del espesor relativo de las capas ferro,  $t_F$ , y antiferro,  $t_{AF}$ . Las superredes, que actúan como un recubrimiento, presentan un mejoramiento en las propiedades mecánicas como dureza y módulo de elasticidad con el aumento en el número de bicapas, esto es, el número de interfaces; el igualmente, un mejoramiento en las propiedades anticorrosivas cuando una de las capas que forma la superred tiene una componente anticorrosiva.

Primero, presentaremos el estado del arte en la heteroestructuras basadas en óxidos magnéticos de metales de transición, y de recubrimientos tipo superredes de material metal/cerámico y cerámico/cerámico. Enseguida discutimos los resultados de propiedades magnéticas de bicapas ferromagnética / antiferromagnética del sistema  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$  y su dependencia con el espesor relativo de

la capas individuales; y luego presentamos los resultados de propiedades mecánicas y corrosivas de superredes de nitruros de metales de transición TiN/ZrN y HfN/VN y su dependencia con el número de bicapas. Al final las conclusiones de los resultados obtenidos enfatizando aquellas “nuevas” propiedades que cambian dramáticamente debido a la presencia de interfaces y fenómenos interfaciales.

### 1. Heteroestructuras de óxidos magnéticos de metales de transición

Los óxidos de metales de transición ofrecen un amplio rango de estructuras cristalinas con una gran variedad de propiedades físicas tales como: permitividades dieléctricas, piezoelectricidad, piroelectricidad, ferroelectricidad, de valores altos y sus aplicaciones potenciales han sido exóticas -superconductividad de alta temperatura crítica, magnetorresistencia colosal, etc. La obtención de estos materiales óxidos en forma de película delgada y heteroestructuras ha permitido competir con los semiconductores convencionales llevando a la electrónica de óxidos a otro nivel. Simultáneamente, los óxidos en forma de película delgada y heteroestructuras exhiben una amplia gama de fenómenos y de una nueva física que emerge en las interfaces<sup>22</sup>. Las interfaces de óxidos complejos proveen nueva física, nuevas posibilidades para dispositivos funcionales en aplicaciones actuales y futuras, como por ejemplo, el aporte a la espintrónica<sup>23</sup>. La espintrónica explota el espín intrínseco del electrón y su momento magnético asociado y ha permitido la elaboración de una nueva generación de dispositivos, más pequeños y más versátiles que su homóloga, la microelectrónica. Entre esos comportamientos el magnetismo es un fenómeno que ocurre en escala microscópica y macroscópica, y es necesario entender su origen. No solamente los materiales magnéticos pueden ofrecer un comportamiento magnético, sino que el comportamiento magnético puede ocurrir espontáneamente en una interfaz aún si el material es no magnético<sup>24</sup>. La interacción magnética de los orbitales moleculares en la interfaz entre un óxido ferromagnético con estructura perovskita y algún otro óxido de metales de transición<sup>7</sup>, propician que el sistema sensible a la ocupación del orbital del manganeso cambie el mecanismo de interacción.

Una de las interfaces de mayor interés que ofrecen los sistemas de multicapa es la superficie límite entre el material ferromagnético (F) y el antiferromagnético (AF)<sup>25</sup>. La interacción de intercambio entre momentos magnéticos de los átomos en la superficie límite entre material ferromagnético y material antiferromagnético da lugar al llamado efecto de interacción por polarización de intercambio mejor conocido como “*Exchange Bias*” (EB)<sup>26</sup> observado por

primera vez en partículas de Co, material ferromagnético (F) cubiertas con óxido de Co, material antiferromagnético (AF)<sup>27</sup>. Este efecto ha sido observado también en películas delgadas cuando un material ferromagnético se crece sobre un material antiferromagnético<sup>28</sup> o viceversa, efecto que depende fuertemente de la estructura magnética (espín), la estructura cristalina (anisotropía), la morfología interfacial (rugosidad)<sup>19,29</sup>, etc. El sistema más apropiado para estudiar el efecto de polarización de intercambio (Exchange bias) es en bicapas de un material F/sobre uno AF<sup>30</sup> debido a que desde el punto de vista de crecimiento de la bicapa se tiene un control y caracterización de la interfaz y su dependencia con los otros parámetros estructurales y magnéticos.

El sistema magnético que estudiamos es la manganita de La dopada con Ca,  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ , LCMO, uno de los pocos sistemas con fuerte acoplamiento entre propiedades electrónicas, de espín y el orden en la red cristalina<sup>31</sup>. Además, las propiedades físicas de las manganitas en forma de película delgada son bien diferentes de las del material en bloque debido fundamentalmente a que las propiedades en películas delgadas son sensibles a las tensiones de la red proveniente del desajuste en los parámetros de red entre película y sustrato<sup>18,32</sup>. Varias transiciones magnéticas se presentan en el sistema  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ : una paramagnética / ferromagnética en un amplio rango de  $x$  (0,2 a 0,5) alcanzando el valor mayor de temperatura de Curie a 260 K en la composición  $x=1/3$ ,  $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ , F-LCMO; mientras la transición paramagnética antiferromagnética alcanza el valor máximo de temperatura de Néel también a 260 K en la composición  $x=2/3$ ,  $\text{La}_{1/3}\text{Ca}_{2/3}\text{MnO}_3$ , AF-LCMO<sup>33</sup>. El crecimiento, caracterización magnética y de magnetotransporte de superredes epitaxiales de  $[\text{F-LCMO}(t_F)/\text{AF-LCMO}(t_{AF})]_N$  con  $N(t_F+t_{AF}) = 180$  nm, indican que estas presentan el efecto de *exchange bias*, en donde su campo de polarización,  $H_{EB}$ , depende del número de bicapas  $N$  y del espesor de la capa ferromagnética,  $t_F$ ; específicamente, la magnetización de saturación,  $M_s$ , incrementa con el espesor de la capa antiferromagnética,  $t_{AF}$ <sup>34,35</sup>. En el caso de bicapas F-LCMO( $t_F$ )/AF-LCMO( $t_{AF}$ ) el exponente en la dependencia de la magnetización con temperatura depende de la relación de espesores  $t_F/t_{AF}$ <sup>36,37</sup>.

En este estudio se determinarán los efectos de la interfaz F-LCMO/AF-LCMO en las propiedades magnéticas para diferentes valores de espesores de las capas ferromagnética,  $t_F$ , y antiferromagnética,  $t_{AF}$ . Reportamos aquí las curvas de magnetización para dos series de muestras: aquella para las cuales la relación de espesores  $t_F/t_{AF} = 1/6$  (F10AF60) y  $6/1$  (F60AF10), manteniendo el espesor

total de la bicapa constante en 70 nm; y para  $t_F/t_{AF} = 9/25$  (F9AF25), 15/25 (F15AF25), manteniendo constante el espesor de la capa antiferromagnética,  $t_{AF}$ ,<sup>38</sup> tal que la relación  $t_F/t_{AF} < 1$  excepto para la muestra F60AF10.

## 2. Recubrimientos basados en multicapas cerámico/cerámico

Recubrimientos en forma de multicapa basados en metales de transición (Ti, Cr, Zr) y sus respectivos nitruros ofrecen propiedades novedosas, como por ejemplo, mejoramiento de la dureza y resistencia a la abrasión, bajo coeficiente de fricción, resistencia a la corrosión, entre otros, cuando los espesores de las capas están en el rango de nanómetros<sup>39</sup>. Para el diseño, desempeño y tiempo de vida útil de herramientas de corte, por ejemplo, es requisito tener control de la microestructura, estructura cristalina y morfología superficial. Debido a propiedades excelentes como punto de fusión alto, dureza alta, conductividad térmica alta los materiales cerámicos multicomponente, tales como ZrCN, TiCN and TiNbCN se han usado como recubrimientos protectores<sup>40,41</sup>. El crecimiento alterno de nitruros tipo TiN/AlN, TiN/NbN ó TiN/VN aumenta la dureza de una superficie a valores por encima de 50 GPa además de tener ventajas en molienda en seco, taladrado y torneado. Otra combinación alterna tipo metal/cerámico (Ti/TiN, Zr/ZrN)<sup>20</sup>, aunque no ofrece dureza por encima de 30 GPa, sí ofrece propiedades tribológicas y fisicoquímicas anticorrosivas no obtenidos en los recubrimiento convencionales (de un solo material)<sup>42</sup>. Multicapas de nitruros de metales de transición diferentes exhiben propiedades químicas y mecánicas superiores a las que ofrecen los recubrimientos de un solo tipo de nitruro. En las multicapas la periodicidad espacial de la bicapa, la cual puede llegar a ser del orden de nanómetros, se vuelve un parámetro importante en la correlación entre propiedades físicas y microestructurales. En superredes del sistema TiCN/TiNbCN para una periodicidad  $\Lambda$  de 15 nm la dureza y el modulo de elasticidad alcanzan valores de 42 y 408 GPa, respectivamente<sup>20</sup>, mientras que desde el punto de vista de propiedades electroquímicas, la superred mostró para esta misma periodicidad espacial (15 nm) una resistencia a la corrosión de 8.607 kOhm cm<sup>2</sup> mayor que la del acero 4140 sin recubrir de 1.001 kOhm cm<sup>2</sup>, y un decrecimiento de la tasa de corrosión de 0,57 mm/año para el acero sin recubrir a 0,50 mm/año para el acero recubierto con una sola bicapa ( $\Lambda = 3$  micrómetros), y a  $7,59 \cdot 10^{-4}$  mm/año para el recubrimiento con  $\Lambda = 15$  nm (número de interfaces  $n = 200$ )<sup>21</sup>. La microestructura de un recubrimiento o de una superred se puede cambiar manipulando los parámetros de deposición: técnica de crecimiento presión parcial, temperatura de sustrato, tasa de deposición<sup>43</sup>, entre otros.

Aunque algunos procesos de funcionalización están disponibles, aún a escala industrial, para optimizar procesos y modificar y/o desarrollar nueva funcionalización de superficies es indispensable alcanzar un conocimiento profundo de los fenómenos físicos subyacentes, un conocimiento detallado de aspectos fundamentales relacionados con los mecanismos de crecimiento de la película delgada, procesos de interacción en el crecimiento de materiales con especies externas ó radiación, incluyendo el entendimiento de fenómeno en las interfaces, descripción de fases, defectos, etc. Entre las posibles explicaciones a los resultados están la contribución del bloqueo al movimiento de las dislocaciones por la interfaces, fortalecimiento tipo Hall-Petch, los efectos de tensión cristalina en las interfaces y efecto de superelasticidad<sup>44</sup>. Debido a los mecanismos complejos en los diferentes tipos de interfaces, las interpretaciones teóricas se basan principalmente en modelos fenomenológicos usualmente inadecuados. Sin embargo, en la mayoría de los casos las teorías se enfocan a problemas específicos en donde se simplifica la estructura en la interfaz<sup>45</sup>.

Mostraremos la influencia del número de interfaces ó la periodicidad espacial sobre las propiedades mecánicas de superredes del sistema TiN/ZrN y sobre las propiedades electroquímicas en superredes del sistema HfN/VN, enfatizando los efectos de interacción en la interfaz sobre las propiedades físicas y químicas de un material.

## 3. Detalles Experimentales

Hemos crecido *in-situ* bicapas F-LCMO/AF-LCMO utilizando la técnica de pulverización catódica (*sputtering*) en atmósfera de oxígeno puro a altas presiones ( $P_{O_2} = 3.5$  mbar), sobre sustratos monocristalinos de SrTiO<sub>3</sub> con orientación (001) perpendicular a la superficie del sustrato, y a temperatura de 850 °C. Los sustratos utilizados son de tamaño 0,5cm\*0,5cm\*0,5mm. La descarga utilizada fue de 380 V DC con corriente de 100 mA y una tasa de deposición de 80 nm/h para el blanco ferromagnético con estequiometría La<sub>2/3</sub>Ca<sub>1/3</sub>MnO<sub>3</sub> y de 390 V DC con corriente de 80 mA para una tasa de deposición de 70 nm/h para el blanco antiferromagnético La<sub>1/3</sub>Ca<sub>2/3</sub>MnO<sub>3</sub><sup>18</sup>. Primero se creció la capa antiferromagnética directamente sobre el sustrato con un espesor  $t_{AF}$ , y luego *in-situ* sobre la capa AF se creció la capa ferromagnética con un espesor  $t_F$ . Creímos dos series de muestras: la relación de espesores  $t_F/t_{AF}$  fuese 1/6 (F10AF60) y 6/1 (F60AF10), manteniendo el espesor total de la bicapa constante en 70 nm; la segunda serie para  $t_F/t_{AF} = 9/25$  (F9AF25), 15/25 (F15AF25), manteniendo constante el espesor de la capa antiferromagnética,  $t_{AF}$ . Caracterizamos magnéticamente nuestras

muestras mediante isothermas de histéresis magnética  $M$  vs  $H$ , en el rango de temperatura entre 5 y 260 K, enfriando sin campo magnético aplicado ZFC (de sus siglas en inglés *zero field cooling*) y enfriando con campo aplicado, FC (de sus siglas en inglés *field cooling*). Se toman las isothermas hasta la temperatura de Curie de la muestra, 260 K. El rango de variación del campo magnético aplicado  $H$  fue  $\pm 10000$  Oe, pero los ciclos se presentan entre  $\pm 3000$  Oe, para una mejor visualización de los resultados. Todos los ciclos fueron corregidos asumiendo la contribución diamagnética del sustrato. Por la geometría de nuestras muestras (eje de fácil imanación es en el plano de la película) no consideramos el factor de desmagnetización. El campo aplicado está en el plano de la película.

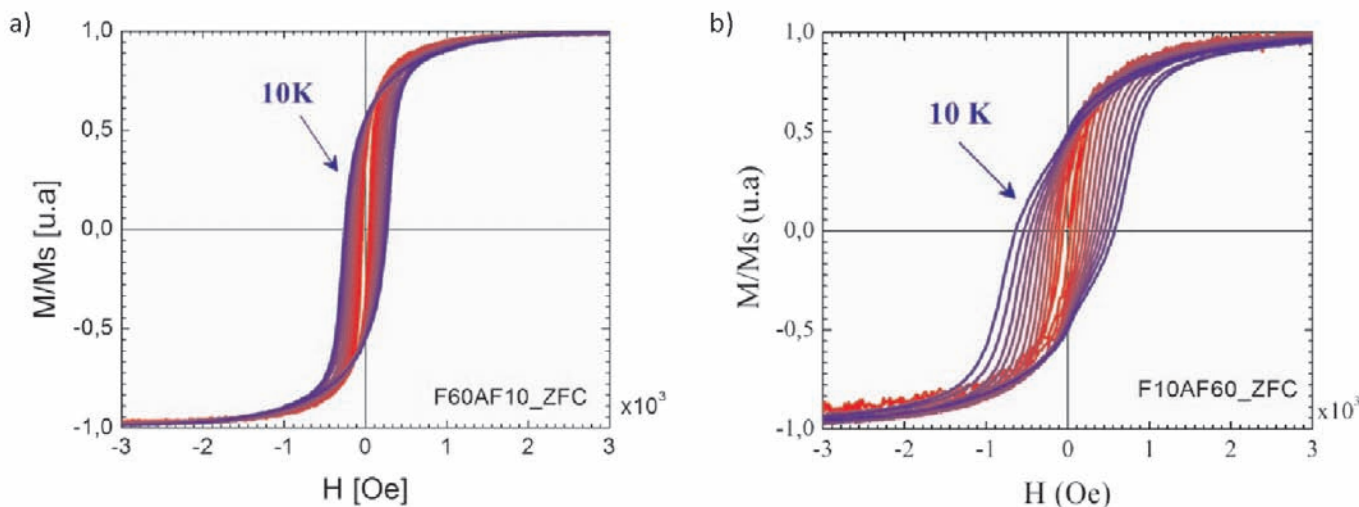
Para el caso de los recubrimientos cerámico/metal y cerámico/cerámico, en estrecha colaboración con el centro de investigación y desarrollo ASTIN-SENA, se crecieron recubrimientos de ZrN y TiN y superredes de  $[\text{TiN}/\text{ZrN}]_n^{46}$  con  $n$  variando entre 1 y 8, por el método reactivo de pulverización catódica rf (13,56 MHz), usando un sistema magnetrón multiblanco. El gas de la descarga fue una mezcla de Ar y el gas reactivo Nitrógeno a 93% y 7% de Ar (50 sccm) y  $\text{N}_2$  (3,7 sccm), respectivamente, a una presión de descarga de  $6 \times 10^{-3}$  mbar. Se utilizaron blancos de alta pureza (99.9%) de Ti y Zr. La potencia utilizada fue de 400 y 350 W para los blancos de Ti y de Zr, respectivamente. Para facilitar la formación estequiométrica de las capas se usó una rotación del portasustratos de 60 rpm. Con un sistema de posicionamiento del portasustratos con respecto a los blancos permite variar el número de bicapas. Las multicapas se crecieron sobre sustratos monocristalinos de Si con orien-

tación (100), y acero AISI 5160, a temperatura de 400 °C durante la deposición, con un voltaje de polarización de -100 V; el espesor total del recubrimiento se mantiene constante en  $3 \mu\text{m}^{20,47}$ . Utilizando la misma técnica y parámetros de deposición, se crecieron las multicapas de nitruro de Hafnio y nitruro de Vanadio  $[\text{HfN}/\text{VN}]_n^{48}$ , con  $n$  variando entre 1 y 80. El acero utilizado como sustrato es el acero nacional 4140, enfocando en proteger la superficie de procesos corrosivos. El espesor total de todos recubrimientos se mantiene constante en 3 mm. En la medida en que aumentamos el número de bicapas se aumenta el número de interfaces desde  $n=1$  hasta  $n=8$ , y la periodicidad espacial de la bicapa  $L = t_{\text{TiN}} + t_{\text{ZrN}}$  disminuye desde  $3 \mu\text{m}$  a 150 nm y para  $L = t_{\text{HfN}} + t_{\text{VN}}$  disminuye desde  $3 \mu\text{m}$  a 37,5 nm

Las curvas carga-descarga fueron realizadas con un nanoindentador UBI1-Hysitron\*TM. Para el estudio de propiedades anticorrosivas se hacen medidas de impedancia alterna en un amplio rango de frecuencias en un medio electroquímico patrón en solución de NaCl, a temperatura ambiente, con electrodos de platino. De estas mediciones se obtienen los diagramas Nyquist, esto es los hemisiclos de impedancia imaginaria versus impedancia real.

#### 4. Resultados en bicapas de material ferromagnético y antiferromagnético

La Figura 1 presenta las isothermas para las bicapas (a) F60AF10 y (b) F10AF60 sin campo aplicado, ZFC<sup>37,38</sup>. La magnetización se ha normalizado al valor de saturación  $M_s$ . La isoterma para temperaturas más altas son rojas, mientras para temperaturas bajas son azules. Observamos



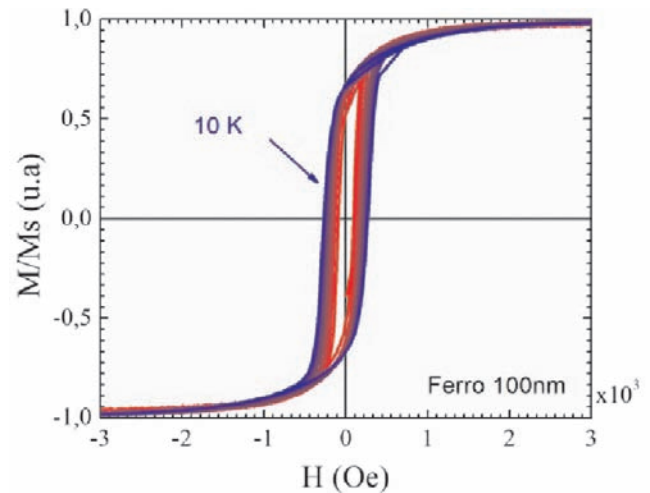
**Figura 1.** Isothermas de histéresis magnética para las bicapas F60AF10 (a) y F10AF60 (b), en campo de enfriamiento cero, ZFC, a diferentes temperaturas en el rango entre 10 K y 260 K<sup>37,38</sup>

una clara diferencia en el comportamiento de la curva de histéresis magnética en estas dos muestras: aquella con  $t_F$  mayor (a) tiene unos ciclos de histéresis similares al esperado para el de una capa ferromagnética F-LCMO, como el mostrado en la Figura 2. La bicapa con  $t_F$  menor (b) presenta dos características particulares; uno es el aumento en el ancho de la curva implicando un aumento significativo en la coercitividad comparado con los valores de la bicapa F60AF10; y el segundo está asociado con la anomalía de la curva, la cual no sigue el comportamiento típico de un ferromagneto, evidenciado en la variaciones de la concavidad que toma las curvas de histéresis en ambas ramas, cuando el campo aplicado decrece y cuando el campo aplicado crece. Muy probablemente la anomalía se presenta debido a interacciones en la interfaz, las cuales, posiblemente, están siendo afectadas por el espesor de la capa antiferromagnética ( $t_{AF}=6t_F$ ).

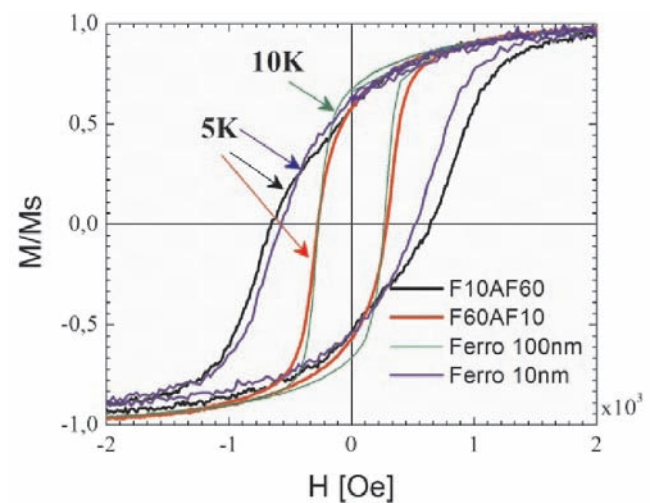
En el caso de películas muy delgadas, debemos tener en cuenta que cuando se crecen sobre sustratos monocristalinos las tensiones se extienden hasta un cierto espesor crítico, el cual para el caso de la manganita ferromagnética ha sido reportado como  $50 \text{ nm}^{49}$ . Así que en el análisis del comportamiento de estos ciclos de histéresis debemos considerar la contribución de los efectos de interfaz y la de las tensiones internas. Para estar seguros de si los efectos que observamos se deben a la interfaz ó son producidos por las tensiones internas que aparecen durante el crecimiento de las películas, hemos crecido dos capas ferromagnéticas, con espesores de 10 y 100 nm respectivamente, bajo las mismas condiciones de crecimiento de las bicapas.

La Figura 2. presenta las isoterma de histéresis para una película ferromagnética  $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ , F-LCMO de 100 nm de espesor a diferentes temperaturas entre 10 y 260 K. La curva azul corresponde a temperaturas más bajas; las curvas rojas hacia temperaturas más altas. Su comportamiento es el típico de la fase ferromagnética de la manganita de lantano dopada con calcio<sup>18,19</sup>. Si comparamos los ciclos para la capa ferro de 100 nm y la bicapa F60AF10 observamos que predomina en el ciclo histerético de la bicapa el comportamiento ferromagnético de la capa F-LCMO (100 nm); sin embargo hay pequeñas diferencias en el campo coercitivo a altas temperaturas (curvas de color rojo), muy probablemente debido a la presencia de la capa antiferromagnética en la bicapa.

La Figura 3 compara los ciclos isotérmicos de histéresis magnética, a la temperatura de 5 K, en ZFC, para las bicapas F10AF60 (curva color negro), F60AF10 (curva color rojo); para las capas ferromagnéticas de 10 nm de espesor (azul) y la capa ferromagnética de 100 nm de espesor (verde). La isoterma para esta última corresponde a la tomada a tem-



**Figura 2.** Ciclos isotérmicos de  $M$  vs  $H$ , en campo de enfriamiento cero, ZFC, para una película delgada de la fase ferromagnética  $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ , F-LCMO, con espesor de 100 nm. Rango de temperaturas de medición entre 10 K y 260 K (curvas azules corresponde a isoterma a temperaturas más bajas, y curvas rojas a temperaturas más altas). Magnetización normalizada a la magnetización de saturación  $M_s$ .



**Figura 3.** Ciclos de histéresis magnética normalizados a la magnetización de saturación para la bicapa F60AF10 (línea roja), a 5K; F10AF60 (línea negra) a 5K; la capa ferromagnética F-LCMO a 100 nm de espesor (línea verde), a 10 K, y a 10 nm de espesor (línea azul), a 5K.

peratura de 10 K. La magnetización  $M(H)$  está normalizada a la magnetización de saturación para cada muestra.

Los ciclos para la bicapa F60AF10, la de mayor volumen de fase ferromagnética, (línea roja) y la capa ferromagnética F-LCMO de 100 nm de espesor (línea verde) se superponen en los valores de campo coercitivo. Este resultado indica que la presencia de la capa antiferromagnética no tiene efecto sobre el campo coercitivo (el trabajo necesario para invertir



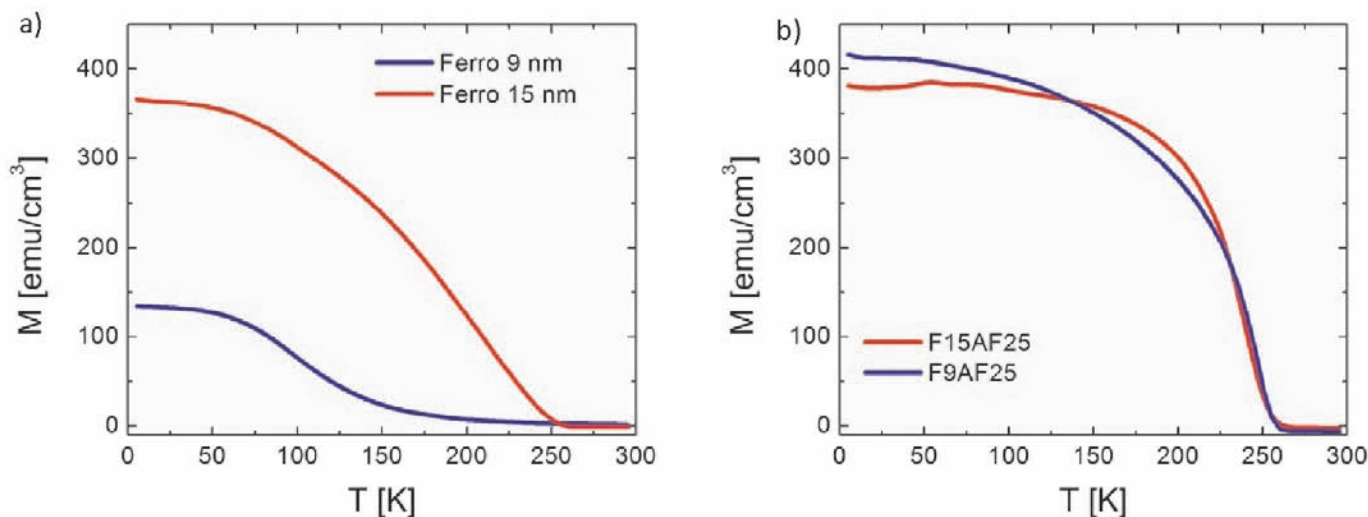
la magnetización) pero sí altera el curso de la curva de histéresis en la región de magnetización remanente, indicando que efectivamente hay un efecto de las interacciones de los momentos magnéticos en la interfaz: la capa antiferromagnética contribuye con la magnetización remanente de la bicapa.

Los ciclos de histéresis para la bicapa F10AF60 (la de menor volumen de material ferromagnético), línea negra, y para la capa F-LCMO de 10 nm de espesor (línea azul), muestran que en ambos casos hay un aumento drástico en el campo coercitivo comparado con el de la bicapa F60AF10 y el de la capa F-LCMO de 100 nm de espesor, respectivamente, influenciado entonces por las tensiones internas en la capa ferromagnética, las cuales al espesor de 10 nm no se han relajado. Pero de todos modos la bicapa F10AF60 presenta un campo coercitivo mayor que el de la capa F-LCMO de 10 nm de espesor, incremento que asociamos a los efectos de interacciones en la interfaz F/AF.

Estudiamos la dependencia de la magnetización por unidad de volumen con la temperatura en películas delgadas de la fase ferromagnética de la manganita de lantano dopada con calcio  $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$  con espesores de 9 nm y 15 nm y en bicapas F9AF25 y F15AF25. El espesor de la capa antiferromagnética se mantuvo en 25 nm para las dos bicapas. Para obtener estas curvas enfriamos la muestra desde 300 K hasta 5 K, sin campo magnético aplicado, ZFC. Una vez alcanzada la temperatura de 5 K incrementamos la temperatura con un campo magnético aplicado de 100 Oe, suficiente para inducir una magnetización; 100 Oe es un campo magnético muy por debajo del necesario para

magnetización de saturación a 5 K. La magnetización por unidad de volumen se calculó para el volumen nominal de la fase F-LCMO. La Figura 4 muestra la dependencia de la magnetización por unidad de volumen con la temperatura para películas delgadas de la fase ferromagnética de la manganita de lantano dopada con calcio  $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$  con espesores de 9 nm y 15 nm (Figura 4a) y para bicapas F9AF25 y F15AF25 (Figura 4b). Presentamos las curvas de desmagnetización térmica en la misma escala tanto en la ordenada como en la abscisa para poder comparar la curva entre las diferentes muestras. Las curvas de desmagnetización térmica para las capas ferromagnéticas son las típicas conocidas para este sistema F-LCMO en forma de películas delgada<sup>18</sup>, sin embargo, observamos que hay una disminución drástica de la magnetización para la capa más delgada (9 nm) indicando un efecto de tamaño sobre esta propiedad magnética, probablemente debido a tensiones cristalinas producidas durante el crecimiento, las cuales para la capa más delgada son de mayor magnitud y densidad. El comportamiento de  $M(T)$  para las capas individuales, F-LCMO, es el esperado, asumiendo que el campo al que se midieron (100 Oe) no corresponde al campo  $H$  aplicado para alcanzar saturación en la magnetización.

Al observar las curvas de demagnetización térmica para las bicapas, Figura 4b, observamos primero que la forma de las dos curvas es diferente en las dos curvas entre si y sus valores de  $M(T=5\text{ K})$  y  $T_C$ , son también diferentes a los de las capas ferromagnéticas, Figura 4a. La extrapolación de la magnetización de las bicapas a temperatura cero es incrementada por la presencia de la fase antiferromagnética con respecto a los respectivos espesores de las capas F-



**Figura 4.** Momento magnético normalizado al volumen nominal de la capa ferromagnética en función de la temperatura para películas de la fase F-LCMO (a) con espesores de 9 y 15 nm y para bicapas F9AF25 y F15AF25 (b)

LCMO, pero, ese incremento es drástico en la capa con espesor  $t_F$  menor. Además, una característica es que las dos curvas de desmagnetización térmica en las bicapas, Figura 4b, se cruzan alrededor de la temperatura 140 K; valor cercano a la temperatura de Néel para películas delgadas de la fase antiferromagnética. Así estas curvas de magnetización, en  $\text{emu}/\text{cm}^3$ , en función de la temperatura nos permite aseverar que a bajas temperaturas, específicamente a  $T=5\text{K}$ , el aumento del momento magnético por encima del valor de la respectiva capa F-LCMO con el mismo espesor,  $t_F$ , está asociado con la presencia de la interfaz F-LCMO/AF-LCMO, y entonces con el espesor relativo  $t_F/t_{AF}$ .

### 5. Resultados de propiedades mecánicas en multicapas de TiN/ZrN

La Figura 5 muestra las curvas carga-descarga versus desplazamiento para la serie de multicapas  $[\text{TiN}/\text{ZrN}]_n$ , con  $n = 1$  hasta 8. Los resultados muestran una curva histerética típica de indentación; sin embargo tanto la parte de la curva en carga, el punto máximo desplazamiento y la parte de la curva de descarga se desplazan hacia la izquierda, es decir, hacia valores de desplazamiento menores para un mismo valor de carga, en la medida en que el número  $n$  de bicapas aumenta de 1 a 8.

Este resultado indica que hay una influencia de la presencia de interfaces en las propiedades mecánicas del recubrimiento, muy probablemente debido a que la interfaz actúa como una barrera para el movimiento de dislocaciones. Las curvas de carga aplicada versus desplazamiento permiten determinar la dureza ( $H$ ) y el módulo de elasticidad ( $E_r$ ), y podemos relacionar esos valores con el número de bicapas en el sistema de las multicapas de  $[\text{TiN}/\text{ZrN}]_n$  depositadas sobre acero AISI 5160. Es importante recalcar que los parámetros de crecimiento se mantuvieron idénticos para todas las multicapas de este estudio.

En la Figura 6 se grafica la dependencia de la dureza ( $H$ ) y el módulo de elasticidad ( $E_r$ ) con el aumento del número de bicapas. Podemos observar un incremento tanto de la dureza  $H$  como del módulo de elasticidad en la medida en que el número de bicapas aumenta de 1 a 8. La dureza se incrementó de  $15 \pm 1\text{GPa}$  hasta  $29 \pm 2\text{GPa}$  y el módulo de elasticidad ( $E_r$ ) de  $180 \pm 1\text{GPa}$  hasta  $245 \pm 2\text{GPa}$ , representando así un incremento del 93% y 36% respectivamente.

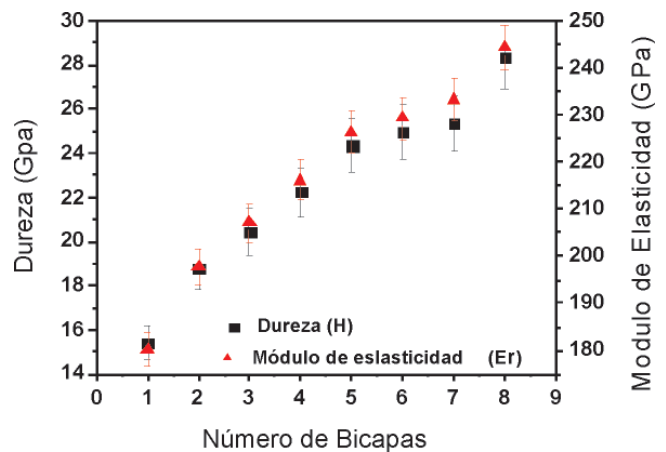


Figura-6. Dureza y Módulo de elasticidad de las multicapas de  $[\text{TiN}/\text{ZrN}]_n$  depositadas sobre acero AISI 5160 en función del número de capas.

Este resultado es una evidencia de la influencia de las interfaces, específicamente, las interacciones atómicas y moleculares en cada interfaz sobre las propiedades mecánicas del recubrimiento como un todo. Se han hecho estudios en otros sistemas de multicapas<sup>19-21</sup> en donde los resultados indican siempre que hay un mejoramiento de propiedades mecánicas, tribológicas y en algunas ocasiones anticorrosivas con el aumento de número de interfaces.

### 6. Resultados de resistencia a la corrosión en multicapas de HfN/VN

La Figura 7 muestra las curvas impedancia imaginaria versus impedancia real, diagramas de Nyquist, para las multicapas  $[\text{HfN}/\text{VN}]_n$ , para  $n = 1, 10, 30, 50, 80$  y para la superficie del acero sin recubrimiento. Se observa una clara dependencia del diagrama Nyquist con el número de bicapas. La curva Nyquist para el sustrato sin recubrimiento no es detectable a la escala de observación de las otras

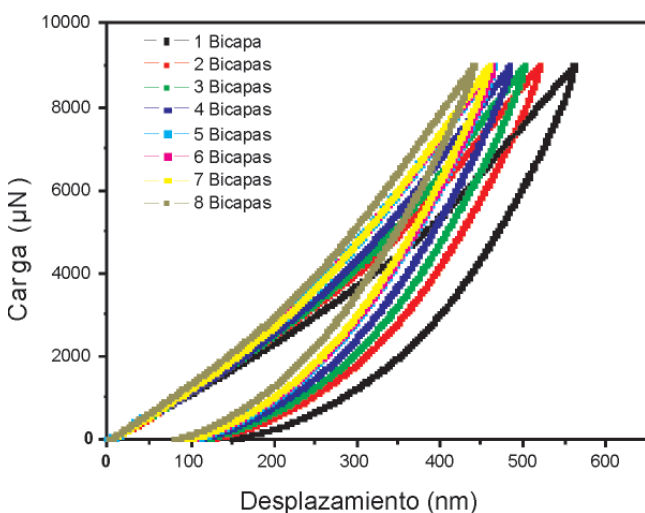
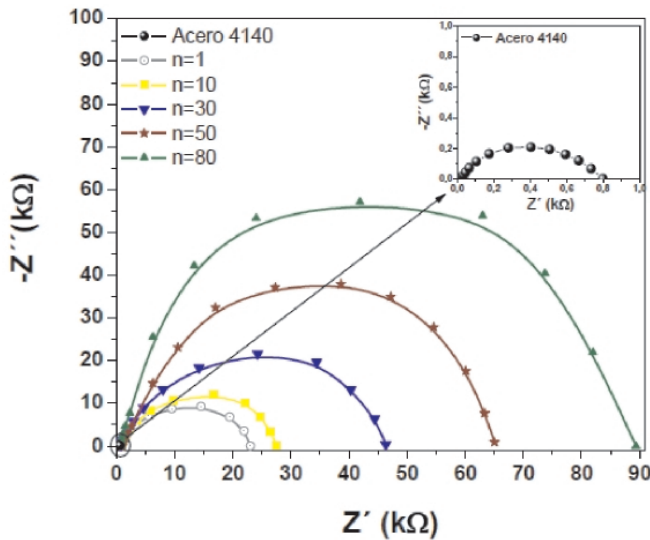


Figura 5. Carga en función del desplazamiento para multicapas de  $[\text{TiN}/\text{ZrN}]_n$  depositadas sobre acero AISI 5160, con  $n = 1$  (color gris) 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 (color negro).



**Figura 7.** Diagramas de impedancia compleja versus impedancia real en multicapas de HfN/VN depositadas sobre sustratos de acero 4140, para diferente número de bicapas, desde  $n=1$  hasta  $n=80$ .

curvas Nyquist; se presenta a una escala más sensible, mostrada en la esquina superior de la Figura 7. El corte de la curva con el eje real nos da una medida de la resistencia óhmica a la polarización de acuerdo con el circuito equivalente al que se intenta ajustar los datos experimentales. El circuito equivalente usado es la celda de Randless<sup>50</sup>, la cual permite simular la contribución a la impedancia de la interfaces multicapa/sustrato y electrolito/multicapa como capacitancias en paralelo, tomando en cuenta la resistencia de la multicapa y la resistencia del electrolito debido a la reacción de transferencia de iones desde el electrolito hasta sustrato metálico<sup>51,52</sup>. Para analizar los diagramas se partió desde  $Z'$  ( $Z'' = 0$ ), asociada a la intercepción de la curva Nyquist con la abscisa, hasta  $Z'$  ( $Z''$  máx.).

Los valores de resistencia a la polarización calculados con los diagramas de Nyquist se usan para calcular la velocidad de corrosión. En el caso de estas multicapas se encuentra que la velocidad de corrosión del acero AISI 4140 es mejorada hasta en un 99% con el depósito de las multicapas.

Este comportamiento es característico de las estructuras de varias capas, y se incrementa como consecuencia del aumento en el número de bicapas, la densidad y el número de interfaces para un mismo espesor del sistema multicapa. Esto lleva a que la energía necesaria para mover con libertad los iones Cl, que se encuentran en el electrolito, a través de la interface capa/sustrato sea mayor por lo tanto, los iones que llegan al sustrato son menos debido al cambio de rumbo experimentado cuando estos se encuentran con una nueva interface<sup>53</sup>.

## Conclusiones

Nos hemos propuesto mostrar que cuando la materia se forma o crece con dimensiones nanométricas los efectos de tamaño y los efectos de interfaz predominan sobre los efectos del mismo material en bloque dando lugar a un material con propiedades novedosas. Esto es válido no solo en las propiedades eléctricas y magnéticas de un material sino en sus propiedades mecánicas, tribológicas y electroquímicas. Una forma de material con efectos de nanoescala son las películas delgadas y las heteroestructuras formadas por capas intercaladas de materiales con propiedades diferentes. Muy importante en la modificación de las propiedades de este tipo de bicapas y multicapas es poder tener el control de la estructura cristalina y la morfología reflejada en el espesor de las películas y la rugosidad interfacial. Hemos logrado crecer bicapas de dos materiales con propiedades magnéticas diferentes basadas en la manganita de Lantano dopada con Calcio, y superredes de materiales cerámicos diferentes basados en nitruros de metales de transición, con espesores en el orden de nanómetros y rugosidades interfaciales del orden de un parámetro de red ó menor. En el caso de bicapas magnéticas encontramos que sus propiedades magnéticas, medidas en isoterma de histéresis  $M$  vs  $H$  y  $M$  vs  $T$  dependen no solo de las tensiones internas creadas durante la formación de la bicapa sino de efectos de interacción magnética de los átomos entre las capas ferromagnética y antiferromagnética en la interfaz. Específicamente, las interacciones magnéticas en la interfaz F/AF cambian la forma del ciclo de histéresis, aumenta el campo coercitivo y la magnetización de saturación. Un resultado relevante es que la magnetización, medida en momento magnético por unidad de volumen, aumenta drásticamente con la presencia de la capa antiferromagnética, pero su contribución es proporcionalmente mayor cuando la razón de espesores  $t_F/t_{AF}$ , para  $t_F/t_{AF} < 1$ , disminuya, es decir, para un mismo  $t_{AF}$  el aumento de la magnetización es más drástico entre menor sea  $t_F$ .

En cuanto a la dependencia de las propiedades mecánicas y electroquímicas con el número de bicapas en una superred de nitruros de metales de transición, TiN/ZrN y HfN/VN, manteniendo el espesor total de la superred constante ( $3\mu\text{m}$  en nuestro caso), encontramos en el sistema  $[\text{TiN}/\text{ZrN}]_n$  un aumento tanto de la dureza de 15 a 29 GPa, así como del módulo de elasticidad de 180 a 245 GPa con la disminución de la periodicidad espacial  $\Lambda$  de la superred de  $3\mu\text{m}$  a 375 nm ó aumento del número de interfaces de  $n=1$  a 8. Igualmente, encontramos un aumento cercano al 90% de la resistencia a la corrosión y una disminución de la velocidad de corrosión con el aumento de número de interfaces, ó disminución de la periodicidad espacial en superredes HfN/VN cuando aumentamos el número de bicapas de 1 a 80.

Así, un mejoramiento de propiedades de materiales implica el crecerlos artificialmente a escala nanométrica de manera controlada y por otro lado obtener un entendimiento de los procesos e interacciones que ocurren en las interfaces que permiten cambiar de manera controlada el tamaño y morfología del material y su correlación con las propiedades del mismo.

### Agradecimientos

Los autores agradecemos a las entidades que de una u otra manera han apoyado el desarrollo de esta investigación: Centro de Excelencia de Nuevos Materiales a través del *El Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación Francisco José de Caldas* Contrato RC No. 275-2011; al Centro de Desarrollo Tecnológico CDT-ASTIN SENA, sede Cali, por el crecimiento de los recubrimientos; al Dr. Axel Hoffmann del Laboratorio Nacional de Argonne, Estados Unidos; a los profesores Juan Muñoz, Francisco Espinoza y Martín Yáñez del CINVESTAV-Querétaro, México; a los profesores Joan Steve y Arturo Lousa de la Universidad de Barcelona, España.

### Referencias

1. **Adamson A.**, Physical Chemistry of Surfaces, Wiley Interscience, 1967; J. Bikerman, *Physical Surfaces*, Academic Press, 1970; J.-E. Sundgren, L. Hultman, *Materials and Processes for Surface and Interface Engineering*, Y. Pauleau (ed.), Kluwer, Amsterdam, 1995; Anders Nilsson, Lars G.M. Pettersson and Jens K. Nørskov, *Chemical Bonding at Surfaces and Interfaces*, Elsevier, 2007.
2. **Bader S. D., J. L. Erskine**, in: **B. Heinrich, J. A. C. Bland** (Eds.); *Ultrathin Magnetic Structures*, Springer Verlag, Berlin, 1994, y referencias citadas; G. A. Prinz, *Device physics-magneto-electronics*, *Science* **282**, (1998) 1660-1663; *Handbook of Surfaces and Interfaces of Materials*, Five-Volume Set, Editado por Hari Nalwa, Academic Press, 2001.
3. **Wolf S. A., et al.**, *Science* **294** (2001) 1488-1495; P. Bruno et al., *J. Appl. Phys.* **68**, (1990) 5759; R. Brajpuria et al., *Appl. Surf. Sci.* **253** (2007) 8584.
4. **Toth L.E.**, *Transition Metal Carbides and Nitrides*, Academic Press, New York, (1971); Z. Rymuza *Tribology of Miniature Systems* in Tribology and Interface Engineering Series, North-Holland 1998.
5. **Arzt E.**, *Size effects in materials due to microstructural and dimensional constraints: a comparative review*, *Acta Mater.* **46** (1998) 5611-5626 y referencias citadas; R. A Andrievski, A. M. Glezer, *Scripta Mater.* **44** (2001) 1621-1624.
6. **Shefford P. Baker**, *Mater. Sci. Eng. A*, **319** (2001) 16-23; M. Finazzi, L. Duò, F. Ciccacci; *Surf. Sci. Reports*, **64** (2009) 139-167.
7. **Satoshi Okamoto**, *Phys. Rev. B* **82** (2010) 024427.
8. **Ohring M.**, *The Materials Science of Thin films*, Academic Press, 1992, 2000 2nd edition; D.L. Smith, *Thin Film Deposition*, McGraw Hill, 1995; K.N. Tu et al. *Electronic Thin Film Science*, Macmillan, 1992; R.C. O'Handley, *Modern Magnetic Materials*, Wiley, 2000.
9. **Baibich M. N., J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas**, *Phys. Rev. Lett.*, **61** (1988) 2472.
10. **Asano Y., A. Oguria, and S. Maekawa**, *Phys. Rev. B*, **48** (1993) 6192; J. Barnas and Y. Bruynseraede, *Phys. Rev. B*, **53** (1996) 5449; P. Zahn, I. Mertig, M. Ritcher, and H. Eschrig, *Phys. Rev. Lett.*, **75** (1995) 2996.
11. **WAP** *Novel magnetic phenomena in surfaces/interfaces and their technological applications*. [http://www.funcoatconsolider.com/en/actividad/ejes\\_magneticos-interfases.asp](http://www.funcoatconsolider.com/en/actividad/ejes_magneticos-interfases.asp)
12. **Marcolino Carvalho N. J.** "Low friction and wear resistance coatings microstructure and mechanical properties", Groningen University Press, 2001, y las referencias citadas allí.
13. **Donnet C.**, *Recent progress on the tribology of doped diamond-like and carbon alloy coatings: a review*, *Surf. Coat. Technol.*, **100-101** (1998) 180-186; A. A. Voevodin, M. S. Donley, J. S. Zabinski, *Surf. Coat. Technol.*, **92** (1997) 42-49.
14. **Daniels B. J.**, Ph.D. thesis, Stanford University, Department of Materials Science and Engineering, 1995; J. S. Koehler. *Phys. Rev. B*, **2** (1970) 547; S. L. Lehoczy. *J. Appl. Phys.*, **49** (1978) 5479; M. Shinn, L. Hultman and S. A. Barnett. *J. Mater. Res.*, **7** (1992) 901.
15. **Nanostructured Coating**, Eds. **A. Gavaleiro, J. T. Hosson**, Springer-Verlag, Berlin, 2006. Nanostructured Thin Films and Nanodispersion Strengthened Coatings; Eds. A. A. Voevodin, D. V. Shtansky, E. A. Levashov, J. J. Moore, Kluger Academic, Dordrecht, 2004.
16. **WPC** *Chemical, structural and mechanical characterization of functionalised surfaces at room and high temperatures; Corrosion and oxidation behaviour under extreme conditions*. [http://www.funcoatconsolider.com/en/actividad/ejes\\_control-recubrimientos-proteccion-superficial.asp](http://www.funcoatconsolider.com/en/actividad/ejes_control-recubrimientos-proteccion-superficial.asp)
17. Grupo de investigación de películas delgadas: <http://calima.univalle.edu.co/publicaciones>.
18. **G. Campillo, A. Berger, J. Osorio, J. E. Pearson, S. D. Bader, E. Baca, and P. Prieto, J. Magn. Magn. Mater.**, **237** (2001) 61-68; G. Campillo, L. F. Castro, P. Vivas, E. Baca, P. Prieto, D. Arias, J. Santamaría, A. Berger and S. D. Bader, *Surf. Rev. Lett.*, **9** (2002) 1611-1615; A. Berger, G. Campillo, P. Vivas, J. E. Pearson, and S. D. Bader, E. Baca and P. Prieto, *J. Appl. Phys.*, **91** (2002) 8393-8395.
19. **Prieto P., M. E. Gómez, G. Campillo, A. Berger, E. Baca, R. Escudero, F. Morales, J. Guimpel, and N. Haberkorn**, *Phys. Stat. Sol. (a)*, **201** (2004) 2343-2346; G. Campillo, M. E. Gómez, W. Lopera, and P. Prieto, *Rev. Col. Fis.*, **35** (2003) 267.
20. **Caicedo J. C., P. Prieto, J. M. Caicedo, G. Bejarano, Adam G. Balogh, S. Gottschalk**, *Rev. Col. Fís.*, **37** (2005) 388; J. C. Caicedo, C. Amaya, L. Yate, O. Nos, M. E. Gómez, P. Prieto, *Mater. Sci. Eng. B*, **171** (2010) 56-61.
21. **Caicedo J. C., L. Yate, M. E. Gómez, C. Amaya, P. Prieto, G. Zambrano, J. Muñoz-Saldaña**, *Appl. Surf. Sci.*, **256** (2010) 2876-2883; J. C. Caicedo, L. Yate, G. Zambrano, C. Amaya, M. E. Gómez, P. Prieto, J. Muñoz-Saldaña, *Appl. Surf. Sci.*, **256** (2010) 5898-5904.

- 22 **Pavlo Zubko, Stefano Gariglio, Marc Gabay, Philippe Ghosez and Jean-Marc Triscone**, "Interface Physics in Complex Oxide Heterostructures", Annual Review of Condensed Matter Physics, Vol. 2, 141-165 (2011).
- 23 **Chakhalian J., J. W. Freeland, G. Srajer, J. Stremper, G. Khaliullin, J. C. Cezar, T. Charlton, R. Dalgliesh, C. Bernhard, G. Cristiani, H.-U. Habermeier and B. Keimer**, Nature Phys. **2** (2006) 244; H. Yamada, Y. Ogawa, Y. Ishii, H. Sato, M. Kawasaki, H. Akoh and Y. Tokura, Science, **305** (2004) 646.
- 24 **Brinkman A., M. Huijben, M. van Zalk, J. Huijben, U. Zeitler, J. C. Maan, W. G. van der Wiel, G. Rijnders, D. H. A. Blank and H. Hilgenkamp**, Nature Mater, **6** (2007) 493.
- 25 **Perroni C. A., V. Cataudella, G. De Filippis, G. Ladonisi, V. Marigliano Ramaglia and F. Ventriglia**; Phys. Rev. B, **68** (2003) 224424.
- 26 **Nogués J., Ivan K. Schuller, J. Magn. Magn. Mat.**, **192** (1999) 203-232.
- 27 **Meiklejohn W. H.**, *Exchange Anisotropy-A Review*, J. Appl. Phys., **33** (1962) 1328.
- 28 **S. Giri, M. Patra and S. Majumdar**, *Exchange bias effect in alloys and compounds*. Topical review; J. Condens. Matter **23** (2011) 073201; Pedro Prieto, Superredes magnéticas, Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (2005) 395-409.
- 29 **Panagiotopoulos I., C. Christides, M. Pissas and D. Niarchos**, Phys. Rev. B, **60** (1999) 485-491; N. Moutis, C. Christides, I. Panagiotopoulos and D. Niarchos, Phys. Rev. B, **64** (2001) 094429.
- 30 **Kiwi M., J. Magn. Magn. Mat.**, **234**, 584-595 (2001).
- 31 **Dagotto E., T. Hotta, and A. Moreo**, *Phys Rep.* **334** (2001) 1.
- 32 **Ramírez J. G., F. Pérez, M. E. Gómez and P. Prieto**, Phys. Stat. Solid. C, **1** (2004) 13-16,
- 33 **Cheong S.W. and Duewer, Hwang**, "Ferromagnetism vs Charge/Orbital Ordering in Mixed-Valent Manganite, in *Colossal Magnetoresistance Oxides*", edited by Y. Tokura (Gordon y Breach), Monographs in Condense Matter Science, London, (1999).
- 34 **Campillo G., A. Hoffmann M. E. Gómez and P. Prieto**, J. Appl. Phys. **97** (2005) 10K104; G. Campillo, A. Hoffmann, M. E. Gómez, and P. Prieto, Rev. Col. Fis. **37**, 215 (2005).
- 35 **Gómez M. E., G. Campillo, J. G. Ramírez, P. Prieto, A. Hoffmann, J. Guimpel, N. Haberkorn, A. Condó, and F. Lovey**, IEEE Transactions on Magnetics **42** (2006) 2981-2983.
- 36 **Marín L., J. G. Ramírez, M. E. Gómez, A. Hoffmann, C. Quinayas, G. Bolaños**, Rev. Col. Fís., **39** (2007) 51-54.
- 37 **Marín L., J. G. Ramírez, M. E. Gómez**, Journal of Physics: Conference Series, **200** (2010) 072064.
- 38 **Marín L.**, Trabajo de Grado en Física *Efectos de Interfaz en Bicapas Ferro  $La_{2/3}Ca_{1/3}MnO_3$ / Antiferro  $La_{1/3}Ca_{2/3}MnO_3$* , Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2011.
- 39 **Barshilia H. C., K. S. Rajam**, J. Appl. Phys., **98** (2005) 1-9; X. M. Xu, J. Wang, Q. Y. Zhang, Thin Solid Films, **516** (2008) 1025-1028; H. S. Seo, T. Y. Lee, I. Petrov, J. E. Greene, D. Gall, J. Appl. Phys., **97** (2005) 3-7.
- 40 **Shtansky D.V.**, *Testing and Application in: Nanostructured Thin Films and Nanodispersion Strengthened Coatings*, NATO Series, A. A. Acad. Publ., 2004, pp. 155-166.
- 41 **Yao S.H., Y.L. Su, W.H. Kao, K.W. Cheng**, Mater. Lett, **59** (2005) 3230-3233; K.-T. Rie, J. Wohle, Surf. Coat. Technol., **112** (1999) 226-229.
- 42 **Tavares C. J., L. Rebouta, B. Almeida**, Thin Solid Films, **317** (1998) 124-128; C. J. Tavares, L. Rebouta, B. Almeida, J. Bessa e Sousa, Surf. Coat. Technol., **100-101** (1998) 65-71; A. Rizzo, M. A. Signore, M. F. De Riccardis, Thin Solid Films, **515** (2007) 6665-6671; G. Bejarano, J. M. Caicedo, P. Prieto, A. G. Balogh, S. Enders, Thin Solid Films, **494** (2005) 53-57; K. E. Andersson, M. Wahlstrom, A. Roos, Thin Solid Films, **214** (1992) 213-218.
- 43 **Gómez M. E., J. Santamaria, S. Kim, Kannan M. Krishnan and Ivan K. Schuller**, Phys. Rev. B, **71** (2005) 125410; J. Santamaria, M. E. Gómez, J. L. Vicent, K. M. Krishnan, and Ivan K. Schuller, Phys. Rev. Lett., **89** (2002) 190601; J. Santamaria, M. E. Gómez, M.-C. Cyrille, C. Leighton, K. M. Krishnan, and Ivan K. Schuller, Phys. Rev. B, **65** (2001) 012412; M. C. Cyrille, S. Kim, M. E. Gómez, J. Santamaria, C. Leighton, Kannan M. Krishnan, and Ivan K. Schuller, Phys. Rev. B, **62** (2000) 15079.
- 44 **Yashar P. C., W. D. Sproul**, Vacuum, **55** (1999) 179-190.
- 45 [http://www.funcoatconsolider.com/en/actividad/ejes\\_fenomenos-superficies.asp](http://www.funcoatconsolider.com/en/actividad/ejes_fenomenos-superficies.asp)
- 46 **Caicedo Angulo J. C.**, *Crecimiento y caracterización de superredes de ZrN/TiN como recubrimiento duro en aceros de producción colombiana*, Trabajo de Grado en Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, 2006.
- 47 **Caicedo J. C., G. Bejarano, M. E. Gómez, P. Prieto, C. Cortéz and J. Muñoz-Saldaña**; Phys. Stat. Sol. (c), **4** (2007) 4127-4133.
- 48 **Villareal M., C. Escobar**, "Crecimiento de multicapas de HfN/VN como recubrimientos anticorrosivos", Trabajo de Grado de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, 2010.
- 49 **Ziese M.**, et al., Phys. Rev. B, **68** (2003) 134444; J. Klein et al., Phys. Rev. B, **66** (2002) 052414.
- 50 **Randles J. E. B.**, Discuss. Faraday Soc., **1** (1947) 11-18.
- 51 **William Harish V. K., C. Barshilia, V. Ezhil Selvi, Kalavati, K. S. Rajam**. Thin Solid Films **514** (2006) 204-211.
- 52 **D.V. Shtansky**, *Multicomponent Nanostructured Thin Films. Deposition, Characterization, Testing and Application*, Eds. A. A. Voevodin, D.V. Shtansky, E. A. Levashov and J. J. Moor 155, Ser. II Math. Phys. Chem., Dodrecht, Springer, **155-165** (2004); S. Surviliene, S. Bellozor, M. Kurtinaitiene, V.A. Safonov, Surf. Coat. Technol., **176** (2004) 193-201.
- 53 **Fenker M., M. Balzer, H. A. Jehn, H. Kappl, J. -J. Lee, K. -H. Lee and H. -S. Park**, Surf. Coat. Technol., **150** (2002) 101-106; H. A. Jehn, Surf. Coat. Technol., **125** (2000) 212-217.

Recibido: junio 27 de 2011.

Aceptado para su publicación: diciembre 15 de 2011.

# EFECTO DE INDUCTORES DE RESISTENCIA EN PLÁNTULAS DE PLÁTANO DOMINICO-HARTÓN (*MUSA BALBISIANA* AAB) CONTRA *MYCOSPHAERELLA* SPP.

Ángela Mogollón Ortiz<sup>1</sup>, Jairo Castaño Zapata<sup>2</sup>

## Resumen

**Mogollón Ortiz, A., J. Castaño Zapata:** Efecto de inductores de resistencia en plántulas de plátano dominico hartón (*Musa balbisiana* AAB) contra *Mycosphaerella* spp. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (137): 463-471, 2011. ISSN 0370-3908.

Se evaluó los inductores de resistencia: ácido salicílico, Acibenzolar-S-metil, ácido 2,6-dicloroisonicotínico, ácido 3-aminobutanoico y Fosfito de potasio, y los fungicidas Propiconazol y Clorotalonil en plántulas de Dominico-Hartón sobre *Mycosphaerella fijiensis* y *M. musicola*. El experimento consistió de ocho tratamientos y 20 repeticiones, en un diseño completamente aleatorizado. Los tratamientos se aplicaron al suelo a los 30, 60 y 75 días después de la siembra. Se evaluó altura de plántulas (cm), índice de severidad (%), grado de evolución de síntomas y tasa de desarrollo (r). Fosfito de potasio fue el mejor inductor porque las plántulas presentaron una altura promedio de 36,6 cm comparada con las del testigo con 29 cm; dos días de retardo en aparición de síntomas; menor tasa de desarrollo de las sigatokas ( $r = 0,04$ ) y valores más bajos de evolución de los síntomas e índice de severidad, que fueron 1,4 y 6,23%, respectivamente, mientras que el testigo registró  $r = 0,05$ , 3,4 y 33,02%, respectivamente. Fosfito de potasio no presentó diferencia significativa con respecto a Propiconazol. A excepción del ácido salicílico y 2,6-dicloroisonicotínico, los otros inductores demostraron que el control de las sigatokas fue producto de la activación de los mecanismos de defensa de las plantas.

**Palabras clave:** musáceas, fosfito de potasio, defensa, fungicidas, hongos, manejo.

## Abstract

It was evaluated the effect of the inductors of resistance: salicylic acid, Acibenzolar-S-methyl, 2, 6-dichloroisonicotinic acid, 3-butanoic acid and potassium phosphite, as well as the fungicides

<sup>1</sup> Magíster en Fitopatología. Programa de Maestría en Fitopatología. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Caldas. Correo electrónico: ammogollon@hotmail.com

<sup>2</sup> Ph.D. Profesor Titular, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Caldas. Correo electrónico: jairo.castano\_z@ucaldas.edu.co

Propiconazole and Clorotalonil in seedlings of Dominico-Hartón against *Mycosphaerella fijiensis* and *M. musicola*. The experiment consisted of eight treatments and twenty replications per treatment in a completely randomized design. The treatments were applied to the soil at 30, 60 and 75 days after sowing. It was evaluated: seedlings height (cm), index of severity (%), grade of evolution of the sigatocas and rate of disease development (r). Potassium phosphite was the best treatment because the seedlings had a height of 36.6 cm compared to the control which recorded 29 cm, two days of symptoms appearance delay, lower rate of disease development ( $r = 0.04$ ) and lower values of grade of evolution of symptoms and severity index, which were 1.4 and 6.23%, respectively, while the control showed  $r = 0.05$ , 3.4 and 33.02%, respectively. Potassium phosphite was not statistically different from Propiconazole. Except the salicylic and 2,6-dicloroisonicotinic acids, the other inductors of resistance demonstrated that the control of the sigatocas, was the result of the activation of the defense mechanisms of the plants.

**Key words:** musaceous, potassium phosphite, defense, fungicides, fungi, management.

## Introducción

Los problemas fitosanitarios causados por hongos generan impacto económico en la producción de plátano y banano a nivel mundial (Marín *et al.*, 2003). *Mycosphaerella fijiensis* Morelet, anamorfo *Paracercospora fijiensis* (Morelet) Deighton, agente causante de la Sigatoka negra y *Mycosphaerella musicola* Leach, anamorfo *Pseudocercospora musae* (Zimm.) Deighton, agente causante de la Sigatoka amarilla, son considerados la principal amenaza en el cultivo del plátano alrededor del mundo, debido a que causan las mayores pérdidas económicas debido a la reducción de la capacidad fotosintética, dando como resultado disminución en el rendimiento del cultivo y calidad del fruto (Arzanlou *et al.*, 2007).

El tratamiento de plantas con inductores de resistencia es una alternativa que se ha venido implementando frente al control de enfermedades en otros patosistemas pero de manera limitada en el cultivo del plátano contra *Mycosphaerella* spp. A este mecanismo se le ha denominado Resistencia Adquirida Sistémica (RSA) y consiste en la expresión de respuestas por parte de la planta luego de la infección por un patógeno o de manera similar por el tratamiento con inductores de resistencia (Sticher *et al.*, 1997). Estas respuestas consisten en el incremento del entrecruzamiento de las microfibrillas de celulosa, incrustadas en una matriz compuesta de pectina y hemicelulosa, dando como resultado el aumento de la lignificación de las paredes celulares (Greenberg, 1997); síntesis de *nov*o de fitoalexinas (Dixon, 2001; Kuc, 1995); síntesis de proteínas relacionadas con patogénesis (PR) (Boller, 1992) y respuesta de hipersensibilidad (Mehrotra & Aggarwal, 2006).

Algunos trabajos han reportado que el Acibenzolar-S-metil (ASM) actúa como inductor de resistencia en plántulas de plátano Dominico-Hartón contra *Mycosphaerella* spp. (Márquez & Castaño-Zapata, 2007; Patiño,

2002). De la misma manera, Lema (2009), considera el Fosfito de potasio como un inductor de resistencia en plantas de Dominico-Hartón contra *M. fijiensis*, sin embargo, en la actualidad no se tienen trabajos publicados con respecto a la efectividad de otras moléculas inductoras de resistencia como los ácidos salicílico (AS), 2,6-dicloroisonicotínico (INA) y 3-aminobutanoico (BABA), aplicados hacia el manejo de las sigatocas amarilla y negra. Por consiguiente, debido a la importancia del cultivo de plátano en Colombia, al alto riesgo de desarrollo de resistencia de los patógenos a las moléculas químicas utilizadas en el control de las enfermedades que causan y a las pérdidas ocasionadas por las sigatocas, esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de los inductores de resistencia mencionados contra *M. fijiensis* y *M. musicola* en plántulas de Dominico-Hartón.

## Materiales y métodos

El experimento se realizó en la granja Montelindo, ubicada en la vereda Santaguada, municipio de Palestina, departamento de Caldas, con una altitud de 1.010 m, temperatura promedio anual de 22,8°C, precipitación anual de 2.100 mm y humedad relativa de 76%. Se utilizaron 160 cormos de plátano cultivariedad Dominico-Hartón y suelo, obtenidos de una plantación de plátano en la misma granja. Con el fin de garantizar la erradicación de nematodos fitoparásitos al momento de la siembra, los cormos fueron sumergidos en una solución de Aldicarb a una concentración de 10 g L<sup>-1</sup> de agua por 60 min. Transcurrido este tiempo, se retiraron de la solución, se dejaron secar y posteriormente se sembraron en bolsas de plástico con capacidad de 5 Kg. Los tratamientos fueron: 1. Ácido salicílico, 5mM, 2. Acibenzolar-S-metil 0,01 mL L<sup>-1</sup>, 3. Ácido 2,6-dicloroisonicotínico, 5 mM, 4. Ácido 3-aminobutanoico, 8 mM, 5. Fosfito de potasio, 27 mL L<sup>-1</sup>, 6. Propiconazol, 0,4 L ha<sup>-1</sup>, 7. Clorotalonil, 2 L ha<sup>-1</sup> y 8. Testigo absoluto. La apli-

cación de los tratamientos fue realizada al suelo, en un volumen de 250 mL de solución por plántula a partir de los 30 días después de la siembra (DDS), momento en que el 100% de los cormos habían brotado, las demás aplicaciones se realizaron a 60 y 75 DDS.

Teniendo en cuenta las variables de respuesta a evaluar se plantearon dos tipos de diseños estadísticos: el primero, consistió en un diseño completamente aleatorizado a una vía para determinar si existían diferencias significativas entre los tratamientos con respecto a la altura de las plántulas; el segundo diseño, fue completamente aleatorizado a dos vías. Se estableció con el fin de determinar el efecto del tratamiento y la edad de las hojas, sobre las variables de respuesta grado de evolución de los síntomas e índice de severidad de las sigatokas.

Altura de plántulas (cm). El registro de altura de las plántulas fue realizado cada 15 días hasta finalizar el experimento, se utilizó una cinta métrica como instrumento de medición.

Evaluación de las sigatokas. Se realizaron dos lecturas por semana una vez apareció el primer síntoma visual de las sigatokas, con el fin de estimar el grado de evolución de los síntomas, empleando la escala de **Aranzazu et al.** (2002) y la severidad de las sigatokas en las hojas dos, tres, cuatro y cinco, utilizando los diagramas estándares de Stover modificados por Gauhl (**Carlier**, 2002).

Tasa de desarrollo ( $r$ ) de las enfermedades. Se tomaron los valores promedio de severidad semanal y se transforma-

ron a proporción. También se tuvo en cuenta la diferencia de días transcurridos desde la primera evaluación y la última (**Castaño-Zapata**, 2002), para lo cual se utilizó la siguiente fórmula:

$$r = \frac{1}{t_1 - t_0} \left( \text{Log}_e \frac{X_1}{1 - X_1} - \text{Log}_e \frac{X_0}{1 - X_0} \right)$$

$t_1$ : Tiempo final de evaluación;  $t_0$ : Tiempo inicial de evaluación;  $X_1$ : Severidad final y  $X_0$ : Severidad inicial.

Para el análisis de los datos generados se usó el programa estadístico Statgraphics centurión XV, realizando el análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey al 5%.

## Resultados y discusión

### Altura de plántulas

Los análisis de varianza indicaron diferencias altamente significativas entre las evaluaciones realizadas a los 50, 64, 77, 91, 105 y 112 días después de la siembra (DDS) ( $P < 0,01$ ) a excepción de la evaluación realizada 35 DDS ( $P = 0,0588$ ). Las principales diferencias se observaron 112 DDS. A partir de la evaluación realizada a los 64 DDS, la mayor altura se registró con la aplicación de los inductores de resistencia, seguido por el valor promedio de las plántulas del testigo, en comparación con Propiconazol, Clorotalonil y el INA que registraron los valores más bajos durante las evaluaciones (Tabla 1). Después de 112 DDS, el Fosfito de potasio se destacó por mostrar mayor altura con 36,6 cm, a

**Tabla 1.** Efecto de inductores de resistencia sobre la altura (cm) de las plántulas de Dominico-Hartón

Tratamientos	Dosis	Días después de siembra						
		35	50	64	77	91	105	112
Fosfito de potasio	27 mL L <sup>-1</sup>	7,7 n.s	17,2 ab*	23,5 a	27,2 a	31,1 a	33,5 a	36,6 a
AS	5 mM	11,6 n.s	20,6 a	24,4 a	26,2 ab	28 a	29,4 ab	31,2 b
BABA	8 mM	11,4 n.s	20,7 a	24,3 a	25,7 ab	27,9 a	28,8 ab	30 b
ASM	0,01 mL L <sup>-1</sup>	10,2 n.s	20 a	23 a	24,6 ab	26,7 ab	28,4 bc	31 b
Testigo absoluto		12,2 n.s	19,5 a	22,2 a	24,1 ab	25,7 ab	27,7 bc	29 bc
Clorotalonil	2L ha <sup>-1</sup>	8,2 n.s	16,1 ab	19,6 a	21,5 b	22,3 b	23,4 cd	24,6 cd
Propiconazol	0,4 L ha <sup>-1</sup>	9,9 n.s	17,2 ab	20 a	20,9 b	21,4 b	22,1 d	23 d
INA	5 mM	8,8 n.s	11,5 b	12,5 b	10,6 c	8,6 c	1,5 e	2,1 e

\* Promedios seguidos por letras diferentes, indican diferencias significativas entre tratamientos, según la prueba de Tukey ( $P < 0,05$ )-n.s. Diferencias no significativas.



diferencia de los demás inductores de resistencia cuyos valores promedio oscilaron entre 30 y 31,2 cm, sin diferencias significativas entre ellos, pero sí con respecto al INA, Propiconazol, Clorotalonil y el testigo con 2,1; 23; 24,6 y 29 cm, respectivamente (Tabla 1).

Las plántulas tratadas con INA presentaron síntomas de fitotoxicidad después de la primera aplicación, manifestada en la reducción del tamaño de las plántulas, deformidad de las hojas y, en muchos casos, muerte de las plántulas. Estos resultados coinciden con los obtenidos por **Friedrich *et al.*** (1996), quienes consideran que el INA es un inductor potente de resistencia, pero genera problemas de fitotoxicidad. Por esta razón, las plántulas tratadas con el INA no fueron tenidas en consideración para las evaluaciones del grado de evolución de los síntomas, índice de severidad y tasa de desarrollo de las sigatocas.

La mayor altura en las plántulas tratadas con Fosfito de potasio se atribuye a que este producto activa el sistema de defensa de las plantas y al mismo tiempo metaboliza el fosfito a fosfato para utilizarlo como nutriente, desempeñando un papel importante en el crecimiento y desarrollo de las plantas (**EDA**, 2008).

#### Grado de evolución de los síntomas e índice de severidad

El análisis de varianza del grado de evolución de síntomas ( $P < 0,01$ ) e índice de severidad de las sigatocas ( $P < 0,01$ )

indicó diferencias altamente significativas entre tratamientos, edad de las hojas ( $P < 0,01$ ) y la interacción tratamientos\*hoja ( $P < 0,01$ ) 112 DDS. Las plántulas tratadas con Fosfito de potasio y Propiconazol redujeron significativamente el tamaño de las lesiones con valores promedio menores de 2 en el grado de evolución de los síntomas (lesiones entre 2 y 3 mm), a diferencia de los demás tratamientos cuyo grado alcanzó valores superiores a 2 (lesiones  $> 3$  mm). De igual manera, los valores promedios más bajos en el índice de severidad de las sigatocas se presentaron para los mismos tratamientos con valores de 6,2 y 10,2%, respectivamente, en comparación con los demás tratamientos cuyos valores oscilaron entre 13 y 33% (Tabla 2).

El tratamiento con Fosfito de potasio presentó los valores más bajos en el grado de evolución de los síntomas e índice de severidad producto de la inducción de resistencia en plántulas de Dominico-Hartón, resultados que coinciden con el reporte de **Orober *et al.*** (2002), quienes en plantas de pepino tratadas con sales de potasio, demostraron un aumento local y sistémico del Ácido salicílico (AS), lo cual está relacionado con la activación de la Resistencia Sistémica Adquirida. **Cohen & Coffey** (1986), atribuyen el modo de acción indirecto de Fosfito de potasio sobre los patógenos por acumulación de fitoalexinas. En trabajos más recientes dirigidos al control de la Sigatoka negra en plátano Dominico-Hartón, **Lema** (2009), demostró que el

**Tabla 2.** Efecto de inductores de resistencia y edad de la hoja sobre el grado de evolución de los síntomas e índice de severidad de las sigatocas amarilla y negra en plántulas de Dominico-Hartón 112 días después de la siembra

Tratamiento	Dosis	Grado de evolución de los síntomas	Índice de severidad (%)
Fosfito de potasio	27 mL L <sup>-1</sup>	1,4 d*	6,23 d*
Propiconazol	0,4 L ha <sup>-1</sup>	1,7 d	10,25 cd
BABA	8 mM	2,4 c	13,65 bcd
ASM	0,01 mL L <sup>-1</sup>	2,5 bc	18,56 bc
Clorotalonil	2 L ha <sup>-1</sup>	3,1 ab	20,63 b
AS	5 mM	3,3 a	31,88 a
Testigo absoluto		3,4 a	33,02 a

Hoja	Grado de evolución de los síntomas	Índice de severidad
2	0,40 d*	0,77 d*
3	1,94 c	7,43 c
4	3,51 b	25,41 b
5	4,48 a	43,08 a

\* Promedios en cada columna seguidos de letras distintas denotan diferencias altamente significativas según la prueba de Tukey al 5%.

tratamiento con Fosfito de potasio (0,7 y 1,0 L ha<sup>-1</sup>) mantuvo los grados de la evolución de los síntomas de la sigatoka entre 0 y 1, en comparación con el testigo que presentó mayor frecuencia de los grados 1, 2 y 3, lo que lleva a considerar este producto como un activador de la inducción de resistencia en plátano para el control de *M. fijiensis*. En contraste con estos reportes, el control de las sigatocas en las plántulas de Dominico-Hartón tratadas con Propiconazol fueron resultado del efecto directo sobre el patógeno como lo demostraron **Mogollón-Ortiz & Castaño-Zapata** (2011, sin publicar) y **Koller** (1992), quien además indica que Propiconazol actúa sobre el hongo por inhibición de la demetilación del C-14 del lanosterol, un precursor del ergosterol de la membrana celular del patógeno.

Por su parte, el BABA y ASM sobresalieron en el grado de evolución de los síntomas después del Fosfito de potasio, con valores de 2,4 y 2,5, respectivamente, los cuales fueron significativamente diferentes de los tratamientos con Clorotalonil (3,1), AS (3,3), y el testigo (3,4) Esta misma tendencia se presentó en el índice de severidad, en donde BABA y ASM presentaron valores de 13,65 y 18,56%, respectivamente, mientras que los valores promedios más altos se presentaron con los tratamientos que incluyeron a Clorotalonil (20,63%), AS (31,88%) y el testigo (33,02%). Resultados similares fueron reportados por **Siegrist et al.** (2000), quienes demostraron que plantas de tabaco asperjadas con 10 mM de BABA presentaron lesiones significativamente más pequeñas después de la inoculación con Tobacco mosaic virus (TMV), reducción atribuida a la activación de la Resistencia Sistémica Adquirida. En otro estudio, plantas de girasol tratadas con BABA desarrollaron pocas pústulas de la roya causada por *Puccinia helianthi* Schwein comparado con el testigo (**Amzalek & Cohen**, 2007).

El efecto de ASM como inductor de resistencia ha sido reportado en diversos trabajos. **Faize et al.** (2004), demostraron que el tratamiento con ASM (100 µg mL<sup>-1</sup>) en peral contra *Venturia nashicola* Tanaka & Yamamoto, redujo la severidad de la roña con respecto al control, con una eficacia de control de 42% tres semanas después de la inoculación y 30% un mes después de la inoculación; la protección proporcionada por ASM en las plantas estuvo relacionada con la producción de proteínas PR, es decir, la activación de la Resistencia Sistémica Adquirida. **Patiño** (2002), indica que ASM es capaz de activar los genes encargados de la inducción de resistencia en el cultivar de banano Gran Enano, altamente susceptible a la Sigatoka negra, observándose que los niveles de defensa de dicho cultivar se asemejan a los de FHIA-23 luego del tratamiento

con ASM. Más recientemente se ha reportado que el tratamiento de semilla de plátano Dominico-Hartón con ASM a una concentración de 0,005 mL L<sup>-1</sup> de agua, mostró un índice de severidad bajo y un tamaño de lesiones inferior a 1 mm de longitud con respecto al testigo, manifestando un efecto fitoactivador de la inducción de Resistencia Sistémica Adquirida contra *Mycosphaerella* spp. (**Márquez & Castaño-Zapata**, 2007).

El tratamiento de plántulas de Dominico-Hartón con BABA y ASM produjo lesiones típicas de la respuesta de hipersensibilidad 35 días después de la primera aplicación de los productos. Las lesiones se caracterizaron por ser pequeñas, oscuras, visibles tanto por la haz como por el envés de la hoja; lo anterior coincide con **Latunde & Lucas** (2001), quienes indican que ASM actúa bloqueando el desarrollo de *Colletotrichum destructivum* O'Gara en plantas de frijol Pinto a través de una respuesta de hipersensibilidad, luego del tratamiento con el inductor. Así mismo, **Siegrist et al.** (2000), reportaron que plantas de tabaco expresaron lesiones foliares macroscópicas y necróticas atribuidas a la respuesta de hipersensibilidad después del tratamiento con BABA, este inductor activó la Resistencia Sistémica Adquirida, similar a cuando ocurre una infección por TMV.

El tratamiento con Fosfito de potasio y ASM causó mayor rigidez en las hojas, lo que coincide con **Márquez & Castaño-Zapata** (2007) en plántulas de Dominico-Hartón tratadas con ASM. **Greenberg** (1997) atribuye a los inductores de resistencia la capacidad de incrementar el entrecruzamiento de los componentes de la pared celular, aumentando la lignificación y formación callosa de la misma, creando una barrera física contra los patógenos. Las plántulas de Dominico-Hartón tratadas con AS no mostraron inducción de resistencia en comparación con las tratadas con ASM y BABA, análogos funcionales del AS; este comportamiento puede ser explicado por la poca solubilidad de los cristales de AS en agua (**Angiolani**, 1960).

El análisis de varianza para el grado de evolución de los síntomas índice de severidad indicó diferencias altamente significativas ( $P < 0,01$ ) con respecto a la posición de la hoja 112 DDS, revelando un incremento sobre dichas variables a medida que aumentó la edad de la hoja. En las plántulas del testigo, los valores promedio para el grado de evolución de los síntomas fueron de 0,40; 1,94; 3,51; 4,48 y para el índice de severidad de 0,77; 7,43; 25,41 y 43,08% para las hojas 2, 3, 4 y 5, respectivamente (Tabla 2).

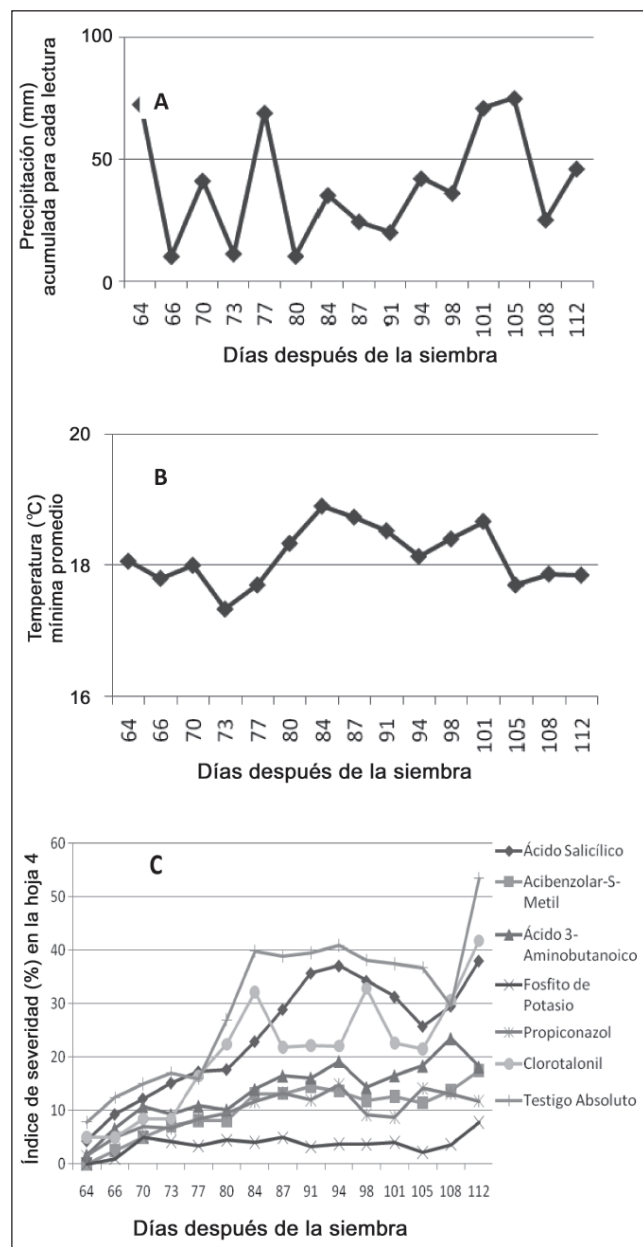
Se realizó un análisis del índice de severidad de las sigatocas en la hoja 4, debido a que el periodo de incubación de *Mycosphaerella* spp., en la cultivariedad Dominico-

Hartón, bajo las condiciones de la granja Montelido, vereda Santaguada, es de aproximadamente 28 días y la emisión de hojas es semanal (Márquez & Castaño-Zapata, 2007). Fosfito de potasio y ASM retrasaron la aparición de los síntomas en la hoja 4 hasta los 66 DDS, mientras que AS, BABA, Propiconazol, Clorotalonil y el testigo absoluto mostraron los primeros síntomas dos días más temprano (Tabla 3). En el testigo absoluto la severidad a los 64 días mostró un valor promedio de 7,8% hasta llegar a 53,4% 112 DDS; mientras que para Fosfito de potasio y ASM los valores promedio para dicha variable a los 66 DDS, fueron de 1 y 2,5 %, respectivamente y al cabo de los 112 DDS de 7,7 y 17,4%, respectivamente (Tabla 3). Resultados similares en relación al retardo de la aparición de los síntomas de la Sigatoka negra en plantas tratadas con Fosfito de potasio fueron reportados por Lema (2009), quien demostró que el tratamiento de plantas de Dominico-Hartón con este producto en dosis de 0,7 y 1 L ha<sup>-1</sup> retarda la aparición de la hoja más joven enferma (hoja 4) comparado con el testigo donde fue la hoja 3. El retardo de la aparición de los síntomas de las sigatokas en plántulas de Dominico-Hartón tratadas con ASM en este estudio coincide con los resultados obtenidos por Márquez & Castaño-Zapata (2007) quienes, a través del tratamiento de semilla de plátano Dominico-Hartón con ASM a concentraciones de 0,03; 0,01 y 0,005 mL L<sup>-1</sup>, retrasaron la aparición de los síntomas 62, 59 y 59 DDS, respectivamente, en comparación con el testigo cuyos síntomas aparecieron a los 45 DDS.

#### Curvas de desarrollo de las sigatokas amarilla y negra y su relación con la temperatura mínima y la precipitación acumulada

Los primeros síntomas de las sigatokas aparecieron en el testigo absoluto, Clorotalonil, AS, Propiconazol y BABA, que coinciden con los valores de precipitación acumulada (73 mm) y temperatura mínima promedio (18°C) en la zona de Santaguada. Desde la aparición de los síntomas hasta el final del experimento los valores de temperatura mínima oscilaron entre 17,7 y 18,6°C, rangos favorables para el desarrollo de *Mycosphaerella* spp. Según Belalcázar *et al.* (1996), temperaturas entre 15,6 y 27°C favorecen el desarrollo de los agentes causantes de las sigatokas. Porras & Pérez (1997) indican que la temperatura mínima requerida para el crecimiento de *M. fijiensis* es de 12°C, óptima de 27°C y máxima de 36°C, mientras que *M. musicola* presenta mejor adaptación a temperaturas menores de 15°C. La precipitación varió entre 10 y 75 mm. Al respecto, Molina & Castaño-Zapata (2003) y Belalcázar *et al.* (1996) indican que al aumentar el volumen de lluvia acumulada semanalmente se favorece el desarrollo de los hongos y con ello la severidad de las sigatokas amarilla y negra.

Los resultados demuestran que las plántulas tratadas con Fosfito de potasio sobresalen con los valores más bajos en el índice de severidad de las sigatokas 112 DDS a pesar de las condiciones favorables para el desarrollo de las sigatokas, destacándose la efectividad de este producto con respecto a los demás tratamientos (Figura 1). Efecto



**Figura 1.** Curvas de desarrollo de las sigatokas amarilla y negra en la hoja 4 y su relación con la precipitación acumulada y la temperatura mínima en la granja Montelido (Oct. 13-nov. 30, 2010) **A.** Precipitación acumulada (mm). **B.** Temperatura promedio mínima (°C). **C.** Índice de severidad en la hoja 4.

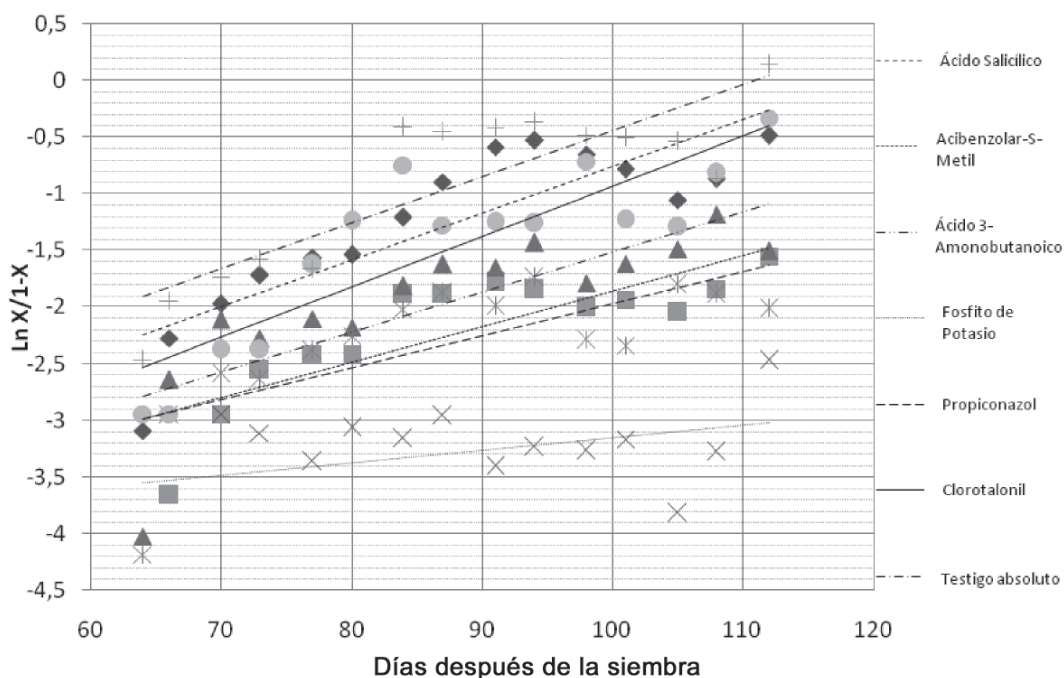
**Tabla 3.** Efecto de inductores de resistencia sobre el tiempo de aparición de los primeros síntomas y evolución de la severidad de las sigatokas en la hoja 4 de plántulas de Dominico-Hartón.

Tratamiento	Dosis	Días después de la siembra														
		64	66	70	73	77	80	84	87	91	94	98	101	105	108	112
AS	5 mM	4,3	9,3	12,2	15,1	17,2	17,1	22,9	28,9	35,7	37,1	34,2	31,3	25,7	29,5	38
ASM	0,01 mL L <sup>-1</sup>	0	2,5	5	7,2	8,0	8,0	13,1	13,1	14,4	13,6	11,8	12,6	11,4	13,7	17,4
BABA	8 mM	1,7	6,6	10,8	9,3	10,8	10,1	14	16,5	16,1	19,2	14,3	16,5	18,4	23,5	18,2
Fosfito de potasio	27 mL L <sup>-1</sup>	0	1	5	4,2	3,3	4,4	4,0	4,9	3,2	3,7	3,6	4,0	2,1	3,6	7,7
Propiconazol	0,4 L ha <sup>-1</sup>	1,5	5	7	6,6	8,4	9,5	11,7	13,2	11,9	14,9	9,2	8,7	14,1	13,1	11,7
Clorotalonil	2L ha <sup>-1</sup>	5	5	8,5	8,5	16,5	22,4	32,1	21,8	22,2	22,0	32,8	22,6	21,5	30,6	41,7
Testigo		7,8	12,4	15	17,	16	27	39,8	38,8	39,5	40,8	38,1	37,5	36,7	29,6	53,4

muy similar al obtenido con Propiconazol, fungicida altamente efectivo contra las sigatokas amarilla y negra.

En la Figura 2 se observa que la velocidad a la que se desarrollaron las sigatokas bajo las condiciones del estudio fue menor en las plántulas tratadas con Fosfito de potasio ( $r = 0,04$ ).

Los resultados obtenidos en la reducción del grado de evolución de los síntomas, índice de severidad y tasa de desarrollo de las sigatokas amarilla y negra, bajo las condiciones favorables para el desarrollo de estas enfermedades en el lugar del experimento y la susceptibilidad del hospedante a los agentes causantes de estas enfermedades, confirman que la aplicación de inductores de resis-



**Figura 2.** Tasas de desarrollo de las sigatokas amarilla y negra en la hoja 4 de acuerdo al tratamiento.

tencia, especialmente de Fosfito de potasio, activan el sistema de defensa de las plantas, con la ventaja sobre los fungicidas sistémicos de no tener riesgo hasta el momento de causar resistencia de los patógenos a los inductores, los cuales pueden considerarse como una estrategia eficaz de manejo de las sigatokas, bajo un enfoque de manejo integrado.

## Conclusiones

La aplicación de inductores de resistencia al suelo en plántulas de Dominico-Hartón, especialmente de Fosfito de potasio, redujo el grado de evolución de los síntomas y el índice de severidad de las sigatokas de manera similar que el fungicida sistémico Propiconazol; sin embargo, el inductor y fungicida actúan sobre sistemas diferentes, el primero activando el sistema de defensa de las plántulas, mientras que el fungicida afectando directamente al patógeno.

Después de Fosfito de potasio y Propiconazol, el tratamiento de plántulas con Ácido 3-aminobutanoico y Acibenzolar-S-metil, sobresalieron en el control de las sigatokas amarilla y negra, presentando mejores resultados en comparación con Clorotalonil y el testigo absoluto, con un riesgo mínimo de desarrollo de resistencia del patógeno a los inductores aplicados.

El Fosfito de potasio se consideró como el mejor tratamiento debido a que las plántulas tratadas con este producto mostraron mayor altura y reducción en el grado de evolución de los síntomas, índice de severidad y tasa de desarrollo de las sigatokas, además fue más notorio el retardo del momento de aparición de los síntomas de las sigatokas amarilla y negra.

## Bibliografía

- Amzalek E. & Y. Cohen. 2007. Comparative efficacy of systemic acquired resistance inducing compounds against rust infection in sunflower plants. *Phytopathology* **97**:179-186.
- Angiolani A. 1960. Introducción a la química industrial. Fundamentos Químicos y Tecnológicos. Editorial Andrés Bello, Santiago de Chile. 697 p.
- Aranzazu F., J. Valencia, M. Arcila, C. Castrillón, M. Bolaños & P. Castellanos. 2002. El cultivo de plátano. Manual técnico. CORPOICA, Manizales, Colombia. 114 p.
- Arzanlou M., E. Abeln, G. Kema, C. Waalwijk, J. Carlier, I. de Vries, M. Guzmán & P. Crous. 2007. Molecular diagnostics for the Sigatoka disease complex of banana. *Phytopathology* **97**:1112-1118.
- Belalcázar S., F. Salazar, J. Valencia, C. Silva, M. Arcila & R. Jaramillo. 1996. Reacción de variedades mejoradas al ataque de la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet). Sigatoka negra y variedades mejoradas de plátano. En: *Boletín de Sanidad Vegetal No. 12*, Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).
- Boller T. 1992. Biochemical analysis of chitinases and  $\beta$ -1,3 glucanases. Practical Methods. pp. 23-30. In: Bowles D., S. Gurr. (eds.). *Molecular Plant Pathology*. Oxford.
- Carlier J., D. de Waele & J. Escalant. 2002. Evaluación global de la resistencia de los bananos al marchitamiento por *Fusarium*, enfermedades de las manchas foliares causadas por *Mycosphaerella* y nematodos. En: Vézina, A., C. Picq. (eds.). Guías técnicas INIBAP 6. Red Internacional para el Mejoramiento del Banano y el Plátano. Montpellier, Francia. 68 p.
- Castaño-Zapata, J. 2002. Principios básicos de fitoepidemiología. 1ª edición. Universidad de Caldas, Manizales, Colombia. 398 p.
- Cohen Y. & M. Coffey. 1986. Systemic fungicides and the control of Oomycetes. *Annual Review of Phytopathology* **24**:311-338.
- Dixon R. 2001. Natural products and plant disease resistance. *Nature* **411**:843-847.
- Entretrenimiento y Desarrollo de Agricultores (EDA). 2008. El uso de ácido salicílico y fosfonatos (fosfitos) para activación del sistema de resistencia adquirida de la planta. En: Boletín Técnico de Producción. Implementado por Fintrac Inc., Fundación Hondureña de Investigación Agrícola y la Escuela Agrícola Panamericana. Honduras, [http://www.mcahonduras.hn/documentos/PublicacionesEDA/Manuales%20de%20produccion/EDA\\_Produccion\\_Uso\\_de\\_Acido\\_Salicilico\\_Y\\_Fosfitos\\_01\\_08.pdf](http://www.mcahonduras.hn/documentos/PublicacionesEDA/Manuales%20de%20produccion/EDA_Produccion_Uso_de_Acido_Salicilico_Y_Fosfitos_01_08.pdf) 3 p.; consultada: enero. 2011.
- Faize M., L. Faize, N. Koike, M. Ishizaka & H. Ishii. 2004. Acibenzolar- S-methyl induced resistance to Japanese pear scab is associated with potentiation of multiple defense responses. *Phytopathology* **94**:604-612.
- Friedrich L., K. Lawton, W. Ruess, P. Masner, N. Specker, M. Gut, B. Mejer, S. Dincher, T. Staub, S. Uknes, J. Métraux, H. Kessmann & J. Ryals. 1996. A benzothiazole derivative induces systemic acquired resistance in tobacco. *The Plant Journal* **10**(1):61-70.
- Greenber J. 1997. Programmed cell death in plant-pathogen interactions. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* **48**:525-545.
- Köller W. 1992. Antifungal agents with target sites in sterol functions and biosynthesis. pp.119-206. In: Köller, W. (ed.). Target Sites of Fungicide Action. CRC Press. Boca Raton, Florida. 328 p.
- Kuc J. 1995. Phytoalexins, stress metabolism, and disease resistance in plants. *Annual Review of Phytopathology* **33**:275-297.
- Latunde A. & J. Lucas. 2001. The plant defense activator Acibenzolar-S-Methyl primes cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] seedlings for rapid induction of resistance. *Physiological and Molecular Plant Pathology* **58**:199-208.
- Lema M. C. 2009. Evaluación del Fosfito de Potasio (Foscrop PK®) como inductor de resistencia en plátano (*Musa AAB*) para el control de Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) en lotes comerciales del departamento del Quindío. Armenia, Colombia. Trabajo de Grado Bióloga. Universidad del Quindío. 72 p.

- Marín D., R. Romero, M. Guzmán & T. Sutton.** 2003. Black Sigatoka: an increasing threat to banana cultivation. *Plant Disease* **87**(3):208-222.
- Márquez L. & J. Castaño-Zapata.** 2007. Inducción de resistencia a sigatoka en plántulas de plátano Dominico-Hartón. *Agronomía* **15**(2):49-57.
- Mehrotra R. & A. Aggarwal.** 2006. *Plant pathology*. Second edition. Tata McGraw-Hill, New Delhi. 847 p.
- Mogollón-Ortiz A. M. & J. Castaño-Zapata.** 2011. Evaluación *in vitro* de inductores de resistencia sobre *Mycosphaerella fijiensis* Morelet. *Revista Facultad Nacional de Agronomía* (En revisión).
- Molina O. & J. Castaño-Zapata.** 2003. Resistencia en los FHIA híbridos a *Mycosphaerella* spp. *Info Musa* **12**(2):25-27.
- Orober M., J. Siegrist & H. Buchenauer.** 2002. Mechanisms of phosphate-induced disease resistance in cucumber. *European Journal of Plant Pathology* **108**:345-353.
- Patiño L. F.** 2002. Efecto de una fuente de energía, tres inductores de resistencia y un sustrato foliar sobre Sigatoka negra en banano. pp. 135-142. En: Acorbat. Memorias XV reunión. Asociación de Bananeros de Colombia AUGURA. Cartagena de Indias.
- Porras A. & L. Pérez.** 1997. The role of temperature in the growth of the germ tubes of ascospores of *Mycosphaerella* spp., responsible for leaf spot diseases of banana. *Info Musa* **6**(2):27-32.
- Siegrist J., M. Orober & H. Buchenauer.** 2000. Beta-aminobutyric acid mediated enhancement of resistance in tobacco to *Tobacco mosaic virus* depends on the accumulation of salicylic acid. *Physiological and Molecular Plant Pathology* **56**:95-106.
- Sticher L., B. Mauch-Mani & J. Mettraux.** 1997. Systemic acquired resistance. *Annual Review of Phytopathology* **35**:235-270.

Recibido: junio 20 de 2011.

Aceptado para su publicación: diciembre 2 de 2011.



# ¿EXISTIÓ VULCANISMO CENOZOICO EN LA SABANA DE BOGOTÁ?

Pedro Patarroyo<sup>1</sup>, Roberto Terraza Melo<sup>2</sup>

## Resumen

**Patarroyo, P., R. Terraza Melo:** ¿Existió vulcanismo cenozoico en la Sabana de Bogotá? Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (137): 473-484, 2011. ISSN 0370-3908.

En la Cordillera Oriental de Colombia se han identificado y descrito diferentes edificios volcánicos sub-recientes, pero teniendo en cuenta la publicación de **Galvis *et al.*** (2006) sobre el vulcanismo cenozoico de la Sabana de Bogotá, que hace referencia a calderas volcánicas, ignimbritas, riolitas, brechas de explosión y de chimenea, lahares y cenizas volcánicas, aquí, en este escrito se pretende dar claridad y hacer precisiones sobre la realidad geológica de la zona, ya que con base en visitas de campo, secciones delgadas, análisis de difracción de rayos X, fósiles, fotografías aéreas y revisión de abundante material bibliográfico se muestra que no hay argumentos para aceptar la existencia del vulcanismo propuesto.

**Palabras clave:** vulcanismo cenozoico, Sabana de Bogotá, Colombia.

## Abstract

Along the Colombian Eastern mountain range different recent volcanic structures have been identified and described. **Galvis *et al.*** (2006), in their paper about the Cenozoic volcanism in the Sabana de Bogotá, report the presence of volcanic calderas, tuffs, rhyolites, lahars, volcanic ash, etc. This paper pretends to give clarity and make precisions about the geologic reality of the area, because based on field trips, thin sections, analysis of X-ray diffraction, fossils, aerial photographs and extensive review of bibliographic material it is shown that there are not arguments to accept the existence of such proposed volcanism.

**Key words:** cenozoic volcanism, Sabana de Bogotá, Colombia.

<sup>1</sup> Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Cra. 30 N. 45-03. Bogotá, Colombia, Correo electrónico: pcpatarroyog@unal.edu.co

<sup>2</sup> Servicio Geológico Colombiano. Dg. 53 No. 34-53, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: rterrazam@ingeo Minas.gov.co

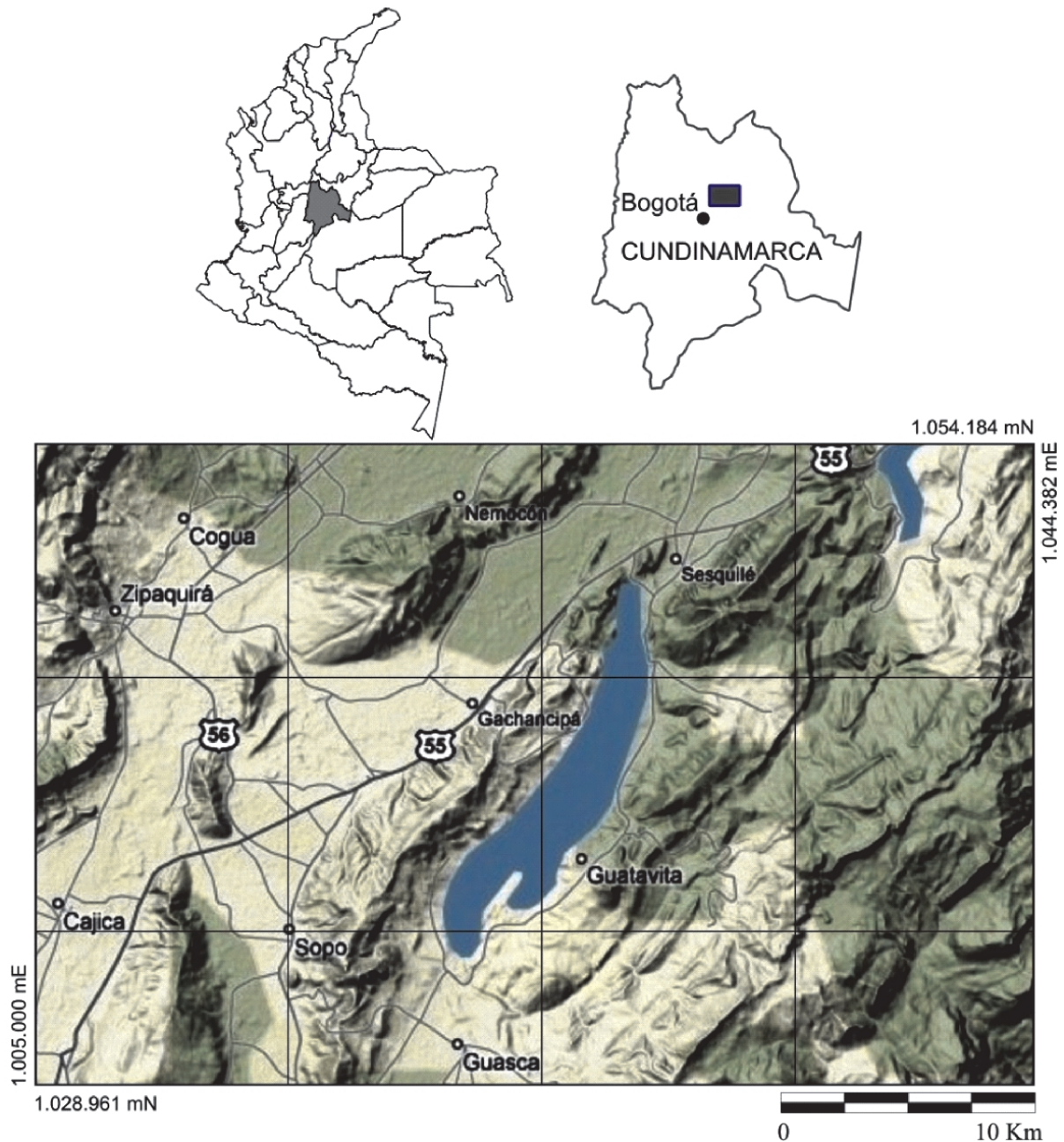


## Introducción

Con base en la publicación de Galvis *et al.* (2006) se introduce una geología novedosa para el altiplano de Cundinamarca en relación con un vulcanismo cenozoico, por lo que se espera claridad y contundencia en los argumentos que demuestren esta nueva propuesta. No obstante, de la lectura de este artículo se deduce que no existen

trabajos geológicos del área mencionada, pues solo se utilizan dos referencias bibliográficas; adicionalmente, las ilustraciones, la geología, las citas geográficas y su localización aparecen vacilantes y ambiguas.

Para el área Nemocón, Gachancipá, Sesquilé, Sopó, Guatavita y Guasca (Fig. 1) se pueden tener dos interpretaciones geológicas: Una que se fundamenta en la reconocida



**Figura 1.** Localización geográfica del área de Nemocón, Gachancipá, Sesquilé, Sopó, Guatavita y Guasca al noreste de la Sabana de Bogotá. En la parte central se localiza el Embalse de Tominé (Tomado y modificado de [www.maps.google.com](http://www.maps.google.com)).

estratigrafía de la Sabana de Bogotá (**Hubach 1957, Van der Hammen 1957**) con base en la cual se elaboró el mapa geológico del cuadrángulo K11-Zipacquirá (**McLaughlin & Arce 1975**), el mapa del Neógeno-Cuaternario de la Sabana de Bogotá y cuenca alta del río Bogotá (**Helmens & Van der Hammen 1995**), y recientemente la plancha 209-Zipacquirá (**Montoya & Reyes 2003**) y el mapa geológico de la Sabana de Bogotá (**Montoya & Reyes 2005**), o la interpretación de **Galvis et al.** (2006) donde se propone un vulcanismo cenozoico sin datos contundentes.

### Antecedentes

De tiempo atrás es conocido que en diferentes sectores de la Cordillera Oriental existen intrusiones básicas subvolcánicas que afectan rocas sedimentarias del Mesozoico (**Fabre & Delaloye 1982, Moreno & Concha 1993, Vásquez et al. 2000, Navarrete et al. 2002, Moreno-Murillo et al. 2004, Vásquez & Altenberger 2005**); y cuerpos volcánicos y registros de actividad volcánica del Cenozoico (**Scheibe 1938, Renzoni 1983, Ulloa et al. 1973, Hernández & Osorio 1990, Ujueta 1991, Romero & Rincón 1992, Ujueta et al. 1992, Ulloa et al. 2001, Velandia 2003, Pardo 2004, Pardo et al. 2005a,b, Jaramillo et al. 2005, Schonwalder 2007**). Además, dentro de la estratigrafía de la Sabana de Bogotá (**Dueñas 1986, Helmens 1988, 1990, Andriessen et al. 1993, Helmens & Van der Hammen 1994, 1995, Helmens et al. 1997, Toro et al. 2003, Espitia & Hormaza 2004**) se cuenta con niveles volcánicos cuya proveniencia no ha sido reconocida y que se podrían interpretar como procedentes de los volcanes de la Cordillera Central.

La dinámica de los edificios volcánicos de la Cordillera Central demuestra que sus materiales pueden distribuirse por amplias zonas de Colombia y países vecinos, tal como lo indica **Eslava (1985, 1993)**. De igual manera **Jaramillo et al. (2005)** hacen referencia a la mezcla de materiales volcánicos de las cordilleras Central y Oriental en depósitos volcánicos sub-recientes del altiplano, lo cual demanda un trabajo estratigráfico apoyado en geoquímica y dataciones radiométricas para determinar las áreas fuente de los materiales. Sobre la carretera central del norte, en el sector de Tierra Negra cercano a Ventaquemada (Boyacá), **Jaramillo et al. (op. cit.)** en depósitos sub-recientes, relacionan 10 ciclos con presencia de vidrio volcánico de tobas y con base en análisis geoquímicos determinan similitud con el material del sector de Olitas en Paipa. Afirman que este material volcánico efusivo, sub-reciente, se encuentra distribuido sobre el altiplano Cundi-boyacense principalmente entre Tunja y Paipa, desde luego que en algunos sitios hay clara presencia y acumulaciones de cenizas

volcánicas entre 20 y 40 m de espesor, mientras que en otros sectores no existe registro ya sea por condiciones topográficas o por erosión. Así que no tendría nada de extraño la presencia de este tipo de material en regiones de Cundinamarca pero con espesores muy delgados y con una posible fuente en los focos volcánicos de Iza o Paipa (Boyacá).

### Argumentación

**Galvis et al. (2006, p. 496)** indican que “*El Cretáceo tardío está representado por espesos depósitos de areniscas, los cuales parecen evidenciar un proceso regresivo, con intercalaciones de porcelanitas (las cuales recibieron la curiosa denominación de Plaeners), en las cuales se presentan niveles de un claro carácter tobáceo, intercaladas con sedimentos silíceos de origen biogénico, los cuales parecen haberse originado en un ambiente costero lagunar con abundante sílice en solución, de origen volcánico. No se conocen las fuentes del material tobáceo. El primer autor que insinuó la presencia volcánica en los Plaeners fue Bürgl (1959). La secuencia litológica anterior se ha denominado Formación Guadalupe.*” Con esta cita se induce al lector, sin ninguna evidencia, a creer que las porcelanitas, liditas o lodolitas silicificadas del Cretácico de la Formación Plaeners del Grupo Guadalupe (ver **Pérez & Salazar, 1978**) tienen origen o influencia volcánica. Por otro lado se descontextualiza a **Bürgl (1959)** que simplemente hace mención a “liditas de origen volcánico” (**Bürgl op. cit.**, p. 98) cuando se refiere a las facies y clasificaciones litológicas de los sedimentos cretáceos de la Cordillera Oriental sin precisar ninguna unidad litológica en particular; evidentemente tampoco se puede negar la existencia de niveles de origen volcánico intercalados en la secuencia cretácea, de hecho **Villamil (1998, p. 167)** y **Villamil & Arango (1998, p. 143)** reportan la presencia de varias capas centimétricas y milimétricas de ceniza volcánica o bentonitas preservadas en depósitos del límite Cenomaniano-Turoniano y que se utilizaron para correlacionar secciones, no obstante, estos autores consideran que estas cenizas debieron haber sido transportadas por largas distancias, por vía oceánica y atmosférica, antes de ser depositadas. Adicionalmente, **Villamil et al. (1999)** plantean la hipótesis de la gran influencia de las corrientes de surgencia durante el Cretácico para explicar la silicificación en conjunto con la ocurrencia de fosforitas, asociación que es común en diferentes unidades litoestratigráficas de Colombia y Venezuela, lo cual no necesariamente tiene relación con fuentes volcánicas. Más adelante el artículo de **Galvis et al. (2006, p. 501)** menciona “*Por otra parte, en varias localidades las ignimbritas*

han sido confundidas con los Plaeners”, lo cual es una conclusión errónea sin ningún sustento ni argumentación.

**Galvis et al.** (*op. cit.* p. 501) en el capítulo “Posibles dimensiones del vulcanismo cenozoico en la Sabana” afirman “Como se mencionaba anteriormente, la Formación Bogotá corresponde a depósitos piroclásticos, argilizados o no. La Formación Tilatá equivale a lahares y flujos de detritos derivados de las piroclastitas.” En otra parte del texto citan (**Galvis et al.** *op. cit.*, p. 496) “A los sedimentos mencionados les sobre-yace lo que se ha denominado Formación Bogotá, la cual, debido a la ausencia de fósiles ha sido datada de manera indirecta, deduciendo su edad por correlación con las formaciones subyacentes. Su descripción litológica varía dependiendo de las localidades que han estudiado los diferentes autores, los cuales coinciden en describirla como un material rojizo, de grano más grueso en su base y más arcilloso en su parte superior. La Formación Tilatá, que la suprayace, ha sido considerada como la última fase en el relleno o aporte de detritos hacia el altiplano de la Sabana. La identificación del vulcanismo reciente permite entender que estas dos formaciones corresponden a depósitos piroclásticos y sus derivados, temas que se discuten en el presente artículo.” Y más adelante (**Galvis et al.** *op. cit.*, p. 499) citan “f. Lahares se encuentran al sur de la quebrada La Viuda, en el flanco oriental de la serranía de Fetibré, y en inmediaciones de la población de Sesquilé, donde aparecen identificados en la cartografía geológica publicada como Formación Tilatá. En algunos sectores, en especial en las brechas, se encuentran escorias.”, y así de esta manera nuevamente se induce a los lectores a creer en vulcanismo del cenozoico sin ningún sustento sólido. En Sesquilé diferentes autores como **McLaughlin & Arce** (1975), **Helmens** (1990), **Helmens & Van der Hammen** (1995), **Espitia & Hormaza** (2004) y **Montoya & Reyes** (2005) reconocen material sedimentario de la Formación Tilatá y nunca lahares. Con trabajo de campo y análisis serios como la difracción de rayos X, **Quinche** (2005) encuentra una serie de minerales como cuarzo, feldespato, caolinita, esmectita, clorita e illita en muestras de la Formación Bogotá, del mismo modo **Espitia & Hormaza** (2004) también refieren la presencia de esmectita y de fragmentos volcánicos a partir de la petrografía de muestras de la Formación Tilatá. La presencia de esmectita y de fragmentos volcánicos dentro de sucesiones sedimentarias no es un argumento para indicar la cercanía o lejanía de fuentes volcánicas, ya que se puede estar frente a material re trabajado o redepositado.

**Galvis et al.** (2006, p. 501, 502) en el aparte de conclusiones indican “Durante el Cenozoico tardío, en el ambi-

to geográfico de la Sabana de Bogotá, tuvo lugar un evento magmático de notables dimensiones, con actividad efusiva profusa. Tiene notables similitudes con el episodio volcánico identificado en el centro de Boyacá, tanto en las características de la actividad efusiva, como en su composición petrográfica. Todo parece indicar que el área de influencia en la Sabana es mayor y alcanzó a extenderse al valle de Ubaté.” y “El presente artículo no pretende agotar el tema; solamente está indicando la necesidad de una revisión de los estudios geológicos de la Sabana de Bogotá y con esto conocer las implicaciones de la actividad magmática en relación con los suelos, su interacción con los diapiros salinos de la Sabana, y en especial la mutua interacción química y la influencia del magmatismo en la calidad de los carbones del Altiplano Cundi-boyacense. También abre la posibilidad de hallazgos de mineralizaciones hidrotermales en la Sabana de Bogotá.”, con esto nuevamente los autores sacan deducciones que no fueron discutidas dentro del texto en ninguno de los apartes.

### Excursión

Dada la expectativa que genera la publicación de **Galvis et al.** (2006), la Sociedad Colombiana de Geología y la Sociedad Colombiana de Geotecnia organizaron el día 23 de septiembre de 2007 una excursión a algunos lugares señalados por **Galvis et al.** (*op. cit.*), en los cuales se debía encontrar la evidencia del vulcanismo.

En unas rocas asignadas a ignimbritas por **Galvis et al.** (*op. cit.*) al NE de Gachancipá se colectaron foraminíferos bentónicos (tipo *Siphogenerinoides*), moldes de bivalvos y restos de peces en lodolitas silicificadas de origen claramente sedimentario (Fig. 2 y 3). Para **McLaughlin & Arce** (1975), **Helmens** (1990), **Helmens & Van der Hammen** (1995) y **Montoya & Reyes** (2005), en este sector afloran rocas sedimentarias de lo que estos autores denominan Formación o Grupo Guadalupe. Allí se encuentran lodolitas muy alteradas en posición subhorizontal de origen marino, que hacen parte del Anticlinal Sopó-Sesquilé (ver **McLaughlin & Arce** 1975, **Montoya & Reyes** 2005) y que corresponden a parte del Grupo Guadalupe (Fig. 4).

Entre Sopó y Guasca por la vereda El Chuscal, bordeando los cerros Las Águilas, Santuario y de Montenegro, en una primera estación, se visitó una posible caldera volcánica, en donde encontramos intercalaciones de lodolitas con bivalvos y arenitas sin influencia térmica volcánica, en posición subvertical, que según **McLaughlin & Arce** (1975) hacen parte del Anticlinal Sopó-Sesquilé, estructura desarrollada sobre rocas sedimentarias del Grupo



**Figura 2.** Rocas sedimentarias finogranulares del Grupo Guadalupe (izquierda) con restos de peces-opérculos (derecha) correspondientes a lodolitas silicificadas altamente meteorizadas, asignadas erróneamente por Galvis *et al.* (2006) como ignimbritas (N: 1.042.748, E: 1.023.879, Elevación: 2.654 m.s.n.m.).



**Figura 3.** Lodolitas silicificadas de origen marino del Grupo Guadalupe, muy meteorizadas, en posición subhorizontal, que hacen parte del Anticlinal Sopó-Sesquilé, y que según Galvis *et al.* (2006) corresponden a ignimbritas. A la derecha bivalvos incluidos dentro de estos depósitos. Escala gráfica = 1 cm. (N: 1.042.748, E: 1.023.879, Elevación: 2.654 m.s.n.m.).



**Figura 4.** Lodolitas silicificadas de origen marino del Grupo Guadalupe que hacen parte del flanco occidental del Anticlinal Sopó-Sesquilé. Según Galvis *et al.* (2006) corresponden a ignimbritas (N: 1.043.560, E: 1.023.561, Elevación: 2.634 m.s.n.m.).

Guadalupe (Fig. 5 y 6). Más adelante en el recorrido, se reconocieron rocas sedimentarias de grano grueso y fino de la Formación Cacho con estructuras sedimentarias tipo estratificación cruzada en capas con forma lenticular. Para esta área al W de Guasca, hay que hacer mención de la existencia de pliegues y fallas como lo muestran **Espitia & Hormaza** (2004) y **Montoya & Reyes** (2005).

Desde la intersección de la vía Guasca- Guatavita, sitio Cuatroesquinas y hacia el occidente se observó una posible caldera volcánica, geoforma que a lo lejos deja ver planos de estratificación. Desde este mismo punto y hacia el NE se visualizó un cerro con forma cónica que a la distancia bien podría representar un edificio volcánico, pero esta geoforma se genera por el contraste entre

capas sedimentarias finogranulares de la Formación Guaduas y capas sedimentarias de granulometría gruesa de la Formación Cacho (ver **McLaughlin & Arce** 1975 y **Montoya & Reyes** 2005), y que de acuerdo con el mapa geológico esquemático de **Galvis et al.** (2006, p. 499) se trata del cerro Santa Bárbara del Chocho, en donde deberían aparecer lahares.

Abajo del actual pueblo de Guatavita, al occidente, en dirección del embarcadero, se encontraron intercalaciones de lodolitas (muy meteorizadas por lo cual toman coloración rojiza) y arenitas con estratificación cruzada de la Formación Cacho (unidad inequívocamente de origen sedimentario fluvial) que en este sector conforman el flanco oriental del Sinclinal de Sesquilé, en donde se nos indicó



**Figura 5.** Moldes de bivalvos (izquierda) encontrados en lodolitas y arenitas intercaladas del Grupo Guadalupe (derecha) de origen inequívocamente sedimentario, en posición subvertical, que hacen parte del Anticlinal Sopó-Sesquilé. Según **Galvis et al.** (2006) estas rocas hacen parte de una caldera volcánica (N: 1.043.560, E: 1.023.561, Elevación: 2.733 m.s.n.m.). Escala gráfica = 1 cm.



**Figura 6.** Estructuras biogénicas (bioperturbación) encontradas sobre una superficie de estratificación en rocas sedimentarias del Grupo Guadalupe. Según **Galvis et al.** (2006) estas rocas hacen parte de una caldera volcánica (N: 1.043.560, E: 1.023.561, Elevación: 2.733 m.s.n.m.).

la presencia de un inexistente dique de riolita (Fig. 7), y que al respecto **Galvis et al.** (2006, p. 501) citan lo siguiente: “Al observar la zona entre la población de Guatavita y el embarcadero en el embalse, se pueden ver las areniscas que cierran la estructura anular por el NW, y allí se presenta un dique riolítico de pocos metros de espesor, cortando las areniscas (Fotografía 14), lo que confirma la actividad ígnea reciente de toda la zona.”; la fotografía 14 del artículo (**Galvis op. cit.**, p. 500) se describe como: “Dique riolítico cortando areniscas en el borde occidental de la caldera de Guatavita, entre la población y el embarcadero.” Para este lugar se debe indicar que afloran capas gruesas de arenitas con intercalaciones de lodolitas; en las arenitas se alcanzan a reconocer costras de oxida-

ción relacionadas con rocas sedimentarias acumuladas en ambientes continentales fluviales y estratificación cruzada de escala decimétrica (Fig. 8). Claramente, lo que se asume como un dique (ver Fig. 7), es una capa de lodolita con disposición concordante con los estratos de arenita, que presentan estratificación cruzada (ver Fig. 8).

En Guatavita debíamos observar una caldera volcánica, cuya estructura anular es mencionada en el texto de **Galvis et al.** (2006). En la excursión no se nos mostró, pero en las fotografías aéreas del sector no se reconoce dicha estructura y mucho menos en la cartografía geológica de **McLaughlin & Arce** (1975) y **Montoya & Reyes** (2005) ni en los mapas geológicos de **Helmens** (1990) y **Helmens &**



**Figura 7.** Capas de arenitas con un estrato de lodolita intercalada, muy meteorizada, de coloración rojiza, perteneciente a la Formación Cacho; la capa de lodolita es asignada erróneamente por **Galvis et al.** (2006) como un dique de riolita. Vista subparalela (izquierda) y perpendicular (derecha) al rumbo de los estratos (N: 1.037.833, E: 1.026.660, Elevación: 2.659 m.s.n.m.).



**Figura 8.** Arenitas con ondulitas al techo y costras de oxidación (izquierda) y estratificación cruzada de escala decimétrica (derecha) pertenecientes a la Formación Cacho (N: 1.037.823, E: 1.026.650, Elevación: 2.658 m.s.n.m.). En este sitio **Galvis et al.** (2006) describe un dique riolítico de pocos metros de espesor que corta a las arenitas.

**Van der Hammen** (1995) obtenidos a partir de un trabajo detallado.

**Galvis et al.** (2006, p. 501) indican lo siguiente: “*Concretamente se puede indicar la presencia de uno o más focos efusivos en la zona comprendida entre Tausa, el extremo norte del embalse del Neusa y la vereda El Hato del municipio de Carmen de Carupa, área donde se observan extensos depósitos ignimbríticos; más aún, las arcillas de Checua parecen haberse originado en depósitos de cenizas y lapilli provenientes de dichos focos. Es posible suponer otro foco volcánico en inmediaciones de Sopó, como lo sugieren las ignimbritas allí presentes (Fotografía 15). Toda la región al norte del embalse del Sisga presenta suelos volcánicos, y en la cuenca superior del río Bogotá, municipios de Chocontá y Villapinzón, la cubierta volcánica es prácticamente total. Hay indicios de otros focos volcánicos en varios sitios de la Sabana de Bogotá, tales como Mondoñedo, Bojacá, Tabio, Usme (en el sector del Cerro de Juan Rey), El Rosal, etc. y la cubierta tobácea de los valles es casi omnipresente en todos los valles que forman el conjunto geográfico de la Sabana. A lo anterior cabe agregar, la presencia de varias fuentes de aguas termales en localidades tales como Sesquilé, Chocontá, Guasca, Guatavita, Tabio etc.*”; nuevamente **Galvis et al.** (2006) inducen a los lectores a reconocer postulados sin sustento, no solo en el área de trabajo, además involucran zonas lejanas. La presencia de manantiales con aguas termales, bien puede estar asociado a sistemas de falla y no necesariamente a cuerpos volcánicos. Se aspira a que esta publicación no caiga en manos de sensacionalistas, que terminen ratificando que el cerro de Monserrate de Bogotá es un volcán.

### Secciones delgadas

En las fotografías 6 a 9 de **Galvis et al.** (2006, p. 498) se ilustran secciones delgadas en las que se menciona la existencia de sanidina, cuarzo con bahías, cuarzo bipiramidal, vidrio volcánico y microlitos de plagioclasa. Desafortunadamente las ilustraciones no son muy claras, por lo que no se pueden reconocer los minerales citados. Un cuarzo bipiramidal ofrece una clara definición que no es nada evidente en la fotografía 7. El vidrio volcánico bien puede corresponder al denominado “chert” producto de la silicificación común en la Formación Plaeners del Grupo Guadalupe.

Con el objeto de verificar en los sitios visitados los materiales volcánicos se realizaron algunos análisis petrográficos de sección delgada los cuales contundentemente muestran que el material es de origen sedimentario

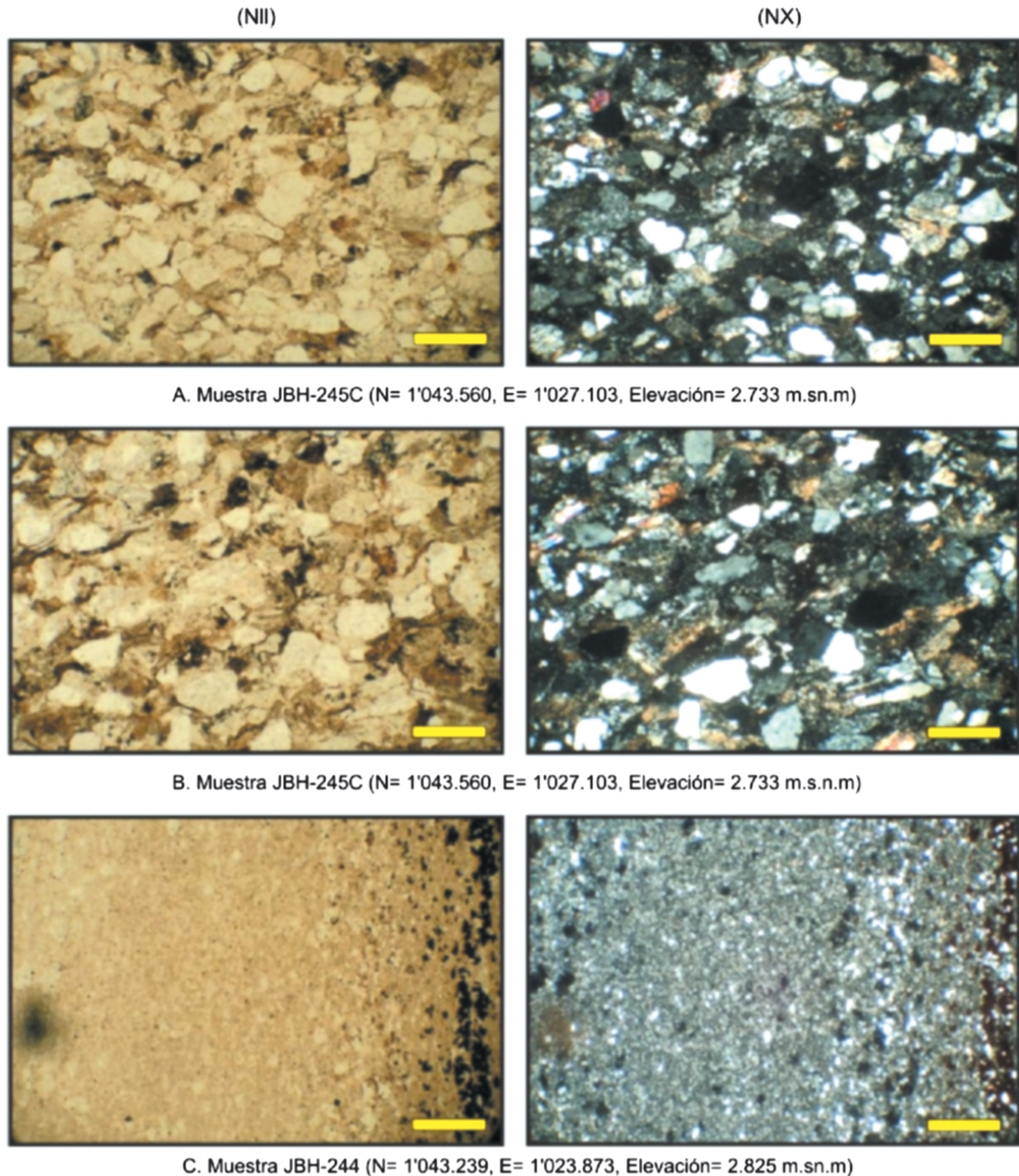
(Fig. 9); adicionalmente, se enviaron muestras para análisis mineralógicos por difracción de rayos X (Tabla 1) llegándose a la misma conclusión, es decir, “que el material seguramente se trata de rocas sedimentarias, dado el alto contenido de cuarzo de tamaño muy pequeño y la alta presencia de caolinita bien cristalizada, lo cual permite suponer que los minerales han tenido transporte y concentración” (concepto del geólogo Jaime Mojica de INGEO-MINAS, sede Cali, quién realizó los análisis de DRX sin saber su sitio de procedencia).

### Fotos aéreas

Con todos los argumentos expresados se puede desvirtuar la propuesta de existencia de vulcanismo cenozoico y de edificios volcánicos en Gachancipá y Guasca, pero para tener mayor seguridad, se consultaron algunas líneas de vuelo del IGAC para descartar la existencia de estructuras anulares como las que se citan para el casco urbano de Guatavita.

De los vuelos S-649 (fotos 819 a 821) a escala 1:25.000 del 9 de enero de 1941, S-22194 (fotos 432 a 434) a escala 1:20.000 del 21 de febrero de 1963 y S-32732 (fotos 103 a 105) a escala 1:31.200 del 25 de enero de 1985, se observaron tomas anteriores y posteriores al establecimiento del pueblo Guatavita nuevo, con el fin de obviar el enmascaramiento de la estructura anular propuesta. Se diferenciaron tres unidades, la primera al E da un fuerte contraste a la morfología y que según la cartografía existente corresponde a rocas del Grupo Guadalupe, la segunda ofrece una morfología suave al paisaje y que se asigna a la Formación Guaduas, sobre la que se ubica el pueblo actual, y la tercera, hacia el W, es una unidad más competente que la anterior y que se asigna a la Formación Cacho. Estas unidades conforman el flanco oriental del Sinclinal de Sesquilé. Asumiendo que fuese cierto que el pueblo de Guatavita nuevo fue edificado sobre un cuello volcánico, significaría que los moradores de Guatavita están signados por la mala suerte, ya que primero fueron desplazados y llevados al nuevo sitio por la construcción de la represa de Tominé y ahora ubicados sobre un edificio volcánico.

En el vuelo S-34905 (fotos 165 y 166) a escala 1:27.400 del 21 de diciembre de 1988 que muestra la parte oriental de Gachancipá se observan planos estructurales de rocas sedimentarias que pertenecen al Grupo Guadalupe. Además a lo largo de los cerros que se ubican al E de Tocancipá y Gachancipá se localizan canteras sobre rocas sedimentarias del Cretácico superior de las cuales se obtienen materiales para la construcción, que por ninguna parte evidencian la existencia de rocas o depósitos volcánicos.



**Figura 9.** A y B. Muestra de litoarenita lodosa de la Formación Cacho, de grano muy fino y de fragmentos de rocas sedimentarias. C. Muestra de arcillolita limosa de la Formación Plaeners, de cuarzo y con láminas de óxidos de hierro. (NII) = Nícoles paralelos, (NX) = nícolas cruzados, Escala gráfica = 0,2 mm. En las figuras A y B se identificó en el armazón de la roca (compuesto por granos de origen sedimentario) los siguientes minerales: Cuarzo monocristalino (34.0%) y policristalino (3,6%), micas blancas posiblemente muscovita (2,3%), opacos de óxidos de hierro y pirita (3,3%), líticos metamórficos (2,0%), líticos volcánicos (4,6%) y líticos sedimentarios (27,6%); 19,3% corresponde a matriz representada por minerales arcillosos y el restante 3,3% a porosidad primaria. En la Figura C la roca sedimentaria está constituida por minerales arcillosos que conforman el armazón (71,1%), óxidos de hierro (7,6%), mica blanca muscovita (3,4%) y porosidad móldica secundaria (3,6%) por disolución de algunos óxidos de hierro.



Tabla 1. Análisis cualitativo de minerales por DRX en muestras desorientadas.

Muestra	Unidad Litoestratigráfica	Coordenadas Planas de Gauss (origen Bogotá)			Minerales de Archilla					Silicatos					Otros	
					Esmectita	Iilita/ Esmectita	Caolinita	Iilita	Clorita	Cuarzo	Feldespatos (ND)	Hematita	Goethita	Anatasa	Rutilo	Materia Orgánica
		Norte	Este	Elevación (m.s.n.m)												
JHB-244	PLAENERS	1'043.239	1'023.873	2.825	0	0	++++	++	0	++++	0	0	0	*	0	0
JHB-248	CACHO	1'037.833	1'026.660	2.659	0	*?	++++	++	0	++++	0	+	+	*	*	0
RCV	PLAENERS	1'043.006	1'023.807	2.836	0	*?	++++	+	0	+++	0	0	0	*	0	0

++++ (Abundante > 40%), +++ (Común= 20-40%), ++ (Pobre= 10-20%), + (Escaso= 3-10%), \* (Trazas= < 3%), ? (Dudoso), ND (No determinado), 0 (Nada)

## Conclusiones

Las crónicas en geología se deben basar en datos documentales y no en supuestos o creencias.

Las publicaciones científicas se fundamentan sobre argumentos y datos sólidos, que defienden los postulados.

En ánimo de discusión, se podría decir que las rocas sedimentarias del Cretácico y del Cenozoico fueron afectadas por diques y por los conductos volcánicos que permitieron la salida del material volcánico y que por esta circunstancia se encuentra mezcla de ambos materiales. En tal sentido, no sería raro hallar rocas con fósiles marinos junto con material volcánico, pero inmediatamente surge la pregunta: ¿En dónde está la superficie de contacto entre estos dos materiales, las superficies de corte y la roca volcánica?. Esta relación estratigráfica es evidente entre las rocas volcánicas de Iza (Boyacá) y las rocas sedimentarias del Grupo Guadalupe (Cretácico superior) y de la Formación Guaduas (Maastrichtiano-Paleoceno).

No se puede descartar que en la Sabana de Bogotá o en el altiplano Cundiboyacense puedan existir otros centros volcánicos o eventos ígneos como los de Paipa e Iza (Boyacá) o Quetame (Cundinamarca) que representan actividad del Cenozoico, pero hay que demostrarlo con argumentos sólidos y serios.

## Agradecimientos

Nuestros más sinceros agradecimientos a las directivas de la Sociedad Colombiana de Geología y de la Sociedad Colombiana de Geotecnia por la invitación al día de campo, a partir del cual, junto con varios colegas, se

demonstró lo que ya sabíamos de tiempo atrás sobre la geología de esta región de Cundinamarca. Nuestra gratitud con el profesor Manuel Moreno por el suministro de algunas de las fotografías. Del mismo modo agradecemos los constructivos comentarios al manuscrito por parte de los revisores anónimos.

## Bibliografía

- Andriessen, P., Helmens, K., Hooghiemstra, H., Riezebos, P. & Van der Hammen, T. 1993. Absolute chronology of the Pliocene-Quaternary sediment sequence of Bogota area, Colombia. *Quaternary Science Reviews* 12(7):483-501.
- Bürgl, H. 1959. Sedimentación Cíclica en el Geosinclinal Cretáceo de la Cordillera Oriental de Colombia. Servicio Geológico Nacional, Boletín Geológico VII(1-3):85-118, 9 fig., Bogotá.
- Contreras-Fayad, A. 2008. Caracterización mineralógica de las rocas que componen el cuerpo volcánico que aflora en cercanías al municipio de Iza, Boyacá, Colombia. Petrografía, Metalografía y Análisis fundamental por medio de un microscopio electrónico de barrido. Universidad Nacional de Colombia. Trabajo de grado (inédito) 37 p.
- Dueñas, H. 1986. Registro palinológico de las tres últimas épocas glaciales en la Sabana de Bogotá, Cordillera Oriental, Andes colombianos. *Geología Colombiana* (15):48-54.
- Eslava, J. 1985. Consideraciones sobre los aspectos meteorológicos y efectos relacionados con la dispersión de fragmentos y gases emitidos por el volcán Arenas del Nevado del Ruiz el 13 de noviembre de 1985. *Geología Colombiana* (14):639-654.
- \_\_\_\_\_. 1993. Cambios atmosféricos temporales en Colombia asociados a la erupción del Ruiz del 13 de noviembre de 1985. *Memorias VI Congreso Colombiano de Geología-Medellín* (II):639-654.
- Fabre, A. & Delaloye, M. 1982. Intrusiones básicas cretácicas en las sedimentitas de la parte central de la Cordillera Oriental. *Geología Norandina* 6:19-28.

- Galvis, J., De La Espriella, R. & Cortés, R.** 2006. Vulcanismo Cenozoico en la Sabana de Bogotá. *Revista Acad. Colombiana de Ciencias Exactas, Física y Naturales* **30**(117):495-502.
- Helmens, K.** 1990. Neogene-Quaternary Geology of the High Plain of Bogota, Eastern Cordillera, Colombia. *Dissertations Botanicae* 163.
- \_\_\_\_\_, **Barendregt, R., Enkin, R., Baker, J. & Andriessen, P.** 1997. Magnetic Polarity and Fission-Track Chronology of a Late Pliocene–Pleistocene Paleoclimatic Proxy Record in the Tropical Andes. *Quaternary Research* **48**(1):15-28.
- \_\_\_\_\_, **Van der Hammen, T.** 1994. The Pliocene and Quaternary of the high plain of Bogotá (Colombia): A history of tectonic uplift, basin development and climatic changes. *Quaternary International* **21**:41-61.
- \_\_\_\_\_. 1995. Memoria explicativa de los mapas del Neógeno y Cuaternario de la Sabana de Bogotá-cuenca alta del río Bogotá. IGAG. *Análisis Geográficos* **24**:91-142.
- Hubach, E.** 1957. Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores. Servicio Geológico Nacional. *Bol. Geol.* **5**(2):93-112.
- Hernández, G. & Osorio, O.** 1990. Geología, análisis petrográfico y químico de las rocas volcánicas del suroccidente de Paipa (Boyacá-Colombia). Trabajo de grado (inédito), Universidad Nacional de Colombia, 100 p.
- Jaramillo, J. M., Rojas, P. & Garver, J.** 2005. Neogene's Volcanism in the Cordillera Oriental of the Andes, Colombia. *Earth Sciences Research Journal* **9**(1):19-28.
- McLaughlin, D. & Arce, M.** 1975. Mapa Geológico del Cuadrángulo K-11 Zipaquirá. INGEOMINAS.
- Montoya, D. & Reyes, G.** 2003. Mapa geológico de la Plancha 209-Zipaquirá. Escala 1:100.000. INGEOMINAS, Bogotá.
- \_\_\_\_\_. 2003. Geología de la Plancha 209-Zipaquirá. INGEOMINAS, Bogotá.
- \_\_\_\_\_. 2005. Mapa geológico de la Sabana de Bogotá. Escala 1:100.000. INGEOMINAS, Bogotá.
- \_\_\_\_\_. 2005. Geología de la Sabana de Bogotá. Publicaciones Especiales del INGEOMINAS **28**:1-103.
- Moreno-Alfonso, S. C.** 2007. Caracterización geoquímica en circones de los cuerpos intrusivos de Paipa e Iza y dos depósitos piroclásticos, Departamento de Boyacá. Universidad Nacional de Colombia. Trabajo de Grado No. 761 (inédito), 14 p.
- Moreno, M. & Concha, A.** 1993. Nuevas manifestaciones ígneas básicas en el flanco occidental de la Cordillera Oriental, Colombia. *Geología Colombiana* **18**:143-150.
- Moreno-Murillo, J.M., Concha-Perdomo, A.E., Tenjo-Gil, N.C. & Patarroyo, P.** 2004. Caracterización Geoquímica y Petrográfica del "Gabro de La Corona", Municipio de la Victoria, Boyacá - Colombia. *Geología Colombiana* **29**:109-126.
- Navarrete, A., Moreno, M., Concha, A. & Patarroyo, P.** 2002. Interpretación petrográfica del Gabro de Tragarepas al norte de Pacho, Cundinamarca, Colombia. *Geología Colombiana* **27**:109-120.
- Pardo, N.** 2004. Estratigrafía de las vulcanitas asociadas al volcán de Paipa, municipios de Paipa y Tuta, Departamento de Boyacá, Colombia. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, 190 p.
- \_\_\_\_\_, **Cepeda, H. & Jaramillo, J. M.** 2005a. The Paipa Volcano, Eastern Cordillera of Colombia, South America: Volcanic stratigraphy. *Earth Sciences Research Journal* **9**(1):3-18.
- \_\_\_\_\_, **Jaramillo, J. M. & Cepeda, H.** 2005b. The Paipa Volcano, Eastern Cordillera of Colombia, South America (Part II): Petrography and Major Elements Petrography. *Earth Sciences Research Journal* **9**(2):148-164.
- Renzone, G.** 1983. Geología del Cuadrángulo J-12, Tunja. *Boletín Geológico* **24**(2):31-48.
- Rojas-Linero, P.** 2005. Cronología de los depósitos volcánicos del área de Tierra Negra, Boyacá, por medio de huellas de fisión en circones. Universidad Nacional de Colombia. Trabajo de grado N. (inédito), 24 p.
- Romero, F & Rincón, M.** 1992. Características petrográficas y químicas de las rocas volcánicas de Iza (Departamento de Boyacá, Colombia). *Geología Colombiana* (17):159-168.
- Scheibe, R.** 1938. Estudios geológicos y paleontológicos sobre la Cordillera Oriental de Colombia. Ministerio de Industrias y Petróleos, 80 p., Bogotá.
- Schonwalder, D.** 2007. Caracterización geoquímica y petrográfica de un depósito volcánico asociado al Volcán de Iza, Boyacá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Trabajo de grado N. 678 (inédito), 23 p.
- Toro, G., Poupeau, G., van der Hammen, T., Gaviria, S. & Dueñas, E.** 2003. Datación por trazas de fisión de circones provenientes de las Formaciones Tilata y Marichuela (Sabana de Bogotá). En: Colombia Paisajes Fisiográficos de la Orinoquia-Amazonia (Oram), Colombia Instituto Geográfico Agustín Codazzi **26**:49-58.
- Ujueta, G.** 1991. Tectónica y actividad ígnea en la Cordillera Oriental de Colombia (Sector Girardot-Cúcuta). En Simposio sobre Magmatismo Andino y su Marco Tectónico, memorias Tomo I, 151-192.
- \_\_\_\_\_, **Macia, C. & Romero, F.** 1992. Cuerpo Riodacítico del Terciario Superior en la Región de Quetame, Cundinamarca. *Geología Colombiana* (17):143-150.
- Ulloa, C., Rodríguez, E. & Escobar, R.** 1973. Mapa Geológico Plancha 192-Laguna de Tota. INGEOMINAS, Bogotá.
- \_\_\_\_\_, **Fúquen, J. & Acosta, J.** 2001. Geología de la Plancha 192-Laguna de Tota. INGEOMINAS, Bogotá.
- Van der Hammen, T.** 1957. Estratigrafía palinológica de la Sabana de Bogotá, Cordillera Oriental de Colombia., *Boletín de Geología* **5**(2):189-203.
- Vásquez, M. & Altenberger, U.** 2005. Mid-Cretaceous extension-related magmatism in the eastern Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences* **20**(3):193-210.
- \_\_\_\_\_, **Concha, A., Moreno, M. & Patarroyo, P.** 2000. Caracterización geoquímica y petrográfica de los cuerpos intrusivos básicos, aflorantes en la región de Cáceres y Puerto Romero, departamentos de Cundinamarca y Boyacá, Colombia. *Geología Colombiana* **25**:185-198.

- Velandia, F.** 2003. Cartografía geológica y estructural sector sur del municipio de Paipa (Mapa geológico Escala 1:25.000). Informe Técnico, Proyecto Geodinámica. INGEOMINAS, 36 p.
- Villamil, T.** 1999. Chronology, relative sea-level history and a new sequence stratigraphic model for basinal Cretaceous facies of Colombia. En: J.L. Pindell & Ch. Drake (Editores) Paleogeographic evolution and nonglacial eustasy, Northern South America, SEPM Special Publication N. 58 161-216.
- \_\_\_\_\_ & **Arango, C.** 1998. Integrated stratigraphy of latest Cenomanian and early Turonian facies of Colombia. SEPM Special Publication No. 58 161-216.
- \_\_\_\_\_ & **Hay, W.** 1999. Plate tectonic paleoceanographic hypothesis for Cretaceous source rocks and cherts of northern

South America. En: Barrera, E. & Johnson, C. (Editores). Evolution of the Cretaceous Ocean-Climate System. Geological Society of America, Special Paper **332**:191-202.

Páginas web

[http://maps.google.com/maps?client=firefox-a&rls=org.mozilla:es-ES:official&channel=s&hl=es&q=Mapa+Cundinamarca&um=1&ie=UTF8&split=0&gl=co&ei=1pM1Suy4OcGHtgfdumC8CQ&sa=X&oi=geocode\\_result&ct=image&resnum=1](http://maps.google.com/maps?client=firefox-a&rls=org.mozilla:es-ES:official&channel=s&hl=es&q=Mapa+Cundinamarca&um=1&ie=UTF8&split=0&gl=co&ei=1pM1Suy4OcGHtgfdumC8CQ&sa=X&oi=geocode_result&ct=image&resnum=1)

Recibido: abril 18 de 2011.

Aceptado para su publicación: diciembre 2 de 2011.

# DESCOMPOSICIÓN MÍNIMA DE UN AUTOMORFISMO

A. R. Moyano, R. M. Rubio<sup>1</sup>

## Resumen

**Moyano, A. R., R. M. Rubio:** Descomposición mínima de un automorfismo. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (137): 485-490, 2011. ISSN 0370-3908.

Es bien conocido que todo automorfismo unimodular de un espacio vectorial puede descomponerse como un producto de transvecciones. En este trabajo depuramos la cantidad mínima de transvecciones que permiten tal descomposición.

**Palabras clave:** espacio vectorial, automorfismo, transvección.

## Abstract

It is well-known that every unimodular automorphism of a vector space can be expressed as a product of transvections. In this work, we deal with the necessary minimal number of transvections for to give this product.

**Key words:** vector space, automorphism, transvection.

## 1. Introducción

Todo automorfismo de un espacio vectorial  $V$  de dimensión finita  $n \geq 2$  puede descomponerse en una cantidad finita de homologías automorfismos con un hiperplano de vectores dobles). Si su determinante es igual a  $\mu$ , se

descompone en una deformación de razón  $\mu$ , seguida de una transformación unimodular (automorfismo de determinante unidad) (ver [1]). En lo que sigue trataremos un método geométrico que nos permitirá establecer la cantidad mínima de transvecciones necesaria en la descomposición de todo automorfismo unimodular.

<sup>1</sup> Departamento de Matemáticas, Campus de Rabanales, Universidad de Córdoba, 14071 Córdoba, Spain. Correos electrónicos: malrimoa@uco.es, rmrubio@uco.es.

AMS Classification 2010: 15A04, 15A21.

Para las definiciones básicas de los conceptos que aparecen en este trabajo se puede consultar la referencia [1].

## 2. Descomposición de un automorfismo

**Proposición 2.1.** *Sea  $f$  un automorfismo con determinante  $\mu$ . Entonces,  $f$  se descompone en una transformación unimodular seguida de un deslizamiento oblicuo de razón  $\mu$ .*

*Demostración.* Sea  $g = k \circ f$ , donde  $k$  es un deslizamiento de razón  $\mu^{-1}$  y sea  $h = k^{-1}$ . Entonces,  $f = h \circ g$ , donde  $g$  es unimodular porque  $\det(g) = \det(k) \det(f) = \mu^{-1} \mu = 1$ , mientras que  $h$  es un deslizamiento de razón  $(\mu^{-1})^{-1} = \mu$ . Si  $\mu = 1$ , directamente  $f$  es unimodular. En general, la descomposición de  $f$  se reduce a la descomposición de automorfismos unimodulares. Éstos, lo harán en deslizamientos de razón 1, es decir, en transvecciones.  $\square$

## 3. Composición de transvecciones

**Proposición 3.1.** *Sea  $\mathbf{V}$  de dimensión  $n \geq 2$ . Sea  $f$  una transformación unimodular descompuesta en  $m$  transvecciones. Si  $\mathbf{D}$  es el subespacio de vectores fijos de  $f$ , se cumple que  $\dim(\mathbf{D}) \geq n - m$ .*

*Demostración.* Supongamos que  $f = t_m \circ \dots \circ t_2 \circ t_1$ , donde cada  $t_j$ , con ecuación  $t_j(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + \tau_j(\mathbf{x})\mathbf{d}_j$  es una transvección. Entonces,  $\text{Ker}(t_j - I) = \text{Ker} \tau_j$ , y se tiene

$$\bigcap_{j=1}^m \text{Ker} \tau_j = \bigcap_{j=1}^m \text{Ker}(t_j - I) \subseteq \text{Ker}(f - I) = \mathbf{D}.$$

Ahora bien, siendo  $r = \text{rang}\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m\}$ , sabemos que  $\dim(\bigcap_{j=1}^m \text{Ker} \tau_j) = n - r$ , y, puesto que  $r \leq m$ , concluimos que  $n - m \leq n - r \leq \dim(\mathbf{D})$ .  $\square$

Obsérvese que esta fórmula tiene dos lecturas:

a) Si el dato es  $m$ , da el número  $n - m$  como valor mínimo para la dimensión de  $\mathbf{D}$ . Por ejemplo, al componer  $n - 1$  transvecciones, sale una transformación que tiene al menos una recta de vectores fijos.

b) Pero, si  $\dim(\mathbf{D})$  es conocida, nos dice que  $n - \dim(\mathbf{D})$  es la cantidad mínima de transvecciones necesarias para poder descomponer  $f$ .

Por ejemplo, si  $f$  carece de vectores dobles no nulos, harán falta al menos  $n$  transvecciones. Este es el caso de las homotecias unimodulares de razón  $\lambda \neq 1$ . Para ellas, podemos matizar más aún:

**Proposición 3.2.** *Una homotecia unimodular no idéntica se descompone como mínimo en  $n + 1$  transvecciones.*

*Demostración.* Como  $f$  carece de vectores dobles no nulos, se descompone como mínimo en  $n$  transvecciones. Supongamos ahora que  $f = t_n \circ t_{n-1} \circ \dots \circ t_2 \circ t_1$  donde cada  $t_j$  es una transvección. Puesto que el subespacio de vectores dobles de  $t_{n-1} \circ \dots \circ t_2 \circ t_1$  es al menos unidimensional, siempre podemos tomar un vector  $\mathbf{u} \neq \mathbf{0}$  en él. Cumplirá que  $f(\mathbf{u}) = t_n((t_{n-1} \circ \dots \circ t_2 \circ t_1)(\mathbf{u})) = t_n(\mathbf{u}) = \mathbf{u} + \tau_n(\mathbf{u})\mathbf{d}_n$ .

Si  $f$  fuese una homotecia de razón  $\lambda \neq 1$ , se tendría

$$\begin{aligned} \omega \mathbf{u} &= \mathbf{u} + \tau_n(\mathbf{u})\mathbf{d}_n \Rightarrow \\ \mathbf{u} &= \frac{\tau_n(\mathbf{u})}{\lambda - 1} \mathbf{d}_n \Rightarrow \mathbf{u} \in \langle \mathbf{d}_n \rangle \\ &\Rightarrow \tau_n(\mathbf{u}) = 0 \Rightarrow \mathbf{u} = \mathbf{0}, \end{aligned}$$

lo que contradice la elección de  $\mathbf{u}$ . Por tanto, es imposible que  $f$  se descomponga en  $n$  transvecciones, siendo precisas al menos  $n + 1$ .  $\square$

## 4. Descomposición en dimensión 2

**Proposición 4.1.** *Si  $f$  es una transformación de determinante 1 en un plano vectorial  $\mathbf{V}$ ,  $f$  se descompone a lo sumo en dos transvecciones salvo que  $f$  sea una homotecia de razón  $\lambda \neq 1$ , en cuyo caso hacen falta tres.*

*Demostración.* Sea  $\mathbf{D} = \text{Ker}(f - I)$  el subespacio de vectores dobles. Según su dimensión, se presentan tres posibilidades:

- a)  $\dim(\mathbf{D}) = 2$ . En este caso,  $f = I$ , que siempre se descompone en dos transvecciones: una arbitraria y su inversa.
- b)  $\dim(\mathbf{D}) = 1$ . Como  $\mathbf{D}$  es un hiperplano, la propia  $f$  es ya una transvección.
- c)  $\dim(\mathbf{D}) = 0$ . Distingamos aquí dos opciones:
  - 1)  $f$  no es una homotecia. Entonces, existe al menos una recta que no es  $f$ -invariante, es decir, existe al menos un vector  $\mathbf{u} \neq \mathbf{0}$  tal que  $\mathbf{u}$  y  $\mathbf{v} = f(\mathbf{u})$  son linealmente independientes. Al formar una base de  $\mathbf{V}$ , podemos determinar una forma lineal  $\sigma$  tal que  $\sigma(\mathbf{u}) = \sigma(\mathbf{v}) = 1$ , y con ella construir la transvección  $s(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + \sigma(\mathbf{x})(\mathbf{u} - \mathbf{v})$ , en la cual  $s(\mathbf{v}) = \mathbf{u} \Rightarrow (s \circ f)(\mathbf{u}) = \mathbf{u}$ . De aquí se concluye que la recta  $\langle \mathbf{u} \rangle$  es de vectores dobles para la transformación  $t_1 = s \circ f$ ,

con lo que  $t_1$  es una transvección. Siendo, finalmente,  $t_2 = s^{-1}$ , queda  $f = t_2 \circ t_1$ , es decir,  $f$  se descompone en dos transvecciones.

- 2)  $f$  es una homotecia (no idéntica). Tratándose de un plano vectorial, la única opción que queda es la de  $f = -I \Leftrightarrow f(x, y) = (-x, -y)$ . Siendo  $s$  la transvección  $s(x, y) = (x, y) + y(1, 0) = (x + y, y)$ , se cumple que  $(s \circ f)(x, y) = (-x - y, -y)$  es un transformación unimodular no homotética, donde por ejemplo

$$(0, 1) \mapsto (-1, -1),$$

que no es proporcional a  $(0, 1)$ . Por otro lado, el sistema de vectores dobles es

$$x = -x - y, y = -y \Leftrightarrow x = y = 0.$$

Aplicando el caso anterior, existen dos transvecciones  $t_1, t_2$  tales que  $s \circ f = t_2 \circ t_1$ . Poniendo  $t_3 = s^{-1}$ , quedará finalmente  $f = t_3 \circ t_2 \circ t_1$ . Que esta transformación no puede obtenerse con dos transvecciones se sigue de la proposición 3.2.  $\square$

Después de este resultado, en lo sucesivo, supondremos que  $n \geq 3$ .

### 5. Teorema de Dieudonné

**Proposición 5.1.** *Sea  $\mathbf{V}$  de dimensión  $n \geq 3$ . Sea  $f$  un automorfismo no homotético. Se afirma que existen dos vectores  $\mathbf{u}$  y  $\mathbf{w}$  tales que  $\mathbf{u}, \mathbf{v} = f(\mathbf{u}), \mathbf{w}$ , son linealmente independientes y, además,  $f(\mathbf{w}) \notin \langle \mathbf{v}, \mathbf{w} \rangle$ .*

*Demostración.* Por ser no homotético, existe al menos un  $\mathbf{u} \neq \mathbf{0}$  tal que  $f(\mathbf{u}) \notin \langle \mathbf{u} \rangle$ . Tomando  $\mathbf{v} = f(\mathbf{u})$ , la pareja  $\mathbf{u}, \mathbf{v}$  será libre. Puesto que  $\dim(\mathbf{V}) \geq 3$ , siempre existirán vectores  $\mathbf{x}$  fuera de  $\langle \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle$ . En el caso en que  $f(\mathbf{x}) \notin \langle \mathbf{v}, \mathbf{x} \rangle$ , tomamos  $\mathbf{w} = \mathbf{x}$  y el lema queda demostrado. Por el contrario, si  $f(\mathbf{x}) = a\mathbf{v} + b\mathbf{x} \in \langle \mathbf{v}, \mathbf{x} \rangle$ , tomamos  $\mathbf{w} = \mathbf{u} + \mathbf{x}$ , que sigue siendo independiente con  $\mathbf{u}$  y  $\mathbf{v}$ , y para el cual se cumple

$$f(\mathbf{w}) = f(\mathbf{u}) + f(\mathbf{x}) = \mathbf{v} + a\mathbf{v} + b\mathbf{x} = -b\mathbf{u} + (1+a)\mathbf{v} + b\mathbf{w}.$$

Si  $b = 0$ , tendremos que

$$f(\mathbf{w}) = (1+a)\mathbf{v} = (1+a)f(\mathbf{u}) \Rightarrow \mathbf{w} = (1+a)\mathbf{u} = \mathbf{u} + \mathbf{x} \Rightarrow \mathbf{x} = a\mathbf{u},$$

lo que contradice la elección de  $\mathbf{x}$ . Siendo, pues,  $b \neq 0$ , es claro que  $f(\mathbf{w}) \notin \langle \mathbf{v}, \mathbf{w} \rangle$ .  $\square$

**Proposición 5.2.** *Sea  $\mathbf{V}$  de dimensión  $n \geq 3$ . Sea  $f$  un automorfismo unimodular no homotético. Entonces,  $f$  se descompone en otro automorfismo unimodular no homotético  $g$ , con al menos una recta de vectores dobles, seguido de una trasvección  $t$ .*

*Demostración.* Tomando dos vectores  $\mathbf{u}, \mathbf{w}$  como los del teorema anterior, por ser independientes  $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$ , puede determinarse una forma  $\tau$  tal que  $\tau(\mathbf{u}) = \tau(\mathbf{v}) = 1, \tau(\mathbf{w}) = 0$  y con ella construir la transvección  $t$  de ley  $t(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + \tau(\mathbf{x})(\mathbf{u} - \mathbf{v})$ , la cual cumple  $t(\mathbf{v}) = \mathbf{u}, t(\mathbf{w}) = \mathbf{w}$ . Entonces,  $g = t \circ f$  vuelve a ser unimodular y tiene una recta de vectores dobles porque  $g(\mathbf{u}) = \mathbf{u}$ . Además, no puede ser  $g(\mathbf{w}) = \lambda\mathbf{w}$ , pues entonces

$$\begin{aligned} f(\mathbf{w}) &= t^{-1}(g(\mathbf{w})) = t^{-1}(\lambda\mathbf{w}) \\ &= \lambda t^{-1}(\mathbf{w}) = \lambda\mathbf{w} \in \langle \mathbf{w} \rangle \subseteq \langle \mathbf{v}, \mathbf{w} \rangle \end{aligned}$$

contradice la elección de  $\mathbf{w}$ . Por tanto,  $g$  no es una homotecia.  $\square$

**Proposición 5.3.** *Con las hipótesis del resultado previo se concluye que los vectores  $\mathbf{u}, \mathbf{w}$  y  $g(\mathbf{w})$  son independientes.*

*Demostración.* Como  $\mathbf{u}$  y  $\mathbf{w}$  lo son, basta ver que  $g(\mathbf{w})$  no es combinación lineal de estos vectores. En efecto,

$$\begin{aligned} g(\mathbf{w}) = a\mathbf{u} + b\mathbf{w} &\Rightarrow f(\mathbf{w}) = t^{-1}(g(\mathbf{w})) \\ &= at^{-1}(\mathbf{u}) + bt^{-1}(\mathbf{w}) = a\mathbf{v} + b\mathbf{w} \in \langle \mathbf{v}, \mathbf{w} \rangle, \end{aligned}$$

en contra de la elección de  $\mathbf{w}$ .  $\square$

**Proposición 5.4.** *Sea  $\mathbf{V}$  de dimensión  $n \geq 3$ . Si  $f$  es una transformación unimodular no homotética de  $\mathbf{V}$ , siempre es posible descomponerla en una cantidad de transvecciones igual a  $n$ .*

*Demostración.* Tomando tres vectores independientes  $\mathbf{u}_1, \mathbf{v}_1, \mathbf{u}_2$  tales que

$\mathbf{v}_1 = f(\mathbf{u}_1), f(\mathbf{u}_2) \notin \langle \mathbf{v}_1, \mathbf{u}_2 \rangle$ , construimos una transvección  $t_1$  y un automorfismo unimodular no homotético  $f_1$  de manera que  $f = t_1 \circ f_1, f_1(\mathbf{u}_1) = \mathbf{u}_1$ . Abrimos dos alternativas:

- a) Si  $n - 1 = 2(n = 3)$ , determinamos una forma  $\tau_2$  tal que  $\tau_2(\mathbf{u}_1) = 0, \tau_2(\mathbf{u}_2) = \tau_2(f_1(\mathbf{u}_2)) = 1$ , y construimos la transvección  $t_2(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + \tau_2(\mathbf{x})(\mathbf{u}_2 - f_1(\mathbf{u}_2))$  en la cual se cumple que  $t_2(\mathbf{u}_1) = \mathbf{u}_1, t_2(f_1(\mathbf{u}_2)) = \mathbf{u}_2$ . A continuación, consideramos  $f_2 = t_2 \circ f_1 = t_2 \circ t_1 \circ f$ , y se observa

que  $f_2(\mathbf{u}_1) = \mathbf{u}_1, f_2(\mathbf{u}_2) = \mathbf{u}_2$ . De aquí se sigue que el plano  $\langle \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2 \rangle$  es de vectores dobles para  $f_2$ , luego  $f_2$  es una transvección. Así,  $f$  se despeja como composición de tres transvecciones y el teorema queda probado.

b)  $n - 1 \geq 3$ . Tomemos, ahora, un complemento  $\mathbf{V}_1$  de la recta  $\langle \mathbf{u}_1 \rangle$ , que incluya a los vectores  $\mathbf{u}_2$  y  $\mathbf{v}_2 = f_1(\mathbf{u}_2)$ . Como en la proposición 5.1, en  $\mathbf{V}_1$  hay un vector  $\mathbf{u}_3$  tal que  $\mathbf{u}_2, \mathbf{v}_2, \mathbf{u}_3$  sean independientes y, además,  $f_1(\mathbf{u}_3) \notin \langle \mathbf{v}_2, \mathbf{u}_3 \rangle$ . Determinamos, entonces, una forma  $\tau_2$  tal que  $\tau_2(\mathbf{u}_1) = \tau_2(\mathbf{u}_3) = 0, \tau_2(\mathbf{u}_2) = \tau_2(\mathbf{v}_2) = 1$ , y con ella la transvección  $t_2(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + \tau_2(\mathbf{x})(\mathbf{u}_2 - \mathbf{v}_2)$  y el nuevo automorfismo  $f_2 = t_2 \circ f_1$ , en el cual  $f_2(\mathbf{u}_1) = \mathbf{u}_1, f_2(\mathbf{u}_2) = \mathbf{u}_2$ . Como en la proposición 06,  $f_2$  no es homotético, pues al menos  $\mathbf{u}_3$  es independiente de su imagen. En efecto, si fuese  $f_2(\mathbf{u}_3) = \lambda \mathbf{u}_3$ , se tendría

$$\begin{aligned} f_1(\mathbf{u}_3) &= t_2^{-1}(f_2(\mathbf{u}_3)) = t_2^{-1}(\lambda \mathbf{u}_3) \\ &= \lambda t_2^{-1}(\mathbf{u}_3) = \lambda \mathbf{u}_3 \in \langle \mathbf{u}_3 \rangle \\ &\subseteq \langle \mathbf{v}_2, \mathbf{u}_3 \rangle, \end{aligned}$$

lo que contradice la elección de  $\mathbf{u}_3$ . Además, como en la proposición 5.3, los vectores  $\mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3$  y  $f_2(\mathbf{u}_3)$  son independientes: como  $\mathbf{u}_2$  y  $\mathbf{u}_3$  lo son, basta ver que  $f_2(\mathbf{u}_3)$  no es combinación lineal de estos vectores. En efecto,

$$\begin{aligned} f_2(\mathbf{u}_3) &= a_2 \mathbf{u}_2 + a_3 \mathbf{u}_3 \\ \Rightarrow f_1(\mathbf{u}_3) &= t_2^{-1}(f_2(\mathbf{u}_3)) \\ &= t_2^{-1}(a_2 \mathbf{u}_2 + a_3 \mathbf{u}_3) \\ &= a_2 t_2^{-1}(\mathbf{u}_2) + a_3 t_2^{-1}(\mathbf{u}_3) \\ &= a_2 \mathbf{v}_2 + a_3 \mathbf{u}_3 \in \langle \mathbf{v}_2, \mathbf{u}_3 \rangle, \end{aligned}$$

en contra de la elección de  $\mathbf{u}_3$ . Abrimos de nuevo dos alternativas:

i) Si  $n - 2 = 2(n = 4)$ , determinamos una forma  $\sigma_3$  tal que  $\sigma_3(\mathbf{u}_1) = \sigma_3(\mathbf{u}_2) = 0, \sigma_3(\mathbf{u}_3) = \sigma_3(f_2(\mathbf{u}_3)) = 1$  y construimos la transvección  $t_3(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + \sigma_3(\mathbf{x})(\mathbf{u}_3 - f_2(\mathbf{u}_3))$  en la cual se cumple  $t_3(\mathbf{u}_1) = \mathbf{u}_1, t_3(\mathbf{u}_2) = \mathbf{u}_2, t_3(f_2(\mathbf{u}_3)) = \mathbf{u}_3$ . A continuación, consideramos  $f_3 = t_3 \circ f_2 = t_3 \circ t_2 \circ f_1 = t_3 \circ t_2 \circ t_1 \circ f$ , y se observa que  $f_3(\mathbf{u}_1) = \mathbf{u}_1, f_3(\mathbf{u}_2) = \mathbf{u}_2, f_3(\mathbf{u}_3) = \mathbf{u}_3$ . De aquí se sigue que el subespacio  $\langle \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3 \rangle$  es de vectores dobles para  $f_3$ , luego  $f_3$  es una transvección. Así,  $f$  se despeja como composición de cuatro transvecciones y el teorema queda probado.

ii) Si  $n - 2 \geq 3$ , tomamos un complemento  $\mathbf{V}_2$  del plano  $\langle \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2 \rangle$  que incluya a los vectores  $\mathbf{u}_3$  y  $\mathbf{v}_3 = f_2(\mathbf{u}_3)$  y reiteramos el procedimiento. Esto es: se busca  $\mathbf{u}_4 \in \mathbf{V}_2$  tal que  $\mathbf{u}_3, \mathbf{v}_3, \mathbf{u}_4$  sean independientes y, además,  $f_2(\mathbf{u}_4) \notin \langle \mathbf{v}_3, \mathbf{u}_4 \rangle$ ; se construye una forma  $\tau_3$  tal que  $\tau_3(\mathbf{u}_1) = \tau_3(\mathbf{u}_2) = \tau_3(\mathbf{u}_4) = 0, \tau_3(\mathbf{u}_3) = \tau_2(\mathbf{v}_3) = 1$ , y las transformaciones  $t_3(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + \tau_3(\mathbf{x})(\mathbf{u}_3 - \mathbf{v}_3), f_3(\mathbf{x}) = t_3 \circ f_2$ , resultando que  $f_3$  es unimodular no homotética con el espacio tridimensional  $\langle \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3 \rangle$  de vectores dobles, etcétera, etcétera.

Se comprende que en  $n$  pasos, la proposición concluye. □

Este resultado puede mejorarse en el sentido de descomponer, según cada caso,  $f$  en menos de  $n$  transvecciones. Hay un caso en que no:

**Proposición 5.5.** *Sea  $\mathbf{V}$  de dimensión  $n \geq 3$ . Una transformación unimodular  $f$  no homotética y carente de vectores dobles, se descompone en  $n$  transvecciones y no es posible descomponerla en menos.*

*Demostración.* Es consecuencia directa de las proposiciones 5.4 y 3.1. □

**Proposición 5.6.** *Una homotecia  $f = \lambda I$ , con  $\lambda \neq 1$ , se descompone en  $n + 1$  transvecciones y no es posible descomponerla en menos.*

*Demostración.* Considerando la transvección  $s(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + x_n \mathbf{e}_{n-1}$ , sea  $g = s \circ f$ . Entonces,  $g$  sigue siendo unimodular. Además,

$$\begin{aligned} g(\mathbf{x}) &= (s \circ f)(\mathbf{x}) = s(f(\mathbf{x})) = s(\lambda \mathbf{x}) \\ &= \lambda s(\mathbf{x}) = \lambda(\mathbf{x} + x_n \mathbf{e}_{n-1}), \end{aligned}$$

$$g(\mathbf{e}_i) = \lambda \mathbf{e}_i, i = 1, 2, \dots, n - 1, g(\mathbf{e}_n) = \lambda(\mathbf{e}_{n-1} + \mathbf{e}_n).$$

El último vector no es proporcional a sí mismo, luego  $g$  no es una homotecia. El único autovalor de  $g$  sigue siendo  $\lambda$ , luego  $g$  carece de vectores dobles no nulos. Como  $g$  se descompone en  $n$  transvecciones,  $f$  lo hará en  $n + 1$ . Que no es posible en menos se probó en 3.2. □

### 6. Transformaciones con la unidad como único autovalor

**Proposición 6.1.** *Sea  $\mathbf{V} = \mathbf{U} \oplus \mathbf{W}$  una descomposición donde  $\mathbf{U}$  y  $\mathbf{W}$  sean propios. Si  $s$  es una transvección de  $\mathbf{U}$ , se extiende a otra  $t$  de  $\mathbf{V}$ , de manera que su restricción a  $\mathbf{W}$  sea la identidad.*

*Demostración.* Sean  $n = \dim(\mathbf{V}), r = \dim(\mathbf{U})$ . Tomamos una base  $\{\mathbf{u}_i; \mathbf{w}_j\}$  de  $\mathbf{V}$  uniendo una de cada sumando directo. Si  $B$  es la matriz de  $s$  en la base  $\{\mathbf{u}_i\}$ , basta construir  $t$  mediante la matriz

$$A = \begin{pmatrix} B & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}$$

en la base unión. Si  $s$  fijaba a  $r - 1$  vectores independientes de  $\mathbf{U}$ , es claro que  $t$  fija a esos mismos más los  $n - r$  de la base de  $\mathbf{W}$ , es decir, fija  $n - 1$  vectores independientes de  $\mathbf{V}$ . Por ello, y porque  $\det(t) = \det(s) = 1$ ,  $t$  es una transvección.  $\square$

**Proposición 6.2.** *Sea  $\mathbf{V}$  de dimensión  $n \geq 3$  y supóngase  $\mathbf{V} = \mathbf{U} \oplus \mathbf{W}$ , donde  $\mathbf{U}$  y  $\mathbf{W}$  son  $f$ -invariantes y  $\dim(\mathbf{U}) \geq 2$ . Sea  $t$  una transvección cuyo espejo incluya a  $\mathbf{W}$ . Entonces, la restricción de  $t \circ f$  a  $\mathbf{W}$  coincide con  $f$ .*

*Demostración.* En efecto, si  $\mathbf{w} \in \mathbf{W}$ , también  $f(\mathbf{w}) \in \mathbf{W}$  porque  $\mathbf{W}$  es  $f$ -invariante. Como  $\mathbf{W}$  está en el espejo de  $t$ , se tiene  $t(f(\mathbf{w})) = f(\mathbf{w})$ . En particular, si  $t$  procede por extensión de una transvección en uno de los sumandos directos, al componerla con  $f$ , los vectores del otro sumando directo se siguen transformando como en  $f$ .  $\square$

En particular, si  $t$  procede por extensión de una transvección en uno de los sumandos directos, al componerla con  $f$ , los vectores del otro sumando directo se siguen transformando como en  $f$ .

**Proposición 6.3.** *Sea  $f$  una transformación unimodular tal que*

$$\mathcal{C}(\xi) = (\xi - 1)^n, \dim(\text{Ker}(f - I)) = 1.$$

*Entonces,  $f$  se descompone en  $n - 1$  transvecciones.*

*Demostración.* Bajo estas hipótesis sabemos que la matriz canónica de Jordan consta de un único bloque (celular). Si  $\mathcal{B} = \{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n\}$  es la base en que  $f$  alcanza dicha matriz, consideremos las  $n - 1$  transvecciones

$$t_1(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + x_2 \mathbf{v}_1, t_2 = \mathbf{x} + x_3 \mathbf{v}_2, \dots, t_{n-1}(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + x_n \mathbf{v}_{n-1}$$

y sea  $g = t_{n-1} \circ \dots \circ t_2 \circ t_1$ . Puesto que  $g(\mathbf{v}_n) = \mathbf{v}_{n-1} + \mathbf{v}_n, \dots, g(\mathbf{v}_2) = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2, g(\mathbf{v}_1) = \mathbf{v}_1$ , se sigue que  $g = f$  y el resultado queda probado.  $\square$

**Proposición 6.4.** *Sea  $f$  una transformación unimodular tal que*

$$\mathcal{C}(\xi) = (\xi - 1)^n, \dim(\text{Ker}(f - I)) = r \geq 1.$$

*Entonces,  $f$  se descompone en  $n - r$  transvecciones.*

*Demostración.* Sea  $\mathcal{B} = \{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n\}$  la base en que  $f$  alcanza su matriz canónica de Jordan, la cual estará formada por  $r$  bloques celulares de dimensiones  $d_1, d_2, \dots, d_r$ . En cada uno aplicamos el teorema anterior y obtendremos

$$(d_1 - 1) + (d_2 - 1) + \dots + (d_r - 1) = n - r$$

transvecciones. Como en la proposición 6.1, cada una de ellas se extiende a todo  $\mathbf{V}$ . Teniendo en cuenta la proposición 6.2, la composición de todas ellas conduce a  $f$ .  $\square$

Como resumen de nuestros resultados podemos observar:

Sea  $f$  una transformación unimodular de un espacio  $\mathbf{V}$  de dimensión finita  $n \geq 3$ . Supongamos que

$$\mathcal{C}(\xi) = (\xi - 1)^s \mathcal{D}(\xi), \text{ con } \mathcal{D}(1) \neq 0, r = \dim(\text{Ker}(f - I)).$$

Hay dos casos extremos:

- a)  $s = n \Leftrightarrow \mathcal{D}(\xi) = 1$ . En este caso  $f$  se descompone en  $n - r$  transvecciones y no es posible descomponerla en menos (proposiciones 6.4 y 3.1).
- b)  $s = 0$ . Ahora  $f$  se descompone en  $n$  transvecciones si  $f$  no es una homotecia y en  $n + 1$  si es una homotecia no idéntica (proposiciones 5.5 y 5.6). Exceptuados tales casos (es decir, asumiendo que  $0 < s < n$ ), tendremos la descomposición directa

$$\mathbf{V} = \text{Ker}(f - I)^s \oplus \text{Ker}(\mathcal{D}(f)).$$

La restricción de  $f$  a  $\text{Ker}(f - I)^s$  se descompone en  $s - r$  transvecciones, las cuales se extienden a transvecciones de  $\mathbf{V}$  según el modelo de la proposición 6.1. Su consideración no afecta a los vectores del otro sumando directo (proposición 6.2) porque sus espejos lo incluyen. En cuanto a este segundo sumando directo, la restricción de  $f$  carece de vectores dobles no nulos, luego se descompone en  $n - s$ , o bien en  $n - s + 1$ , transvecciones según sea homotecia o no. También estas se extienden a todo  $\mathbf{V}$  según la proposición 6.1 y se recuerda que no afectan al primer sumando de acuerdo con la proposición 6.2. Así,  $f$  se descompone en

$$(s - r) + (n - s + \epsilon) = n - r + \epsilon,$$

donde  $\epsilon = 0, 1$  según el caso.

Las proposiciones 3.1 y 3.2 no permiten descomposiciones en menores cantidades. Esta fórmula abarca los



casos extremos ya comentados. Por tanto, llegamos a nuestro teorema final:

**Theorem 6.5.** *Sea  $f$  una transformación unimodular de un espacio  $\mathbf{V}$  de dimensión finita  $n \geq 3$ . Supongamos que*

$$\mathcal{C}(\xi) = (\xi-1)^s \mathcal{D}(\xi), \text{ con } \mathcal{D}(1) \neq 0, r = \dim(\text{Ker}(f-I)).$$

*Entonces,  $f$  se descompone en  $n - r + \epsilon$  transvecciones, donde  $\epsilon = 0$  si la restricción de  $f$  a  $\text{Ker}(\mathcal{D}(f))$  no es*

*homotecia y  $\epsilon = 1$  si lo fuese. En cada caso, la descomposición no puede serlo en una cantidad menor que la dicha.*

### Referencias

- [1] **M. Suzuki**, *Group Theory*, Springer-Verlag (1982).

Recibido el 5 de julio de 2011

Aceptado para su publicación el 24 de noviembre de 2011

# ESTADO DEL CONOCIMIENTO DE LA BIODIVERSIDAD EN COLOMBIA Y SUS AMENAZAS. CONSIDERACIONES PARA FORTALECER LA INTERACCIÓN CIENCIA-POLÍTICA

M. Gonzalo Andrade-C.\*

## Resumen

**Andrade-C., M. G.** Estado del conocimiento de la biodiversidad en Colombia y sus amenazas. Consideraciones para fortalecer la interacción ambiente-política. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **35** (137): 491-507, ISSN 0370-3908

En este trabajo se evalúa el estado del conocimiento, endemismos, y especies amenazadas de la biota colombiana, con un análisis de la información disponible a la fecha, estudiando el estado de conservación de los principales ecosistemas como son los humedales, páramos, y áreas protegidas comparándolos a la luz de problemas como el cambio climático, la deforestación y minería.

**Palabras clave:** Colombia, biodiversidad, especies amenazadas, endemismos, conservación, minería, cambio climático.

## Abstract

In the present work evaluated the state of knowledge, endemic species and endangered species of biota in Colombia, with an analysis of almost all information available to date, considering the state of conservation of key ecosystems such as wetlands, deserts, protected areas and comparing them with national issues such as climate change, deforestation and mining, among others.

**Key words:** Colombia, biodiversity, endangered species, endemic species, conservation, mining, climate change.

La diversidad biológica es la variación de las formas de vida que existen no solo entre las especies de plantas, animales, microorganismos y otras formas de vida del planeta, manifiesta parte en la diversidad genética, de poblaciones,

especies, comunidades, ecosistemas y paisajes. El Convenio de Diversidad Biológica, del que hace parte Colombia, aprobado mediante ley No. 165 de 1994, define la diversidad biológica como la variabilidad de los organis-

\* Profesor Asociado, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, A.A. 7495, mgandradec@unal.edu.co; miembro de número Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.

mos vivos de cualquier fuente, incluidos los ecosistemas terrestres y marinos y otros ecosistemas acuáticos, y los complejos ecológicos de los que forman parte; comprende la diversidad específica, entre las especies y en los ecosistemas.

La biodiversidad es importante por que constituye el sostén de una gran variedad de servicios ambientales de los cuales han dependido las sociedades humanas; por ejemplo proporciona bienes para las necesidades fundamentales: alimentación, tejidos, medicinas, alojamiento y combustible. Cuando se pierde algún elemento de la biodiversidad los ecosistemas pierden capacidad de recuperación y los servicios que prestan se ven amenazados. Los entornos o medios acuáticos más homogéneos y menos variados suelen ser más susceptibles a las presiones externas repentinas, como las enfermedades y las condiciones climáticas externas.

Existen cuatro servicios a saber: servicios de aprovechamiento que benefician directamente a las personas y pueden tener un claro valor monetario, como la leña de los bosques, las plantas medicinales y los peces; servicios culturales, los cuales no ofrecen beneficios materiales directos pero contribuyen a satisfacer ciertas necesidades y deseos de la sociedad, por lo tanto, inciden en la predisposición de las personas a costear los gastos de la conservación, como por ejemplo el valor espiritual que se da algunos ecosistemas como los sitios sagrados o la belleza de los paisajes; servicios reguladores que corresponde a las funciones vitales desempeñadas por los ecosistemas a las que en raras ocasiones se les asigna un valor económico en los mercados; entre estos cabe mencionar la regulación del clima mediante el almacenamiento de carbono, la protección frente, a los desastres, como la erosión de tierras y las tormentas costeras y por último los servicios de apoyo que son esenciales para el funcionamiento de los ecosistemas, pero que no benefician directamente a las personas; no obstante, son los responsables indirectos de los demás servicios, como la formación de los suelos y los procesos de crecimiento de las plantas.

Colombia cuenta con una superficie de 1'141.748 Km<sup>2</sup> continentales y 930.000 Km<sup>2</sup> marinos, es decir 2'071.748 Km<sup>2</sup>, por lo que casi un 50% del territorio Colombiano es marino. El país se encuentra ubicado en el noroccidente de Sudamérica entre los 12° 26' 46'' latitud norte y los 4° 13' 30'' latitud sur y entre los 66° 50' 54'' y 79° 02' 33'' longitud oeste, dentro de la franja intertropical, limitando al norte con el mar Caribe, al oriente con Venezuela y Brasil, por el sur con Perú y Ecuador y por el occidente con el océano Pacífico y Panamá. (Figura 1)

País	Superficie (Km <sup>2</sup> )	País	Superficie (Km <sup>2</sup> )
Argentina	2.780.400	India	3.287.595
Bolivia	1.098.581	Indonesia	1.919.440
Brasil	8.514.877	Kenia	582.650
China	9.596.960	México	19.725.550
Colombia	2.071.748	Perú	1.285.215
Costa Rica	51.100	Sudáfrica	1.219.912
Ecuador	283.561	Venezuela	916.445

Figura 1. Lista de países megadiversos y su superficie territorial

La topografía colombiana exhibe características especiales denominada por los Andes que atraviesa el territorio de sur a norte, los Andes Colombianos están conformados por tres cadenas montañosas denominadas cordillera Occidental, Central y Oriental, separadas por los valles de los ríos Magdalena y Cauca. La cordillera Occidental tiene una altura media de 2000 m, mientras que las cordilleras Central y Oriental tienen alturas medias superiores a los 3.000 m alcanzando elevaciones de mas de 5.000 m en sus picos mas altos. Estas tres cordilleras se unen en un solo macizo ubicado al suroccidente de Colombia. Al norte de los Andes, en la llanura del Caribe, se encuentra la Sierra Nevada de Santa Marta que tiene un altitud máxima de 5.775 m; al nororiente de los Andes hacia la frontera con Venezuela está la cuenca del río Catatumbo; en el occidente del país, en la frontera con Panamá se encuentran la Serranía del Darién y el cerro Pirre. La mitad suroriental del país se divide en dos regiones: la Orinoquia en la cual predominan las planicies con formaciones de sabanas y la Amazónica, en la cual predominan las planicies cubiertas por formaciones selváticas; en estas dos regiones existen algunos sistemas montañosos de poca elevación como la Serranía de La Macarena y Chiribiquete los cuales hacen parte del Escudo Guyanes (Hilty & Brown 1986). En el mar Caribe Colombia cuenta con 1.600 Km<sup>2</sup> de costa y en el Océano Pacífico con 1.300 km<sup>2</sup>. (García *et al.* 2006).

Colombia se encuentra catalogada dentro del grupo de los 14 países que alberga el mayor índice de biodiversidad en la tierra denominada países megadiversos compartiendo esta categoría con, Argentina, Bolivia, Brasil, China, Costa Rica, Ecuador, India, Indonesia, Kenia, México, Perú, Sudáfrica y Venezuela. (Figura 1).

### Metodología

Se analizo la información disponible en los Institutos de Investigación adscritos o vinculados al Ministerio de

Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, como son el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” INVEMAR, el Instituto de Investigaciones Biológicas Alexander von Humboldt, el Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, así como la Universidad Nacional de Colombia con sus dependencias como son el Instituto de Ciencias Naturales y el Instituto de Estudios Ambientales IDEA, también se analizaron los informes nacionales que se producen por parte de las instituciones del estado con destino a los entes de control y al mismo convenio de diversidad biológica, así como datos propios recopilados por el autor a lo largo de los últimos años de trabajo, así como otras fuentes bibliográficas. Esta información reflejan cifras y análisis diferentes para interpretar la biodiversidad de Colombia y así saber cuentas exactas de la biota y mostrar cuales ecosistemas y especies se encuentran amenazados y establecer las causas de la pérdida de biodiversidad.

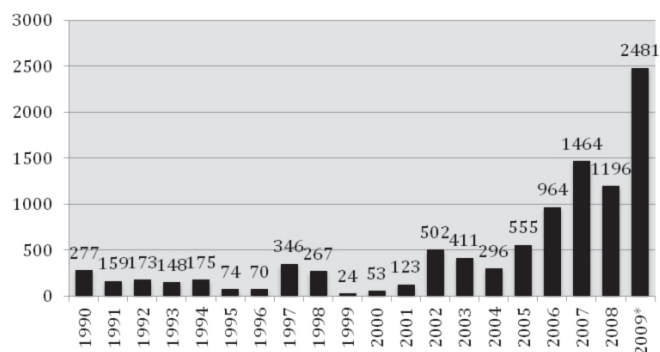
## Resultados

Para el año 2010, el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, indica que Colombia en su línea base general de ecosistemas posee 93 millones de hectáreas de zonas marinas, 114 millones de hectáreas de zonas continentales, 63.9 millones de hectáreas de bosques, 1.3 millones de hectáreas de páramos, 16 millones de hectáreas de sabanas, 20.2 millones de hectáreas de humedales interiores, 24.5 millones de hectáreas de zonas secas (áridas y semiáridas) y 380.000 hectáreas de manglares; en sus áreas protegidas cuenta en millones de hectáreas así: 65.0 Reservas Forestales de Ley 2 de 1959 a las cuales a la fecha se han realizado 13.9 sustracciones, con autorización del Ministerio, 11.4 Parques Nacionales Naturales, 22.3 de Resguardos Indígenas, 5.2 de Comunidades Afrodescendientes, 468 mil de reservas Forestales Protectoras

## La minería y su amenaza a los ecosistemas Colombianos

**Rudas**, 2010 en su documento de análisis para el Consejo Nacional de Planeación hace una comparación entre las administraciones de los presidentes Gaviria, Samper, Pastrana y Uribe, para el tema de las áreas tituladas, los títulos otorgados y las solicitudes de títulos de la Minería en Colombia. Las áreas tituladas crecieron en el caso de los tres primeros presidentes a un ritmo moderado, es decir a una tasa del 8% anual, así durante el gobierno Gaviria se otorgaron títulos por menos de 55 mil hectáreas al año, en el periodo Samper se paso a mas o menos 70 mil hectá-

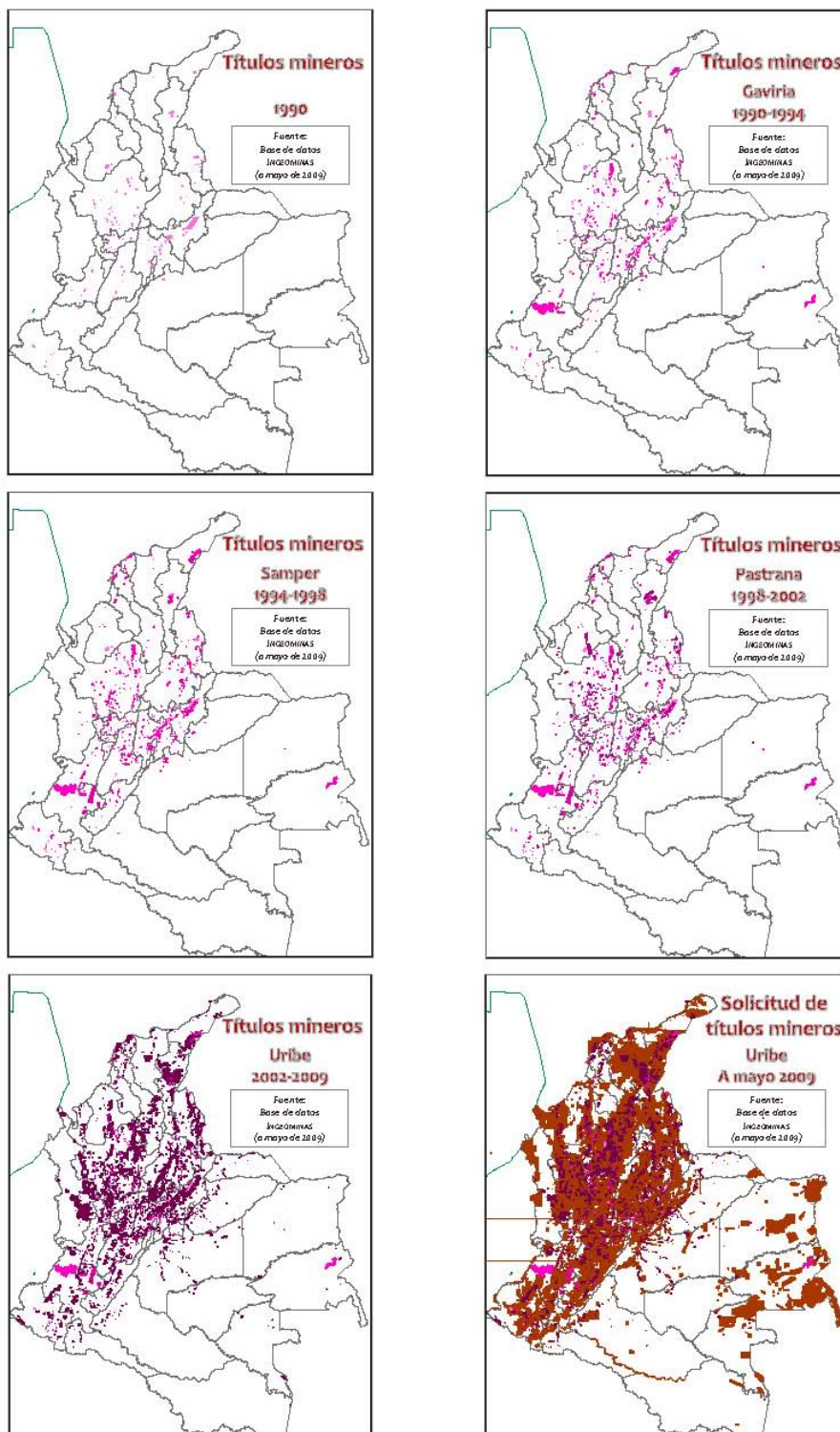
reas año, y con Pastrana, disminuyo a menos de 40 hectáreas por año; no obstante, en el periodo Uribe, el tema cambia considerablemente, en el primer periodo de gobierno se titulan cerca de 200 mil hectáreas anuales, pero en segundo periodo se pasa a titular entre el año 2007 y 2008 mas de 1 millón doscientas mil hectáreas anuales y para el año 2009 se llega a 4 millones ochenta y tres mil hectáreas anuales tituladas. (Figura 2).



**Figura 2.** Número de títulos mineros otorgados en el Periodo 1990 – 2009\* Fuente: Rudas G. (2010) a partir de Ingeominas, Títulos mineros (bases de datos a 31 de octubre de 2009), Tomado de: Rudas, Guillermo. *Política Ambiental del Presidente Uribe, 2002-2010. Niveles de prioridad y retos futuros.* Consejo Nacional de Planeación, Bogotá, 29 de octubre de 2010.

En cuanto a los títulos otorgados, muestra como entre los años 1990 y 2001 se entregaron 1.889 títulos, es decir casi 157 títulos por año, pero a partir del año 2002, se incrementan considerablemente, llegando en el periodo 2002 a 2009 a 7.869 títulos otorgados; de estos valores, 2.481 son para el año 2009 con un corte a octubre 31. Para las solicitudes de títulos mineros a mayo de 2009 se llego a casi 40 millones de hectáreas es decir casi el 35% del territorio nacional. Independientemente del trámite final de estas solicitudes, ellas representan un importante crecimiento y muestran el enorme interés por adelantar actividades mineras en Colombia. (Figura 3).

Los títulos mineros en los Paramos, son un tema también preocupante, ya que a la fecha se encuentran registrados títulos mineros en 122 mil hectáreas, lo que representa el 6.3% del total del área de páramos del territorio nacional, distribuidas en los departamentos de Boyacá, Cauca, Santander, Cundinamarca, Norte de Santander y Tolima. Igualmente sucede para las Reservas forestales establecidas por la Ley 2 de 1959. De las 51.5 millones de hectáreas que hoy aparecen en esta categoría, cerca de 1 millón trescientas mil tienen título minero. **Rudas**, 2010. (Figura 3).



Tomado de: Rudas, Guillermo. *Política Ambiental del Presidente Uribe, 2002-2010. Niveles de prioridad y retos futuros*. Consejo Nacional de Planeación, Bogotá, 29 de octubre de 2010, con base en datos georreferenciados de Ingeominas, a 7 de mayo de 2009.

**Figura 3.** Colombia. Evolución de la titulación minera, 1990- 2009.

Adicionalmente a los datos planteados, (ver imágenes de fotografías aéreas del departamento del Chocó (Figura 4, 5)), un buen ejemplo es el caso del río Atrato, donde es devastador el impacto que causa la acción de la minería sobre estos ecosistemas, producto de un crecimiento desmesurado con una precaria capacidad técnica y operativa del Estado para regularla convirtiéndose en una actividad económica que amenaza el ambiente, la salud y la vida de los organismos. Lo mismo está sucediendo en el río Dagua en el Valle, en el páramo de Pisba y en el bosque altoandino adyacente al páramo de Rabanal en Boyacá, páramo de Santurban en Santander, Ciénaga de Ayapel, en donde los impactos ambientales por la minería ilegal de oro, ha ocasionado una gran sedimentación.



**Figura 4.** Fotografía aérea del Río Atrato departamento del Chocó, 2010.



**Figura 5.** Fotografía aérea del Río Atrato departamento del Chocó, 2010.

### Las causas de pérdida de biodiversidad

En Colombia, hay varias causas directas e indirectas que influyen en la pérdida de biodiversidad y que en

algunos casos hacen que esta pérdida sea irreversible. Entre las causas directas, tenemos: políticas de estímulo a la ocupación y uso del territorio, la transformación de hábitats y ecosistemas naturales, la sobreexplotación, la fragmentación de las poblaciones, la deforestación, el consumo de leña, los incendios, la actividad agrícola, el cambio climático, la contaminación, la introducción de especies, la pesca comercial sin control, la urbanización, la minería, la destrucción de humedales y zonas de páramo, la erosión, los desastres naturales, la cosecha indiscriminada y como causas indirectas: el desconocimiento del potencial estratégico de la biodiversidad, la débil capacidad institucional para reducir el impacto de las actividades que generan pérdida de biodiversidad, la expansión de la frontera agropecuaria, la baja presencia del Estado en las zonas de alta biodiversidad, el surgimiento y consolidación de los cultivos ilícitos, los problemas del orden público, conflictos armados, comercio internacional de pieles, la colonización, el desarrollo de proyectos de infraestructura.

La serie de los libros rojos de las especies amenazadas en Colombia redactados con base en los criterios y las categorías de los listas rojas de la UICN reflejan la probabilidad de extinción de una especie si persisten las condiciones actuales. La situación de riesgo en que se encuentran las especies colombianas se basa en la información recabada por más de 600 investigadores que trabajan en el país.

Las estimaciones se han hecho siguiendo un sistema de clasificación de las especies en ocho categorías a saber: extinta, extinta en estado silvestre, en peligro crítico, en peligro, vulnerable, casi amenazada, preocupación menor y datos insuficientes. Se consideran amenazadas las especies clasificadas en las categorías en peligro crítico, en peligro y vulnerables.

Dentro de las causas que están amenazando directamente a las especies que habitan el territorio colombiano, tenemos: distribución restringida de las especies, pesca comercial, alteración de hábitats, caza, fragmentación de las poblaciones, actividades agrícolas, deforestación, actividades ganaderas, comercio-cacería, extracción maderera, cultivos ilícitos, contaminación, minería, destrucción de humedales, erosión, especies introducidas, animales domésticos, desastres naturales, cambio climático, pesquería industrial de altamar, desconocimiento de la especie, comercio internacional de pieles.

La evaluación de los “Ecosistemas del Milenio”, indica que la degradación de los ecosistemas es ya un obstáculo importante para la consecución de los objetivos de

desarrollo del milenio, que en su informe síntesis plantea cuatro conclusiones principales:

- En los últimos 50 años, los seres humanos han transformado los ecosistemas más rápida y extensivamente que en ningún otro período de tiempo comparable de la historia humana, en gran parte para resolver rápidamente las demandas crecientes de alimento, agua dulce, madera, fibra y combustible. Esto ha generado una pérdida considerable y en gran medida irreversible de la diversidad de la vida sobre la Tierra.
- Los cambios realizados en los ecosistemas han contribuido a obtener considerables beneficios netos en el bienestar humano y en el desarrollo económico, pero estos beneficios se han obtenido con crecientes costos consistentes en la degradación de muchos servicios de los ecosistemas, un mayor riesgo de cambios no lineales, y la acentuación de la pobreza de algunos grupos de personas. Estos problemas, si no se los aborda, harán disminuir considerablemente los beneficios que las generaciones venideras obtengan de los ecosistemas.
- La degradación de los servicios de los ecosistemas podría empeorar considerablemente durante la primera mitad del presente siglo y ser un obstáculo para la consecución de los Objetivos de Desarrollo del Milenio.
- El desafío de revertir la degradación de los ecosistemas y al mismo tiempo satisfacer las mayores demandas de sus servicios puede ser parcialmente resuelto en algunos de los escenarios considerados por la evaluación, pero ello requiere que se introduzcan cambios significativos en las políticas, instituciones y prácticas, cambios que actualmente no están en marcha. Existen muchas opciones para conservar o fortalecer servicios específicos de los ecosistemas de forma que se reduzcan las elecciones negativas que nos veamos obligados a hacer o que se ofrezcan sinergias positivas con otros servicios de los ecosistemas.

### **Pérdida de la cobertura boscosa**

Se cree que la deforestación ocurre por el consumo energético, los cultivos ilícitos y su erradicación, y la quema provocada de la vegetación; sin embargo, no existen cifras confiables que permitan establecer la escala de esta destrucción en el territorio nacional, y no hay un monitoreo de las hectáreas de bosque que las corporaciones autónomas regionales restituyen anualmente.

La crisis de la biodiversidad (extinción efectiva y esperada) es fundamentalmente un fenómeno de genealogías (ascendencia y descendencia de especies), en el que se necesitan entre 2.000 y 100.000 generaciones para la aparición de una nueva especie. Por eso, las soluciones deben dirigirse hacia la preservación y protección de sus ambientes, es decir, las áreas representativas del sistema de parques nacionales naturales.

Actualmente, buena parte de la biodiversidad de Colombia se concentra en 13 millones de hectáreas correspondientes a 54 áreas protegidas ¡Un banco genético irremplazable!. La tasa de extinción inducida por las actividades humanas es cada vez más acelerada, especialmente en islas, lagos ambientes montañosos y bosques húmedos tropicales, cuya extensión original se ha reducido aproximadamente en un 55 % debido a la tala y los incendios.

Dos terceras partes de los ecosistemas colombianos se concentran en la región Pacífica, la Amazonía y la Orinoquía. El resto corresponden a la región Andina y al Caribe, y han sido intervenidos y transformados con una alta densidad poblacional.

Con relación a las hectáreas de bosque, la Ley 2 de 1959, estableció que el país tenía 58 millones, un mapa realizado en 1984 indicó que había 53 millones, mientras el IDEAM, determino la medida en 80 millones. Los datos que reportan el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial a la fecha calculan, que después de todos las sustracciones que ha tenido estas reservas forestales tan solo existen 65 millones de hectáreas. Llegando a una sustracción de casi 15 millones de hectáreas.

Entre 1900 y 1962 las cifras de deforestación llegaron a 6 millones de hectáreas, y entre 1963 y 1998, a 11, 5 millones, considerando que la pérdida de cobertura boscosa fue del 36 %.

En la Amazonía colombiana se calcula que hay 38 clases de coberturas vegetales. En 2007 las cifras señalaban que se mantenía el 85 % de los bosques, no obstante entre 2002 y 2007 se perdieron cerca de 7.000 Km<sup>2</sup> de selva, es decir, 1465 Km<sup>2</sup> por año. **Andrade-C.** 2010.

Por lo anterior, es imperativa una iniciativa de largo alcance que coadyuve a restaurar componentes de la biota, fundamentales para garantizar una calidad ambiental en la población colombiana.

Estado de los ecosistemas marinos y costeros (arrecifes, manglares, praderas de pastos marinos y litorales rocosos).

El Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR en su Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia año 2009 y 2010, registra los siguientes datos para estos ecosistemas

### Arrecifes Coralinos

Colombia es el único país de la región que tiene arrecifes coralinos en las costas del Pacífico y Atlántico, con una extensión total 1.091 Km<sup>2</sup>, lo que representa menos del 0,4 % de los arrecifes del mundo.

Los corales y algas, principales componentes del sustrato indicadores del estado de salud del arrecife, ha fluctuado de forma diferente en las estaciones que tiene el Invemar en, San Andrés, Islas de San Bernardo, Gorgona y Malpelo, Islas del Rosario y Chengue pero en Islas del Rosario y Chengue, hay un poca variabilidad indicando una aparente estabilidad de los arrecifes, pero en San Andrés e islas del Rosario hay una alta variabilidad y continua disminución de la cobertura del coral, lo que significa un mayor dinamismo y degradación del sistema arrecifal. (Camacho, *et al.*, 2010).

### Manglares

Los manglares son importantes como agentes detoxificadores, amortiguadores de inundaciones y protectores de la erosión del viento y las olas en la línea de costa, sirven también de refugio, sitios de alimentación y anidación de diversas especies de mamíferos, aves, reptiles y anfibios y representan fuentes importantes de recursos para el aprovechamiento forestal, hidrobiológico y la obtención de productos requeridos en la construcción industrial y doméstica (Guevara-Mancera *et al.*, 1998).

De los 294.636 mil hectáreas de manglar que tiene Colombia en sus dos costas, según los estudios de la CAR, solamente 96.186 ha se encuentran zonificadas, lo que significa que el 67% de la cobertura de manglares del país no ha sido zonificada ni cuenta con planes de manejo, estos ecosistemas presentes en las costas Caribe, Pacífica y territorio insular de Colombia se encuentran en un alto grado de perturbación, por estar sometidos a una presión por el desarrollo de la infraestructura vial, turística, urbana e industrial, aprovechamiento intensivo de los recursos hidrobiológicos y maderables y cambio de uso de la tierra por la expansión de la frontera agrícola. (Orjulea *et al.*, 2010).

### Praderas de pastos marinos

En el Gran Caribe existen 9 especies de las cuales 6 se encuentran representadas en el Caribe colombiano, su

importancia radica en que sirven para producción de fuentes directas e indirectas de alimento, el suministro de sustrato para la fijación de epífitos y su contribución en la recirculación de nutrientes y estabilización de sedimentos, y sirve como refugio y zona de cría para invertebrados e invertebrados y amortiguadores de la energía proveniente de las olas y la marea, permitiendo la suspensión y estabilización de los sedimentos, creando ambientes de baja energía y protegiendo la línea de costa. (Gómez *et al.*, 2010).

### Litorales rocosos

Colombia posee, según el INVEMAR, 2009, 1.094, 90 Km<sup>2</sup> de litorales rocosos de diferente origen geológico, dispuestos en una línea discontinua en las costas continentales y los sistemas insulares, se encuentran en un nivel de valoración muy bajo ya que tan solo se conocen 141 poblaciones con información. (Batista-Morales *et al.*, 2010)

### Estado del conocimiento de las especies marinas

Según Díaz *et al.*, 2010, a la fecha en el Caribe se han encontrado alrededor de 306 especies de esponjas, 9 de zoantideos, 115 de corales escleractínos, 15 antipatharios, 25 polycladios, 1498 de moluscos, 239 de equinodermos, 990 de peces, 18 de mamíferos marinos, t 565 de algas marinas: Para el Pacífico colombiano hay 13 grupos taxonómicos de animales y 3328 de plantas marino-costeros. A la fecha se tienen nuevos datos de ampliación de distribución y nuevas especies, peces marinos 39 especies, Crustáceos 21, 13 de equinodermos, poliquetos 11, cnidarios 7, poríferos 4 y macroalgas 3, así es que en moluscos se conoce a la fecha un total de 987 especies, 806 de peces, 551 de Crustáceos, 459 de poliquetos, mamíferos marinos 30. (Figura 6).

### Estado del conocimiento, endemismos y especies amenazadas de la fauna y flora de Colombia

#### Invertebrados

Los invertebrados marinos, (Figura 7), en Colombia encontramos datos hasta ahora en esponjas de 280 especies entre los 0 y 40 m. de profundidad, decapados 688 especies, isopoda 91 especies y stomatopoda 50 especies (S. Zea y N. Campos com. pers.), Ardila *et al.*, en el año de 2002 Colombia posee un total de 26 especies amenazadas, (Figura 8), Corales 7 especies así: en peligro, *Acropora palmata*, en peligro crítico *Acropora cervicornis* y vulnerables *Gorgonia ventalina*, *Acropora prolifera*, *Stephanocoenia intersepta*, *Mussa angulosa* y *Eusmilia fastigiata*; Moluscos 14 especies todas en categoría vulnerable, así:



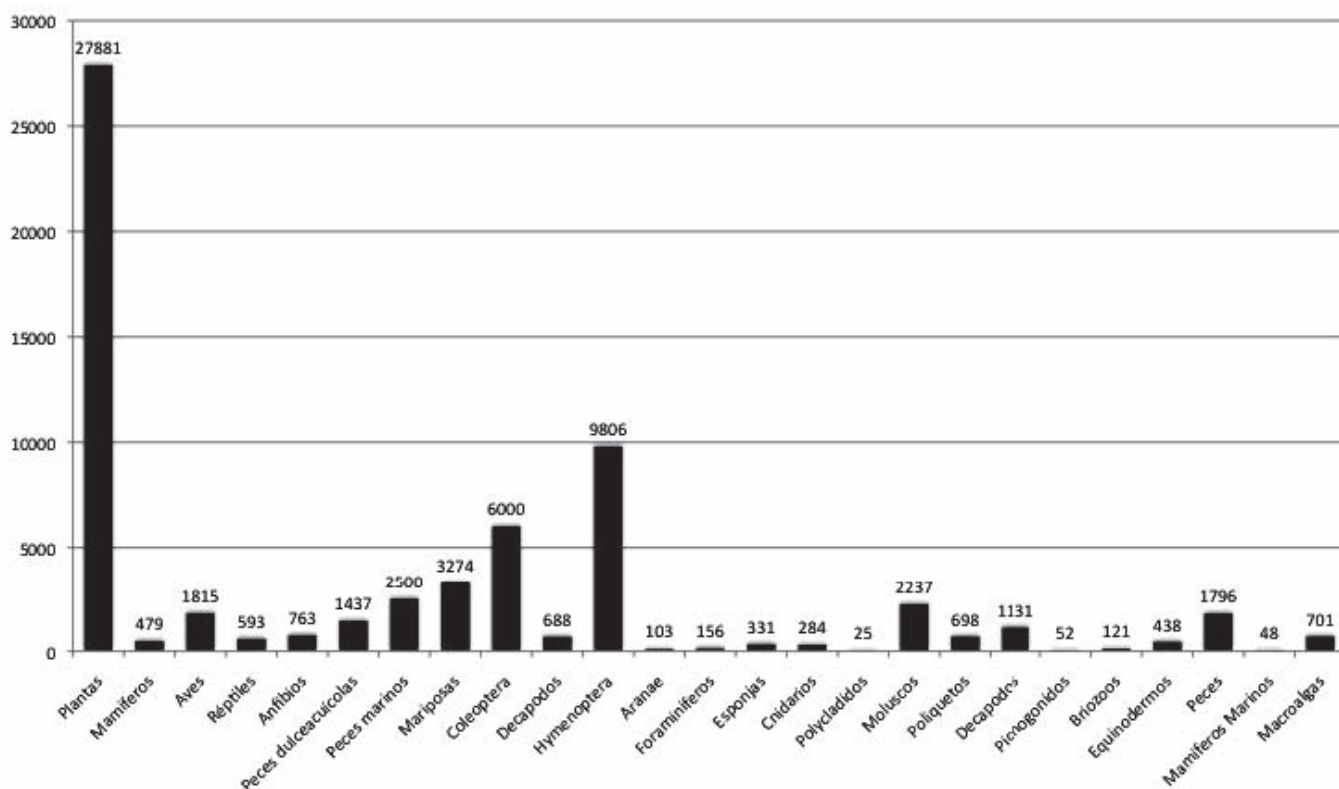


Figura 6. Riqueza de especies de la biota en Colombia por grupo de organismos biológicos.

Grupo	No. Especies
Esponjas	280 sp entre 0-40 mt
Decapoda	688
Isopoda	91
Stomatopoda	50
<b>Total</b>	<b>1005</b>

Figura 7. Riqueza de especies de invertebrados marinos

*Cittarium pica*, *Strombus gigas*, *Cypraea surinamensis*, *Muracypraea mus*, entre otras; Crustáceos 7 especies destacando a *Litopenaeus schmitti* y *Panulirus argus*.

En invertebrados terrestres (Figuras 6, 9) en Colombia la riqueza para los grupos mas estudiados como son: Coleoptera 6.000 especies, Decapodos 688, Hymenoptera 9.806, Aranae 103 y mariposas 3274 especies, en endemismos (Figura 9, 10) en Coleoptera, Decapoda, Hymenoptera y Aranae, no se conoce la cifra, en mariposas contamos con 350 especies, de estos grupos, según Amat et al., 2007, registran 40 especies (Figura 8), que se encuentran amenazadas, así: Aranae 4 especies: en peligro 3 especies y vulnerable

1, Escorpiones 3 especies en estado vulnerable, Coleoptera 4 especies, (EN) en peligro 1 especie, *Megasoma mars*, (VU) vulnerable 3 especies *Titatinus giganteus*, *Proculus opacus* y *Dynastes neptunos*, Hymenoptera 17 especies, así 7 en peligro, 3 en peligro critico (CR) y 7 vulnerables, no obstante el Instituto Humboldt en el 2011, reporta que para Colombia posee el 100 % de las especies de hormigas conocidas para Centro y Sur América y 2 están amenazadas como vulnerables; Lepidoptera presenta 10 especies de las cuales 8 son mariposas y 2 son polillas, así: 3 en peligro (EN), 1 en peligro critico (CR) y 6 vulnerables; en decapados una especie categorizada como vulnerable.

**Vertebrados**

*Peces dulceacuicolas*

Para los peces dulceacuicolas, (Figuras 6, 11) Colombia posee 1.437 especies, se desconocen cuantas de estas especies son endémicas para los países megadiversos, esto nos ubica en el segundo país mas rico en diversidad de especies después de Brasil, quien ocupa el primer lugar y seguido de Indonesia quien ocupa el tercer puesto de lo anterior, los países de Argentina, Bolivia, México,

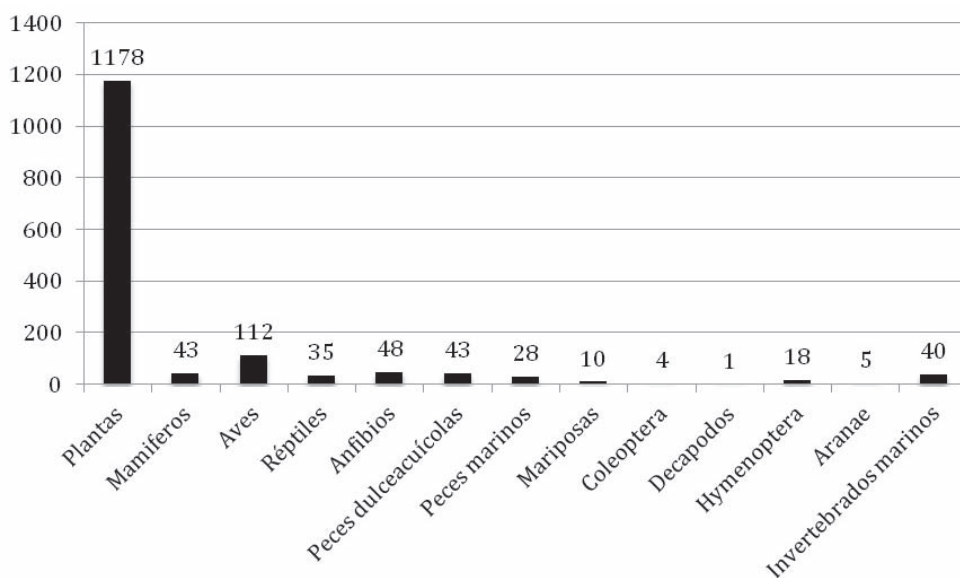


Figura 8. Número de especies amenazadas en Colombia

Pais	Mariposas	Coleoptera	Decapodos	Hymenoptera	Aranae
China	1.200 (200)	?	?	?	?
Brasil	3.268 (200)	?	?	10334 (-)	?
India	?	?	?	?	?
Argentina	?	?	?	10.820 (-)	?
Colombia	3.274 (350)	6.000	688	9.806 (-)	103 (?)
México	2.237 (200)	?	?	10.047 (-)	?
Indonesia	1.900 (700)	?	?	?	?
Perú	3.710 (350)	?	?	10.133 (?)	?
Sudáfrica	?	?	?	?	?
Bolivia	3.000 (200)	?	?	9.939 (?)	?
Venezuela	2.316	?	?	9.736 (?)	?
Kenia	?	?	?	?	?
Ecuador	2.200 (200)	?	?	9.809 (?)	?
Costa Rica	?	?	?	9.407 (?)	?

Figura 9. Riqueza y endemismos de las especies de invertebrados terrestres

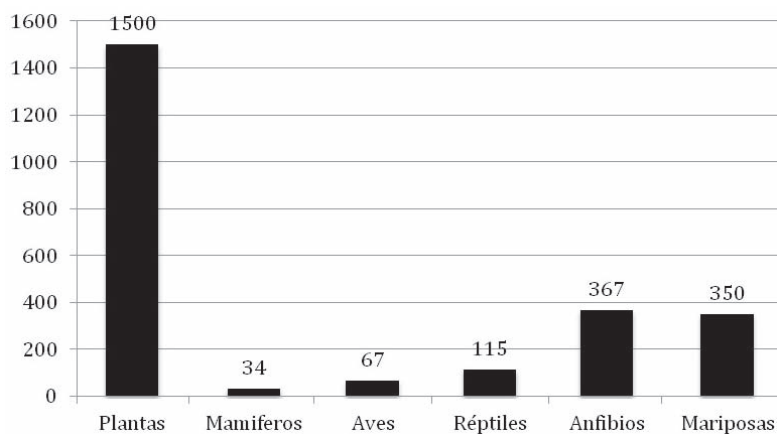


Figura 10. Número de especies endémicas en Colombia por grupo biológico.

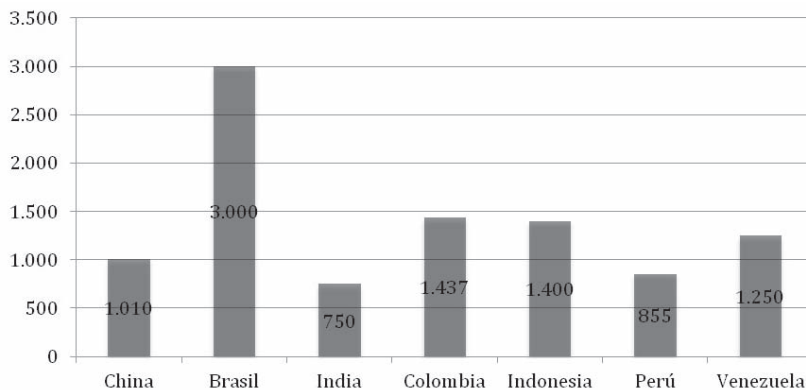


Figura 11. Riqueza de las especies de peces dulceacuícolas

Sudafrica, Kenia Ecuador y Costa Rica no se conocen los valores de la riqueza de su diversidad. Según **Mojica et al.**, 2002, 34 especies se encuentran amenazadas, (Figura 8), así (EN) en peligro 10 especies, (CR) en peligro critico 2 como *Prochilodus magdalenae* (Bocachico del magdalena) y *Pseudoplatystoma fasciatum* (Bagre rayado) (VU) vulnerables 22 especies. Y se encuentra categorizada con extinta (EX *Rhizosomichthys totae* llamada comúnmente pez graso endémico de la Laguna de Tota en Boyacá. El Humboldt en su Registro Nacional de Colecciones a 2010 reporta 595.667 ejemplares en las distintas colecciones de Colombia.

**Reptiles**

Colombia posee 593 especies de las cuales 115 son endémicas, (Figuras 6, 12), lo que quiere decir que somos el 3 país mas rico en biodiversidad, de estas, según el Libro Rojo de especies amenazadas de reptiles de Colombia de **Castaño et al.**, 2002, 25 están amenazadas, (Figura 8),

así, (EN) en peligro 10, (CR) en peligro critico 8 y 7 (VU) vulnerable, las causas de estas amenazas es la sobreexplotación, la caza, la fragmentación de los poblaciones y la perdida de hábitat. Esto quiere decir que por ejemplo de las 6 especies que viven de Cocodrilos hay 3 amenazados (2 CR y 1 EN), de las 33 especies que tenemos de tortugas, (27 continentales y 6 marinas) 18 están amenazadas, así: continentales 12 amenazadas (3 CR, 3 EN, 6 VU) y de las marinas las 6 están amenazadas., no obstante el Humboldt, 2011 reporta según el Registro Nacional de Colecciones, a 2010 un total de 50.638 ejemplares depositados en las diferentes colecciones colombianas.

**Aves**

Somos el país mas rico en diversidad de especies, poseemos 1.815 especies, (Figuras, 6, 13), encontrando en un segundo lugar a Perú con 1781; de las especies presentes en Colombia, 67 son endémicas (Figuras 10, 13), de nuestro territorio, pero según **Renjifo et al.**, 2002, 112 están

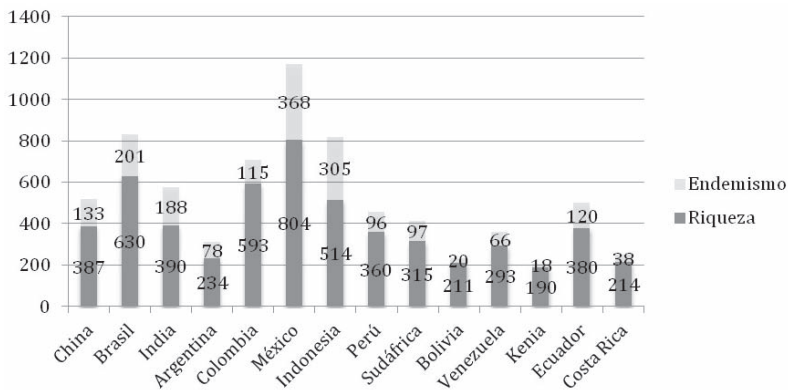


Figura 12. Riqueza y endemismo de especies Reptiles en los países megadiversos

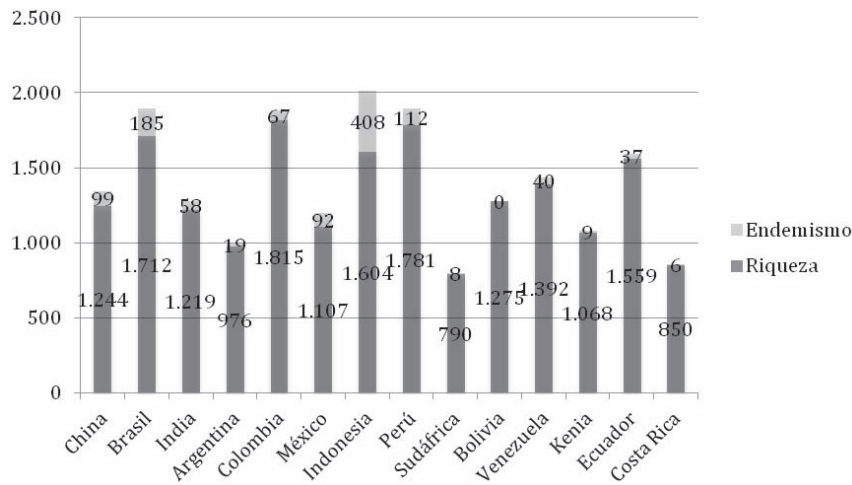


Figura 13. Riqueza y endemismos de aves en los países megadiversos

amenazadas, (Figura 8), así: en peligro 43, en peligro crítico 19 y 50 vulnerables., pero se reporta a una especie extinta (*Podiceps andinus*), entre las principales causas de amenazas se encuentran la deforestación, actividades agrícolas y ganaderas, urbanización, comercio y cacería, extracción de madera, cultivos ilícitos, contaminación, minería, destrucción de humedales, erosión, especies introducidas, animales domésticos y desastres naturales.

**Anfibios**

Somos el segundo país mas rico en riqueza de especies, poseemos 763 especies y 367 endémicas, (Figuras 6, 10), después de Brasil que es el mas rico (779 especies, 375 endémicas) (Figura 8), según **Rueda-Almonacid et al., 2004** Colombia tiene 48 especies amenazadas, 26 en peligro, 14 en peligro crítico y 8 vulnerables.

Entre las principales amenazas que atentan contra las poblaciones de anfibios en Colombia tenemos, la destrucción y fragmentación de los hábitats naturales, la sobreexplotación e introducción de especies exóticas, contaminación, cambio climático e incremento de la radiación ultravioleta,

**Mamíferos**

Colombia ocupa el quinto lugar en riqueza de especies (479 especies) y en endemismos somos el noveno país (34 especies), (Figuras 6, 14), **Rodríguez-M. et al., 2006**, reporta 43 especies amenazadas, (Figura 8), así 6 en peligro crítico, 10 en peligro y 27 vulnerable, pero una especie se encuentra en la categoría de (EX) extinta (*Monachus tropicalis*, Orden carnívora, familia Phocidae) llamada comúnmente foca monje. Entre las causas de amenazas esta

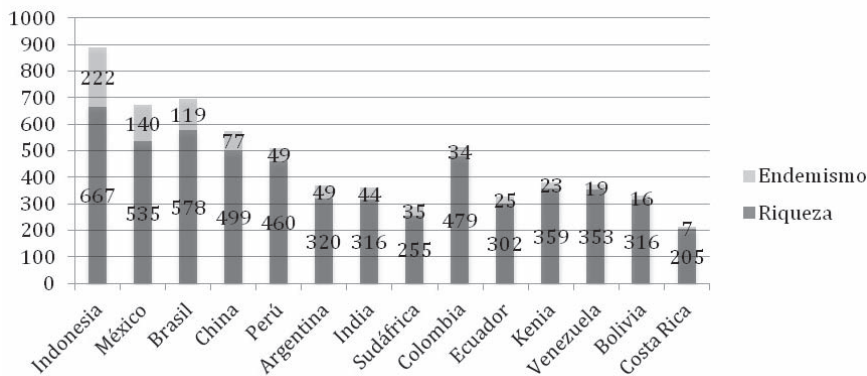


Figura 14. Riqueza y endemismos de Mamíferos de los países megadiversos.

el cambio climático como el factor principal, seguido de la pesquería industrial de altamar, el mismo desconocimiento de la especie, comercio internacional de pieles, distribución restringida, pérdida de hábitat y la caza.

### **Flora**

Colombia según el Catálogo de las plantas de Colombia (versión preliminar) incluye para el año 2007 un total de 27.881 especies de plantas conocidas, (Figura 6), calculando un estimado de entre 30.000 y 41.000 especies ([http://www.siac.net.co:8088/web/sib/cifras#Cantidad\\_de\\_especies](http://www.siac.net.co:8088/web/sib/cifras#Cantidad_de_especies)), de las cuales 1.500 son endémicas, ocupando el segundo lugar en riqueza de especies y el 8 en endemismo (1.500 especies), (Figura 10), el primer lugar en riqueza lo ocupa Brasil con 56.215 especies de las cuales se desconoce las que son endémicas, y en tercer lugar se encuentra China con 32.200 especies.

### **Briófitas**

#### **Musgos**

El estado del conocimiento de los musgos a nivel global se calcula que se conocen hasta la fecha 13.500 especies de las cuales entre 2400 y 2900 están en la región neotropical y de esas 965 están presentes en Colombia (Figura 6), (<http://sites.google.com/site/rgbernalg/cifraspreliminaresdelafloredec>), los datos de **Linares et al.**, 2002 indican que 43 especies, (Figura 8), así, en peligro crítico (CR) 6 especies, en peligro (EN) 4 especies y 33 vulnerable (VU).

#### **Hepáticas**

Colombia posee 749 especies, (<http://sites.google.com/site/rgbernalg/cifraspreliminaresdelafloredec>), (Figura 6), de las 8.300 conocidas para el mundo, de estas según **Linares, et al.**, 2002, 50 están amenazadas, (Figura 8), así, 47 (VU) vulnerable, 2 en peligro crítico (CR) y 1 (EN) en peligro.

En total para las Briófitas amenazadas tenemos que de las de las 8 especies que están en peligro crítico (CR) 6 son endémicas de Colombia, de las 5 especies en peligro (EN) 4 son endémicas y de las 82 especies vulnerable (VU) 39 son endémicas del territorio nacional.

Hasta la fecha la Serie de los Libros Rojos de las especies Amenazadas de Colombia en sus 5 volúmenes publicados están dedicados a las familias Chrysobalanaceae, Dichapetalaceae, Lecythydaceae, Palmas, Frailejones, Zamias, Bromelias, Labiadas, Pasifloras, especies maderables Magnoliáceas, Miristicáceas, Podocarpaceas, y Orquideas, razón por la cual aun no se sabe de toda nuestra

riqueza de plantas fanerogamas, cuantas están amenazadas, el ultimo libro rojo salio publicado en el 2007 y desde esa fecha no se conoce por parte del Ministerio de Ambiente, entidad encargada de liderar el proceso de categorización de las especies en Colombia para cuando saldrá un nuevo volumen ya que es un tema que se olvido por completo desde esa fecha.

Las Chrysobalanaceae de las 121 especies conocidas para Colombia, 34 están amenazadas, (Figura 8), así 8 en peligro crítico, 14 en peligro (EN) y 12 vulnerable (VU); Dicapetalaceae de las 24 especies conocidas 11 están amenazadas, 1 CR, 3 EN y 7 VU; Lecythydaceae de 71 especies 26 amenazadas, así 2 en CR, 10 EN 14 VU (**Calderón et al.**, 2002).

Los frailejones, palmas, y zamias de acuerdo a los datos de **Calderón et al.**, 2005, de las 301 especies que evaluaron 88 amenazadas, así 20 en peligro crítico (EN) 6 palmas, 7 zamias y 7 frailejones, en donde el 70 % de las especies de estos tres grupos de plantas son endémicos de Colombia y se distribuyen, en su mayoría en la región Andina o en el Magdalena Medio. Pero con relación al número de especies que crecen en estado silvestre en el país las zamias es el grupo que presenta la situación mas difícil ya que de las 20 especies, 13 están amenazadas 7 CR. Los frailejones son el segundo grupo amenazado, ya que de las 68 especies que existen en Colombia 36 amenazadas y de estas 7 en peligro crítico y finalmente las palmas, con 213 especies en Colombia 39 están amenazadas, 6 CR.

Para Bromelias, Labiadas y Pasifloras, **García y Galeano**, 2006, muestran que de las 718 especies evaluadas, encontraron 230 especies y 25 subespecies amenazadas en estado silvestre, 160 son bromelias, 47 especies y 25 subespecies de labiadas y 23 de pasifloráceas. El grupo con la situación mas difícil es las labiadas ya que de las 203 especies presentes, 72 resultaron amenazadas con un 80 % de las especies endémicas, las bromelias de las 492 especies presentes en Colombia 160 amenazadas y el 77 % de las especies son endémicas de Colombia y las pasifloras con 154 especies que viven en el país, 23 amenazadas pero el 87 % de las especies son endémicas de Colombia. En total 47 especies categorizadas en CR (39 de bromelias, 6 labiadas, 2 pasifloras), 94 en peligro (EN) (60 bromelias, 27 labiadas, 7 pasifloras) y 114 son VU (79 de bromelias, 39 labiadas y 1 pasifloras).

**Cárdenas y Salinas** en el 2007, registraron que de las 50 especies evaluadas, 34 amenazadas, (CR) 8 especies, (EN) 16 especies, (VU) 10, las familias evaluados son Lauraceae, Lecythydaceae, Sapotaceae, Fabaceae, Burceraceae, Caesalpinaceae, Magnoliaceae, Meliaceae, Euphorbiaceae y Mimosaceae.

**García**, 2007, para las magnoliáceas, miristicáceas y podocarpaceas, registran que para las magnoliáceas que de las 33 especies presentes en Colombia 32 son amenazadas, 11 en CR, de estas 10 son endémicas de Colombia, 20 especies en EN y 1 VU; miristicáceas de las 67 especies que viven en Colombia 8 amenazadas, 1 CR, 2 EN y 5 especies VU de estas 2 son endémicas, todas distribuidas en el región del Chocó y para las podocarpaceas de las 6 especies presentes en Colombia 4 amenazadas en estado VU.

Para las orquídeas según **Bernal et al.**, 2007, reportan para Colombia 3967 especies (<http://sites.google.com/site/rgbernalg/cifraspreliminaresdelafloradec>), y Calderón, 2007 tomo I, muestra que de las 375 especies analizadas, 207 son amenazadas, 6 especies en peligro crítico (CR), 64 en peligro (EN) y 137 vulnerables (VU), dentro de las causas de amenazas encontramos la destrucción de su hábitat, ampliación de la frontera agropecuaria, deforestación, recolección excesiva con fines comerciales y ornamentales.

### **Permisos de investigación sobre la biota y Contratos de Acceso al Recurso Genético en Colombia**

En Colombia existe dentro de la legislación ambiental el Decreto 309 de 2000 y la Decisión 391 de 1996 de la Comunidad Andina de Naciones sobre Acceso a Recursos Genéticos que obliga a las investigadores que en el caso de la primera norma, no pertenezca a un Instituto de Investigación adscrito o vinculado al Ministerio de Ambiente y en el caso de la segunda norma a todas las personas nacionales o extranjeras para poder realizar investigación en el territorio nacional debe tener un permiso de investigación sobre la biodiversidad y si en su investigación necesita trabajar lo molecular debe obtener un contrato de acceso a recurso genético, así mismo existe en Colombia un proceso de consulta previa que es un mecanismo de participación a través del cual se busca garantizar la integridad étnica y cultural de los pueblos indígenas y negros y por ende obliga a que toda actividad de investigación con fines científicos que se quiera realizar en sus zonas debe ser previamente consultada con dichas comunidades.

No obstante, se debe modificar esta Decisión Andina, sobre Acceso a Recursos Genéticos en el sentido de cómo esta definido la palabra "Recurso Genético", por que como esta significa que cualquier trabajo que se quiera adelantar que implique algo molecular es acceso y se debe establecer un contrato con el estado Colombiano, es decir, si para poder saber el nombre de una especie de planta o animal es necesario conocer su ADN por que por ninguna otra característica es posible, el investigador debe tener un Contrato de Acceso a Recurso Genético, tal parece que

solamente los países de la Comunidad Andina de Naciones estamos abocados a esto ya que a alguien le pareció buena idea tener una Decisión Andina que regulara esto, ratificado por los parlamentos de cada país.

El promedio de obtención de un Contrato de Acceso a Recurso Genético es de 3.5 años en Colombia por que primero el investigador debe tener un permiso de investigación (Decreto 309 de 2000) para poder realizar una recolección de cualquier ejemplar en el territorio nacional para lo cual el investigador debe indicar el numero exacto de ejemplares que recolectara, el lugar exacto de la colección con las respectivas coordenadas geográficas, cuantas veces realizara la colecta mientras desarrolle el proyecto, entre otros, lo cual para un investigador que quiera conocer la biodiversidad en Colombia le implica predecir el futuro, ya que es imposible el saber exactamente el numero de ejemplares o las coordenadas del lugar de colecta sin nunca haber salido al lugar de muestreo, pero además de esto, entre los papeles que se deben anexar ante el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial es una carta de la Dirección de Etnias del Ministerio del Interior y Justicia en donde le certifiquen si en los lugares en donde se realizara la investigación hay presencia o no de comunidades étnicas, este solo certificado se puede demorar hasta 1 año y si en el área de trabajo hay la presencia de alguna étnia es necesario adelantar un proceso de consulta previa con la comunidad lo cual puede demorar varios meses quizá entre 6 u 8 meses e implica que el investigador de su proyecto debe financiar el costo de dicha consulta que implica el pago del desplazamiento al representante de la comunidad hasta el lugar de reunión y el mantenimiento en la zona mientras dure esta, así mismo hay que pagarle los gastos de pasajes y viáticos a los funcionarios de los Ministerios de Ambiente y de Interior y Justicia, no importa el monto del costo del proyecto de investigación pero cada reunión que se haga para la consulta previa la inversión es de aproximadamente unos 7 millones de pesos y si el investigador debe además solicitar el Contrato de Acceso no importa que este pertenezca una institución nacional o internacional, debe anexar una carta de una institución independiente de la de su vinculación que le sirva de Institución Nacional de Apoyo, es decir que esta institución le debe certificar al estado colombiano mediante un informe que debe entregar al finalizar el investigador que si cumplió con lo que se había comprometido en su proyecto de investigación que utilizo la metodología apropiada, entre otros.

Lo anterior hace que para que un investigador pueda iniciar a ejecutar un proyecto que duro varios meses escribiéndolo y en promedio esperando un año para que se lo financie alguna institución lo que implica pasar por el duro

proceso de la evaluación de pares académicos nacionales o internacionales, debe demorarse quizá unos 3 años mas para obtener su respectivo permiso de investigación y/o su contrato de Acceso a Recurso Genético y así legalmente puede iniciar su investigación.

El reto que le queda al gobierno nacional para que por intermedio del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial o para el nuevo Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, es reducir de una manera sustancial el proceso de obtención de un permiso de investigación, quizá logrando que el investigador tan solo registre su proyecto mediante una pagina web, y así obtiene su permiso de investigación, tal cual ocurre en Brasil y articular con el Ministerio del Interior y Justicia el tiempo de respuesta para la certificación de la existencia de las comunidades y el proceso de la consulta previa con las comunidades étnicas, para que los proyectos de investigación que tiene que ver con el conocimiento conservación y uso de nuestra biodiversidad que adelantan cerca de 3000 investigadores colombianos desde los principales centros de investigación de las Universidades y los institutos de investigación se puedan llevar a cabo de lo contrario el país segura perdiendo recursos y las políticas anunciadas por el presidente Juan Manuel Santos en el incremento de la inversión en investigación no servirá para nada, por que la final es mas fácil no hacer investigación.

De igual forma el MADS debe iniciar una pronta respuesta a la solicitud que recientemente el Instituto Humboldt y varios investigadores de los principales centros académicos de Colombia realizaron para la modificación de parte del Decreto 309 del 2000 que tiene que ver con el tema del registro de las colecciones biológicas, el permiso de importación y exportación de material de las colecciones, propuesta que se presento ante el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Sostenible por parte del Instituto Humboldt pero nunca se recibió una respuesta. Colombia es el único país del mundo que le exige a los investigadores que quieren solicitar o enviar en calidad de préstamo ejemplares que están depositados en dicha colección un permiso de investigación, según sea el caso, así mismo si alguna institución o investigador, necesitaba transportar dentro de la ciudad o entre ciudades, ejemplares depositados en Colecciones biológicas debe solicitarle al Ministerio de Ambiente un permiso de investigación y luego un permiso de movilización, con las implicaciones.

## Conclusiones

Las cifras sobre la riqueza de las especies de fauna y flora que presenta Colombia tanto en su territorio continental como

marino la coloca en un lugar privilegiado entre los países mas ricos del mundo entero, así es que de las 35.476 especies de fauna que viven en Colombia, 395 están amenazadas, y de las 27.881 especies de plantas, 1.178 están amenazadas.

De los 80 millones de hectáreas de Ley 2 de 1959 que se establecieron originalmente tan solo existen 65 millones a la fecha, es decir que queda el 80 % de bosques bajo esta categoría, se han realizado cerca de 14 millones de ha de sustracciones, no es entendible por que aun el MAVDT continua autorizando la sustracción de áreas bajo figura de protección y lo peor, bajo que criterios avala estas solicitudes.

Entre 1987 y 2002 la tasa de deforestación es de 221.000 hectáreas al año y la pérdida estimada es de 3.315.135 hectáreas en total del periodo

Colombia posee 5 Reservas de la Biosfera (los Parques Nacionales Naturales de Seaflower, Islas de San Andrés y Providencia, Ciénaga Grande de Santa Marta, Sierra Nevada de Santa Marta, El Tuparro, y el Cinturón andino localizado en el Macizo Colombiano que incluye los Parques Nacionales Naturales de Cueva de los Guacharos, Puracé y Nevado del Huila.

Colombia posee 3 humedales Ramsar, Ciénaga Grande de Santa Marta, Delta del río Baudó y la Laguna de la Cocha.

En el territorio nacional hay declaradas 3 Parques Nacionales Naturales declarados como Patrimonio Natural de la Humanidad: El Tuparro, Utría y Serranía de Chiribiquete.

El 26% de las especies amenazadas se encuentran en el sistema de áreas protegidas del Sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia y el 14% están en red de reservas de la Sociedad Civil y en reservas municipales.

Colombia posee 56 áreas protegidas declaradas hasta el 2010, lo que equivale a 12'602.320 hectáreas declaradas (11390.994 ha terrestres y 1'211.325,78 ha marinas), lo que corresponde al 9.98% del territorio terrestre y 1.30% del territorio marino.

Colombia tiene registradas 5.200.000 hectáreas de comunidades afrodescendientes, y 22'986.074 hectáreas de resguardos indígenas.

En Colombia hay 1'933.041 hectáreas de zonas de páramos, representadas en 34 páramos de los cuales 19 de estos están localizados total o parcialmente en las 56 áreas protegidas del Sistema de Parques Nacionales Naturales.

Se desconoce el número de especies endémicas de peces, tanto marinos como dulceacuícolas, así como de la

mayoría de los grupos de invertebrados a excepción de mariposas, de todos los grupos marinos.

Colombia ocupa en riqueza de especies, dentro de los países megadiversos el 4<sup>o</sup> lugar en diversidad de plantas, 5 en mamíferos, 1<sup>o</sup> lugar en aves, 3<sup>o</sup> en reptiles, 2<sup>o</sup> en anfibios, 2<sup>o</sup> en peces dulceacuícolas y 2<sup>o</sup> en mariposas.

Colombia dentro de los países megadiversos esta ubicada en relación con los endemismos en 8<sup>o</sup> lugar en plantas, 9<sup>o</sup> en mamíferos, 6<sup>o</sup> en aves, 7<sup>o</sup> en reptiles, 2<sup>o</sup> en anfibios y 2<sup>o</sup> en mariposas.

La mayoría de los títulos autorizados y las solicitudes mineras en Colombia corresponden en gran parte a las zonas protegidas y zonas de páramo (Figura 3).

Continúa la pérdida de bosques a un ritmo acelerado, aunque a nivel global en algunos países la deforestación se ha hecho más lenta, pero en América del Sur se sigue registrando la mayor pérdida neta de bosques y en Colombia la situación no es contraria debido a la conversión de los bosques en tierras agrícolas, ganaderas, causas naturales por el abandono de las prácticas tradicionales agrícolas provoca la pérdida de paisajes culturales y de la biodiversidad vinculada a ellos.

Los hábitats terrestres han sido fragmentados, lo que amenaza la viabilidad de las especies y su capacidad de adaptarse al cambio climático.

Las comunidades étnicas desempeñan un papel muy importante en la conservación de zonas significativas de gran biodiversidad y valor cultural, pero si no se cambia el procedimiento de la consulta previa para desarrollar actividades de investigación con fines científicos, esta se puede convertir en un instrumento perverso y llevaría a coadyuvar a la pérdida de biodiversidad ya que en promedio este tipo de procesos en Colombia gasta 3.5 años y mientras no se surta de manera positiva este proceso no es posible la obtención de un permiso de investigación o un contrato de acceso a recurso genético en el territorio nacional.

En los últimos 50 años los ecosistemas han cambiados más rápidamente que en cualquier otro periodo de tiempo en toda la historia de la humanidad y dos terceras partes de los servicios ecosistémicos que estos generan han se han degradado.

Como indica Guhl, 2010 para cerrar la brecha entre desarrollo y medio ambiente es importante integrar las variables ambientales con las de desarrollo para así poder crear "territorios sostenibles".

La riqueza de especies y los endemismos son quizá el patrimonio más importante que tiene el país; por ello, el gobierno nacional debe establecer una política de Estado que le permita a Colombia liderar el tema y convertirse en referente para las demás naciones.

Hay un deterioro ambiental sin precedentes que está generando cambios globales, destrucción de ecosistemas, extinción de especies, agotamiento de los recursos naturales, contaminación de agua, suelo, aire y enfermedades emergentes que afectan todas formas de vida, en esta crisis ambiental que amenaza a la humanidad; las poblaciones más pobres son las más vulnerables a desastres naturales. Sin lugar a dudas se está generando inseguridad social, fragilidad económica, migraciones, desplazamientos humanos y conflictos por el acceso a los recursos.

Es necesario controlar la devastación de los páramos y de los humedales, así como las acciones mineras en zonas de conservación del territorio nacional. No puede primar un interés económico y comercial sobre la importancia de esta protección y/o la declaratoria de nuevas áreas protegidas.

Se debe fomentar el ahorro de energía y favorecer la producción y uso de energías renovables, alternativas y amigables con el ambiente. Solo así se podrá hacer una apuesta vital por la conservación de la biodiversidad en el territorio nacional.

### Agradecimientos

A mi esposa Ángela Suarez por todo su apoyo incondicional y la idea de este análisis, a mis hijas, Sofía y Elisa por su compañía en medio de sus ajenas, cortas vidas, ellas tres son mi todo para mí. Al Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia,

A sí mismo a los evaluadores, que con sus comentarios lograron enriquecer el contenido y análisis de los datos de la biodiversidad colombiana.

Finalmente a Enrique Forero, por su amistad y constante apoyo.

### Literatura citada

Amat, G. G., M.G. Andrade-C., E.C. Amat. (eds.). 2007. Libro Rojo de Invertebrados Terrestres de Colombia. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Conservación Internacional Colombia, Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 216 p.

Andrade-C., M.G. 2001. Biodiversidad y conservación de la fauna colombiana. Pp.35-47. En: P. Muñoz (Ed.) Memorias. Pri-



- mer Congreso Colombiano de Zoología. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D. C.
- Andrade-C., M.G.** 2010. Deuda histórica con el medio ambiente. 59 – 63 pp. Tomo V. Para pensar Colombia. Universidad Nacional de Colombia – Revista Semana. 74 p.
- Batista-Morales, A.M., C.M. Díaz.** 2010. Estado de los Litorales Roccosos, 133 – 158. En INVEMAR. Informe del Estado de los Ambientes y Recursos Marinos y Costeros en Colombia: Año 2009. Serie de Publicaciones Periódicas No. 8. Santa Marta, 319 p.
- Bernal, R., S.R., Gradstein, & M. Celi,** (eds.). 2007. Catálogo de las Plantas de Colombia: Cifras preliminares de la flora de Colombia. <http://rgbernalg.googlepages.com/cifraspreliminaresdelafloreadec>
- Calderón-Sáenz, E.** (ed.). 2007. Libro Rojo de las Plantas de Colombia. Volumen 6. Orquideas, Primera parte. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Instituto Alexander von Humboldt - Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 828 p.
- Calderón, E., N., G. Galeano, & N. García.** (eds.). 2002. Libro Rojo de Plantas de Colombia. Volumen 1: Chrysobalanaceae, Dicapetalaceae y Lecythidaceae. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Instituto Alexander von Humboldt - Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia – Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 220 p.
- Calderón, E., N., G. Galeano, & N. García.** (eds.). 2005. Libro Rojo de Plantas de Colombia. Volumen 2: Palmas, Frailejones y Zamias. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Instituto Alexander von Humboldt - Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia – Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 454 p.
- Camacho, R.N., K. Gómez, J.C. Vega y T. López.** 2010. Estado de los Arrecifes Coralinos, 75 – 100. En INVEMAR. Informe del Estado de los Ambientes y Recursos Marinos y Costeros en Colombia: Año 2009. Serie de Publicaciones Periódicas No. 8. Santa Marta, 319 p.
- Cárdenas, L.D., & N.R. Salinas.** (eds.). 2007. Libro Rojo de las Plantas de Colombia. Volumen 4. Especies maderables amenazadas: Primera parte. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI - Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 232 p.
- Castaño-Mora, O.V.** (Ed.). 2002. Libro Rojo de Reptiles de Colombia. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 160 p.
- Chaves, M.E., & N. Arango.** (eds.) 2006. Informe sobre el avance en el conocimiento y la información de la biodiversidad 1998 – 2004. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2 tomos. Bogotá D. C.
- Díaz, M., M. Garrido, N. Rodríguez, L.M. Mejía y J. Cantera.** 2010. Diversidad de Especies Marinas, 213 – 246. En INVEMAR. Informe del Estado de los Ambientes y Recursos Marinos y Costeros en Colombia: Año 2009. Serie de Publicaciones Periódicas No. 8. Santa Marta, 319 p.
- Fernaández, F.** 2000. Sistemática de los himenópteros de Colombia: estado del conocimiento y perspectivas. Pp. 233-243. En: Martín- Piera, F., J. J. Morrone, y A. Melic, (Eds.). Hacia un proyecto CYTED para el inventario y estimación de la diversidad entomológica en Iberoamérica: PrIBES. m3m-Monografías Tercer Milenio, vol. 1, Sociedad Entomológica Aragonesa (SEA), Zaragoza.
- García, N.** (ed.). 2007. Libro Rojo de Plantas de Colombia. Volumen 5: Las magnoliáceas, las miristicáceas y las podocarpaceas. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Instituto Alexander von Humboldt – CORANTIOQUIA – Jardín Botánico Joaquín Antonio Uribe de Medellín – Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia – Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 236 p.
- García, N., & G. Galeano.** (eds.). 2006. Libro Rojo de Plantas de Colombia. Volumen 3: Las bromelias, las labiadas y las pasifloras. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Instituto Alexander von Humboldt - Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia – Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 679 p.
- Gómez, D.I., J.C. Vega y R. Navas.** 2010. Estado de las Praderas de Pastos Marinos., 121 – 132. En INVEMAR. Informe del Estado de los Ambientes y Recursos Marinos y Costeros en Colombia: Año 2009. Serie de Publicaciones Periódicas No. 8. Santa Marta, 319 p.
- Guevara-Mancera, O.A., H. Sánchez-Páez, G.O. Murcia-Orjuela, H.E. Bravo-Pazmino, F. Pinto.Nolla y R. Alvarez-León.** 1998. Conservación y uso sostenible de los manglares del Pacífico colombiano, In: Sánchez-Páez, H.O.A. Guevara-Mancera & R. Alvarez-León (eds.) Proy. PD171/91 Rev. 2 Fase II (Etapa I) Conservación y Manejo para el Uso Múltiple y el Desarrollo de los Manglares de Colombia, MINAMBIENTE / ACOFORE / OIMT. Santafé de Bogotá D.C., (Colombia).
- Guhl, N.E.** 2011. Bases para un Manifiesto Ambiental. [http://www.razonpublica.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1741:bases-para-un-manifiesto-ambiental&catid=20:economia-y-sociedad&Itemid=29](http://www.razonpublica.com/index.php?option=com_content&view=article&id=1741:bases-para-un-manifiesto-ambiental&catid=20:economia-y-sociedad&Itemid=29)
- Instituto Alexander von Humboldt.** 2011. Biodiversidad en cifras. [http://www.siac.net.co:8088/web/sib/cifras#Cantidad\\_de\\_especies](http://www.siac.net.co:8088/web/sib/cifras#Cantidad_de_especies)
- Linares, E.L., J. Uribe-Meléndez.** (eds.). 2002. Libro Rojo de las briófitas de Colombia. Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia – Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 170 p.
- Mejía, L.S. y A. Acero.** (eds.). 2002. Libro Rojo de Peces Marinos de Colombia. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. INVEMAR, Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 174 p.

- Mojica, J.I., C. Castellanos, S. Usma y R. Álvarez** (eds.). 2002. Libro Rojo de Peces dulceacuícolas de Colombia. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 288 p.
- Morales M., J. Otero, T. Van der Hammen, A. Torres, C. Cadena, C. Pedraza, N. Rodríguez, C. Franco, J.C. Betancourth, E. Olaya, E. Posada, L. Cárdenas.** 2007. Atlas de páramos de Colombia. Instituto de investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D.C., 208 p.
- Orjuela, A., R. Ricardo, C. Villamil y L. Perdomo.** 2010. Estado del conocimiento de los Manglares, 101 – 120. En INVEMAR. Informe del Estado de los Ambientes y Recursos Marinos y Costeros en Colombia: Año 2009. Serie de Publicaciones Periódicas No. 8. Santa Marta, 319 p.
- Renjifo, L.M., A.M. Franco-Maya, J.D. Amaya-Espinel, G.H. Kattan y B. López-Lanús.** (eds.). 2002. Libro Rojo de las Aves de Colombia. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Instituto Alexander von Humboldt & Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 562 p.
- Rodríguez-M., J.V., M. Alberico, F. Trujillo & L. Jorgenson.** (Eds.). 2006. Libro Rojo de los Mamíferos de Colombia. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Conservación Internacional Colombia & Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 433 p.
- Rudas, G., M. Darwin, D. Armenteras, N. Rodríguez, M. Morales, L.C. Delgado y A. Sarmiento.** 2007. Biodiversidad y actividad humana: relaciones en ecosistemas de bosque subandino en Colombia. Instituto de Investigación de recursos biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D.C., Colombia 128 p.
- Rudas, G.** 2010. *Política Ambiental del Presidente Uribe, 2002-2010. Niveles de prioridad y retos futuros.* Consejo Nacional de Planeación, Bogotá, D.C. 63 p.
- Rueda-Almonacid, J.V., J.D. Lynch, A. Amézquita.** (Eds.). 2004. Libro Rojo de Anfibios de Colombia. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Conservación Internacional Colombia, Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia & Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 384 p.
- Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica.** 2010. *Perspectiva Mundial sobre la Diversidad Biológica 3.* Montreal. 94 p.
- Walter, V.R., H. A. Mooney, A. Cropper, D. Capistrano, S. R. Carpenter, K. Chopra, P. Dasgupta, T. Dietz, A. Kumar Duraiappah, R. Hassan, R. Kaspersen, R. Leemans, R. M. May, T. (A.J.) McMichael, P. Pingali, C. Samper, R. Scholes, R. T. Watson, A.H. Zakri, Z. Shidong, N. J. Ash, E. Bennett, P. Kumar, M. J. Lee, C. Raudsepp-Hearne, H. Simons, J. Thonell, and M. B. Zurek.** 2011. Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Informe de Síntesis. <http://www.maweb.org/documents/document.439.aspx.pdf>

Recibido: febrero 16 de 2011.

Aceptado para su publicación: diciembre 15 de 2011.



# EL RUIDO VEHICULAR URBANO: PROBLEMÁTICA AGOBIANTE DE LOS PAÍSES EN VÍAS DE DESARROLLO

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

## Resumen

**Ramírez González, A., E. A. Domínguez Calle:** El ruido vehicular urbano: problemática agobiante de los países en vías de desarrollo. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (137): 509-530, 2011. ISSN 0370-3908.

El ruido vehicular se ha constituido en una problemática ambiental creciente que se expresa mayormente en las ciudades modernas y al cual se le ha prestado poca atención en los países en vías de desarrollo. Tal situación ha motivado a los autores del presente documento, a realizar un acercamiento al estado del arte de esta problemática, procurando no sólo una revisión amplia y rigurosa que identifica sus principales causas y consecuencias, sino también, sus soluciones a la luz del contexto propio de los países en vías de desarrollo.

**Palabras clave:** contaminación acústica, ruido vehicular, riesgos de salubridad, mitigación del ruido vehicular, ecología urbana.

## Abstract

Traffic noise has become an environmental growing problem that happen mainly in modern cities having not enough attention in the third world. This issue has motivated the authors to put in writing a view of the state of the art of the problem, through a wide and rigorous review that, in the first side, identify its causes and consequences, and in the other, its solutions in the context of developing countries.

**Key words:** acoustic pollution, traffic noise, health risks, traffic noise mitigation, urban ecology.

<sup>1</sup> 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.

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

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

## 1. Introducción

La contaminación urbana de los países en vía de desarrollo podría parecer a simple vista un tema trivial e intrascendente, si no fuese porque la población que albergan muestra un crecimiento exponencial superior al nacional y al mundial (**Naciones Unidas**, 2004),

A la contaminación por ruido, de manera particular, se le ha prestado muy poca atención por cuanto la condición emerge lentamente, rara vez requiere de atención médica inmediata y no es fatal. Sin embargo y, a manera de ejemplo, entre 1980 y 1990 por lo menos 4 millones de trabajadores en Estados Unidos fueron expuestos a niveles de ruido conducentes a la pérdida auditiva (**Committee to Review the NIOSH Hearing Loss Research Program**, 2006).

El ruido proveniente del transporte vehicular constituye la principal fuente emisora de este contaminante en las ciudades, producto de la necesidad de movilización diaria de millones de personas a la escuela o al trabajo, además de los requerimientos de transporte para soporte del sistema industrial, comercial, de servicios y administrativo. Mientras una conversación normal transcurre aproximadamente a 55 decibeles (dBA) (**Gandía**, 2003), el ruido vehicular de muchas ciudades del mundo alcanza entre 80 y 90 dBA, equiparándose incluso en algunos casos, con el de un taladro neumático. Tal situación ocasiona diversos impactos ambientales a los cuales, con frecuencia, las autoridades ambientales prestan ninguna o muy poca atención.

En el presente artículo se aborda esta problemática ambiental iniciando con el concepto de *ruido* por la subjetividad propia de éste, seguido por las causas y direccionadores, los resultados de mediciones en diversas ciudades alrededor del mundo y los impactos ambientales que ocasionan; termina con la exposición y evaluación de algunas de las medidas más utilizadas para su mitigación.

## 2. El concepto de ruido

### Apreciación objetiva

El sonido en un sentido físico, constituye la propagación de energía (sonora) por un movimiento ondulatorio en un medio elástico. Entre sus principales características se encuentran las siguientes (**Efron**, 1971; **Harris**, 1985; **Kinsler et al.** 1995):

- *Frecuencia*, se refiere al tono alto o bajo de un sonido y su unidad de medida son los Hertz (Hz) o ciclos por segundo. El hombre escucha entre aproximadamente 20 Hz a 20.000 Hz, aunque los adultos pierden audición en las frecuencias altas y su umbral auditivo se

sitúa hacia los 15.000 Hz. La audición es mayor en el rango de 500 a 8.000 Hz, lo que significa que no escuchamos por igual a todas las frecuencias, de allí que la mayoría de mediciones de ruido a través de sonómetros, se realizan con un sistema de ponderación *A*, que emula al oído humano y de allí la denotación *dBA*. Vale añadir que las frecuencias bajas se asocian con longitudes de onda largas y viceversa.

Niveles entre 10 y 20 Hz se conocen como infrasonidos y entre 12.500 y 40.000 Hz como ultrasonidos, los cuales son escuchados por diferentes especies animales.

- *Intensidad*, podríamos decir en lenguaje corriente, que se trata del volumen con que escuchamos un sonido. Podemos oír una gran amplitud de niveles de presión sonora que van desde  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> hasta 10 W/m<sup>2</sup>; pero, para mayor simplicidad, esta escala ha sido modificada a logaritmos y equivale a un rango de 0 a 140 dBA, unidad más ampliamente utilizada. La intensidad corresponde a una medida valorada respecto a un umbral de referencia ( $I_0 = 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>) así: Bel = Log ( $I/I_0$ ); Decibel = 10 Log ( $I/I_0$ ).

Cabe referir que el oído humano es más sensible a las variaciones de frecuencia que a las de intensidad, y aunque se requiere de un cambio cercano a 5 dBA para que éste sea perceptible, un cambio de 10 dBA se percibe como el doble de ruidoso (**Minnesota Pollution Control Agency**, 1999). Los niveles sonoros de algunos sonidos se ilustran en la Figura 1.

- *Patrón de tiempo*, se refiere a cómo se manifiestan los sonidos en el tiempo. Incluye si es continuo, intermitente, impulsivo o fluctuante.
- *Timbre*, podría decirse que es la huella digital o característica particular que define e identifica a un sonido y que lo diferencia de otros sonidos.

Para la evaluación del ruido producido por los vehículos se han definido algunos descriptores que evalúan la intensidad o el nivel de presión sonora, los cuales han sido acogidos y utilizados en la mayor parte del mundo. Son ellos (**EPA-US**, 1974, 1978; **EC**, 2000; **Abbott y Nelson**, 2002; **FHWA**, 2004; **Austroroads**, 2005; **Abbott y Stephenson**, 2006; **FTA**, 2006):

1. *Nivel de sonido equivalente con ponderación A*: se refiere a la amplitud promedio de un sonido ocurrido durante un lapso de tiempo y se expresa como  $L_{Aeq}$ . Este descriptor fue elegido para evaluar el ruido vehicular por cuanto correlaciona muy bien con la molestia que expresan las personas y, a la vez, por

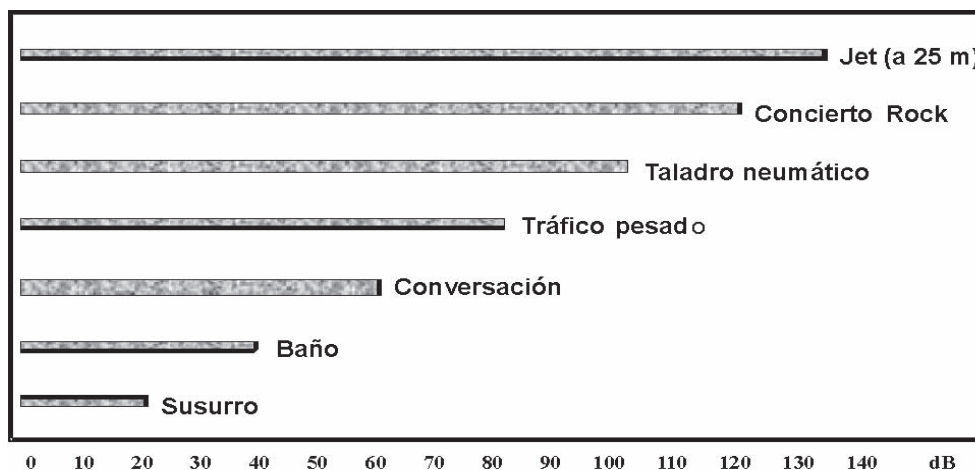


Figura 1. Intensidad de distintos sonidos en decibeles (con base en: Minnesota Pollution Control Agency, 1999).

cuanto integra el conjunto de sonidos o ruidos incluidos los niveles máximos y mínimos.

2.  $L_{day-night}$  o  $L_{dn}$ : con este descriptor se busca establecer los niveles  $L_{Aeq}$  para el ciclo diario de 24 horas, en el cual se penalizan las mediciones nocturnas con 10 dBA sobre los valores medidos, por la mayor molestia que genera a dichas horas. Usado en Estados Unidos con un horario de día (d) de 7 am a 10 pm y de noche (n) de 10 pm a 7 am.
3.  $L_{day-evening-night}$  o  $L_{den}$ : descriptor que disocia las mediciones de los horarios de día (d), tarde (e) y noche (n); se penaliza la tarde con 5 dBA y la noche con 10 dBA. Acogido en la Unión Europea con los siguientes horarios: 7 am a 7 pm para día; 7 pm a 11 pm para tarde; y 11 pm a 7 am para noche.
4.  $L_{noche}$  o  $L_n$ : descriptor que valora únicamente el ruido nocturno y no lleva penalización. También fue acogido por la Unión Europea.

Otros descriptores usados incluyen el nivel máximo ( $L_{Máx}$ ) (Rylander y Björkman, 2002) y los percentiles  $L_1$ ,  $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{90}$ ,  $L_{95}$  y  $L_{99}$ . Los tres primeros indican picos de ruido, los tres últimos el ruido de fondo y el cuarto corresponde a la mediana.

### Apreciación subjetiva

El ruido se define como una combinación desordenada de sonidos que produce una sensación desagradable, molesta e indeseable para las personas que lo escuchan, y

no existe una diferencia objetiva física medible que disocie al sonido del ruido. Las personas responden de forma distinta ante una misma fuente sonora, lo que le confiere características de representación variable, e incluso tales representaciones pueden modificarse a lo largo de la vida de las personas o durante un mismo día según las actividades en desarrollo (OMS, 1999).

Estudios realizados en las ciudades de Nantes y Lyon donde se midió el ruido ambiental a la vez que se indagó de forma simultánea sobre el nivel de molestia de la población, demostraron que ante condiciones sonoras similares hay alta variación en las respuestas según el lugar donde se llevan a cabo las mediciones (mercados, vías peatonales, etc.) y según las actividades que las personas se encuentran realizando (Raimbault *et al.*, 2003). Raimbault y le Dubois (2005) recalcan que diversos estudios han mostrado la incidencia multisensorial de las personas respecto a su entorno, tal como ocurre por ejemplo, en los parques, donde los ruidos molestos son subjetivamente compensados por otros más naturales. Los lugares donde priman paisajes vehiculares, son percibidos con mayor molestia.

De igual modo, experimentaciones de laboratorio han encontrado que la percepción humana es multisensorial y que entre más urbanizado esté el ambiente, es menos placentero; dentro de un conjunto de sonidos examinados, el canto de las aves ha sido el preferido y el ruido vehicular el más molesto ( $p < 0,001$ , Viollon *et al.*, 2002) y hay también preferencias por las imágenes con vegetación y los sonidos de agua, frente a sonidos tecnológicos (Carles *et al.*, 1999).

Encuestas realizadas en Estocolmo han encontrado que quienes viven cerca a áreas verdes (menos de 400 m) y hacen uso regular de éstas, expresan mayor bienestar y menor molestia y estrés ante el ruido vehicular, lo cual denota que las zonas verdes ejercen más importancia en la percepción del ruido, que el mismo ruido (**Gidlö-Gunnarsson y Öhrström, 2007**). Estos autores explican dicho resultado en el alto nivel de aprecio que tienen las personas sobre su vecindario, situación que compensa y desvía la atención de los problemas ambientales, por lo que sugieren como aspecto importante de la planificación urbana, la presencia de zonas verdes.

Por lo anterior, la percepción de molestia es particular a cada persona y depende, además, de su estado de ánimo, del lugar donde se encuentre o de las actividades que esté realizando, entre otros (Figura 2). Además, la reacción de la gente depende, en gran medida, de su historial previo (**Harris, 1985**).

Debido a la subjetividad propia de la percepción del ruido y para evaluar éste de forma más objetiva, en particular en lo atinente al ruido producido por aviones y automóviles, se recurrió a evaluar el porcentaje de personas que indica molestia ante un nivel sonoro dado. Un amplio recuento de la evolución y los estudios que rodearon esta propuesta formulada por Schultz en 1978, puede ser consultada en **Fidell (2003)**. La misma surgió en Estados Unidos a partir del incremento del ruido por tráfico aéreo durante las décadas de los 50 y 60. Dos aspectos importantes sobre los que llama la atención Fidell se refieren, por un lado, a que aún hay discrepancias de si es más apropiado trabajar con la molestia o con las quejas presen-

tadas por la comunidad y, por el otro, a la alta variabilidad que se ha encontrado en las respuestas de la población ante un mismo nivel de ruido, ya que ello demuestra la incidencia de aspectos no acústicos en la valoración del ruido, situación que ocasiona dificultades en cuanto a la definición de normativas.

### 3. El ruido vehicular

#### Causas y direccionadores

Se ha encontrado que existe una relación directa y exponencial entre el nivel de desarrollo de un país y el grado de contaminación acústica que impacta a su población, ello por cuanto aumenta el número de vías y el tráfico vehicular, así como el ruido proveniente del sector industrial (**OMS, 1999**).

En Estados Unidos la principal fuente externa de ruido es el transporte, seguido de la industria, la construcción, diversas actividades humanas y los animales (**EPA-US, 1978**). El crecimiento poblacional y urbano ha sido un aspecto relevante de la contaminación por ruido vehicular en este país, al punto que la USEPA propuso la siguiente ecuación para estimar el nivel de ruido:

$$L_{dn} = 22 + 10 \text{ Log } \{ \text{Densidad poblacional} \} \quad (1)$$

Donde: la densidad poblacional está expresada en individuos por milla cuadrada.

En tanto el 14% de las personas vivía en las urbes hace un siglo (**Naciones Unidas, 2001**), hoy lo hace el 50%, aunque en algunos países desarrollados ya habita entre el 75

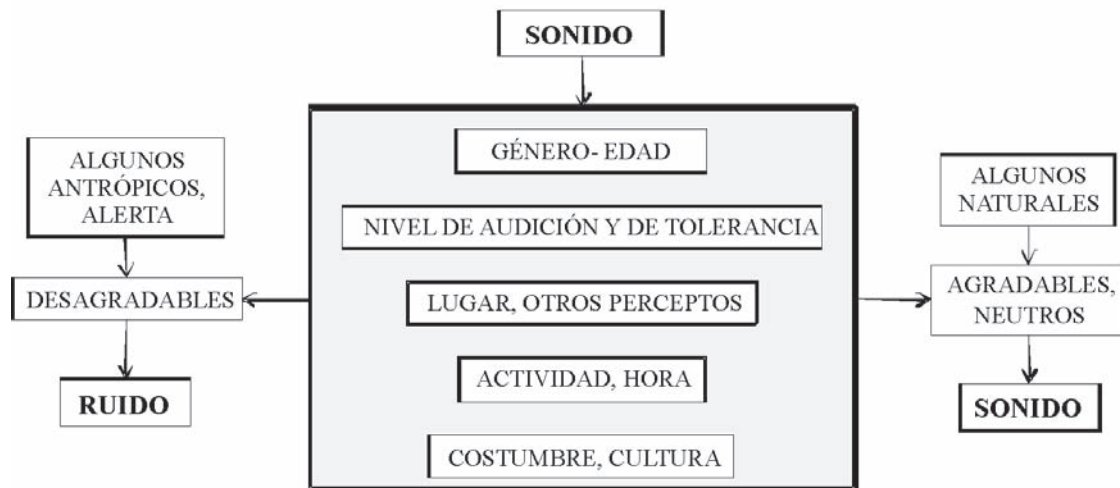


Figura 2. Aspectos que inciden en la valoración de un sonido.

y 80% de su población en estos sistemas (**Naciones Unidas**, 2004). La urbanización es un fenómeno mundial en avance en el que se adicionarán un millón de kilómetros cuadrados a las áreas urbanas en los próximos 25 años (**McDonald**, 2008), con las mayores tasas de crecimiento en los países en desarrollo (2,3% anual frente a 0,5% en países desarrollados).

Estudios concernientes con el incremento total de recorrido vehicular en las ciudades, han encontrado entre sus causas principales, el incremento de la población, la expansión urbana, el incremento de propietarios de vehículos principalmente privados y la reducción de la ocupación vehicular, situación que ha venido creciendo desde la década de los 60. Por su parte, las causas principales del incremento del uso vehicular privado incluyen: el crecimiento económico familiar, el que las personas perciben a los autos como un bien superior y la baja calidad del transporte público (**Cameron et al.**, 2004). Cabe señalar que estos autores destacan alta variabilidad de los medios de transporte en diferentes ciudades del mundo tal como se ilustra a continuación:

- Ciudades donde ha ocurrido un crecimiento vehicular desmedido como Phoenix o Perth.
- Ciudades donde ha ocurrido un crecimiento vehicular controlado como Singapur o Hong Kong. En ellas se han tomado medidas tales como altos impuestos a la compra, registro y uso del vehículo; peajes; restricciones por áreas y horas; restricciones a baja ocupación.
- Ciudades que han planificado su funcionamiento procurando una densidad baja de automóviles como Estocolmo, Múnich o Nueva York. Entre las medidas que han implementado para tal fin se encuentran, vías peatonales, sistema de metro y tren, y planificación y diseño urbano.

Estos resultados son muy importantes porque evidencian que si se proyectan adecuadamente las ciudades, se puede romper la relación entre número de habitantes y número de vehículos, por lo que el deterioro ambiental implícito en el transporte vehicular, puede prevenirse en beneficio de la calidad de vida urbana.

El estudio de los patrones de contaminación atmosférica de Estambul (Turquía), mostró que la infraestructura de transporte y urbanización existente juegan un papel importante en el crecimiento urbano y con ello en la distribución de la contaminación de origen vehicular. En dicha ciudad se ha alcanzado un vehículo por cada cinco habitantes y la

contaminación atmosférica respectiva se incrementó entre 50 y 83% de 1990 a 2000 (**Demirel et al.**, 2008).

**Frank et al.** (2000) en estudios que relacionan el uso de la tierra y las emisiones atmosféricas en la ciudad de Seattle, encontraron que la densificación urbana como elemento de la planificación, contribuye a reducir los problemas de contaminación derivados del transporte vehicular, por cuanto la movilización total resulta más baja que en ciudades con amplia expansión.

Por otro lado, estudios de tráfico y ruido vehicular en la ciudad de Beijing, mostraron que el diseño vial juega un papel importante en el ruido urbano. Es así como la ciudad cuenta con anillos viales sucesivos alrededor del centro, y la implementación de los mismos modificó los patrones del tráfico pesado; con ello los niveles de ruido se aumentaron en la periferia pero se redujeron en el centro (**Li y Tao**, 2004). En esta ciudad el crecimiento de automóviles ha alcanzado una tasa anual de 11% durante los últimos treinta años (**Li et al.**, 2002).

Estudios realizados en la ciudad de Phoenix han encontrado que la principal causa de ruido deviene del transporte y que el nivel de ruido promedio en los parques es mayor en cercanías del centro donde, por demás, el nivel de ingresos de la población es más bajo. Adicionalmente, se ha encontrado relación directa entre la edad del barrio y la composición étnica, con los niveles de ruido (**Warren et al.**, 2006).

Para reducir los efectos del ruido vehicular, **Chiquetto** (1997) propuso la planificación de la ciudad de Chester (Inglaterra) sobre la base de vías peatonales donde los niveles de ruido superaban 80 dBA. Para ello empleó modelos de simulación de escenarios de tráfico vehicular, contaminación acústica y contaminación atmosférica, encontrando que dicha propuesta conduce a la reducción de los tiempos de: viaje (3%), consumo de combustible (5%), ruido (50%) y contaminación atmosférica (70 a 80%), además del incremento de la velocidad de movilización (3%). Adiciona el autor, que los resultados son muy significativos si también se tiene en cuenta el ahorro por descontaminación y los beneficios de los ciudadanos ante tales medidas.

Una idea similar cursó en Canadá pero enfocada al uso de bicicletas como transporte regular de la población. Para ello se indagó en aproximadamente 60.000 personas por vía telefónica, sobre la disposición a usar este medio de transporte en lugar de los vehículos de combustión, encontrándose que el 7,9% de los encuestados reportó el uso de bicicletas en sus desplazamientos regu-



lares (principalmente estudiantes). No obstante, se reconoció también baja disposición del público ante dicho transporte a causa de la lluvia, bajas temperaturas, distancias largas, baja experiencia, seguridad, tráfico, topografía y ciclovías existentes. La menor disposición se registró en la población de mayor edad y en las mujeres (Winters *et al.*, 2007).

La Figura 3 sintetiza las principales causas y los direccionadores que hacen parte del problema de contaminación acústico urbano vehicular.

**Variables incidentes**

De manera general, las variables que se han considerado como las más importantes en diferentes modelos matemáticos y estadísticos para la estimación del ruido vehicular, son el flujo, la proporción de vehículos pesados y la velocidad (Cammarata *et al.*, 1995; Arana *et al.*, 2000; FHWA, 2004; Li y Tao, 2004; Alimohammadi *et al.*, 2005; Austroads, 2005; FTA, 2006).

La primera es apenas obvia, en tanto más vehículos transitan de forma simultánea por una vía hay mayor cantidad de fuentes de emisión de ruido, y aunque el ruido no es aditivo en escala aritmética sino logarítmica, la adición de dos ruidos de igual intensidad incrementa el valor final en 3 dBA.

En relación con la velocidad y como regla general, se acepta que si se dobla ésta se incrementa el ruido de 9 a 12 dBA. Por tanto, mientras el flujo y la velocidad crecen en forma geométrica, el nivel de ruido medido en decibeles, lo hace en forma aritmética (Austroads, 2005). Así, por ejemplo, si se reduce la velocidad de un camión de 90 a 60 Km/h, se disminuye el nivel máximo de ruido en 5 dBA y el nivel equivalente en 4 dBA; un resultado similar ocurre si se reduce la velocidad de los carros de 140 a 100 Km/h (OMS, 1999).

Vale notar que la fricción entre el vehículo y el aire genera ruido que se incrementa con la velocidad y es superior al de fricción de las llantas a velocidades mayores a 60 Km/h (OMS, 1999). De igual modo, en los autos pequeños suele ser más importante el ruido proveniente de la interacción llanta-pavimento, mientras que en buses y camiones predomina el ruido de los motores (Meiarashi *et al.*, 1996). El ruido vehicular proveniente de la fricción entre las llantas y el piso está afectado por el número de llantas y su ancho (correlación +), el tamaño de la llanta (correlación -), el patrón de ranuras, la presión, los materiales con que ha sido construida la llanta y la presencia de agua en la vía (correlación +) (Austroads, 2005). El tipo de asfalto también es importante, y para reducir el ruido se emplean asfaltos porosos (Austroads, 2005), con el objeto de que absorban o refracten parte del ruido incidente. Estudios experimentales en tal

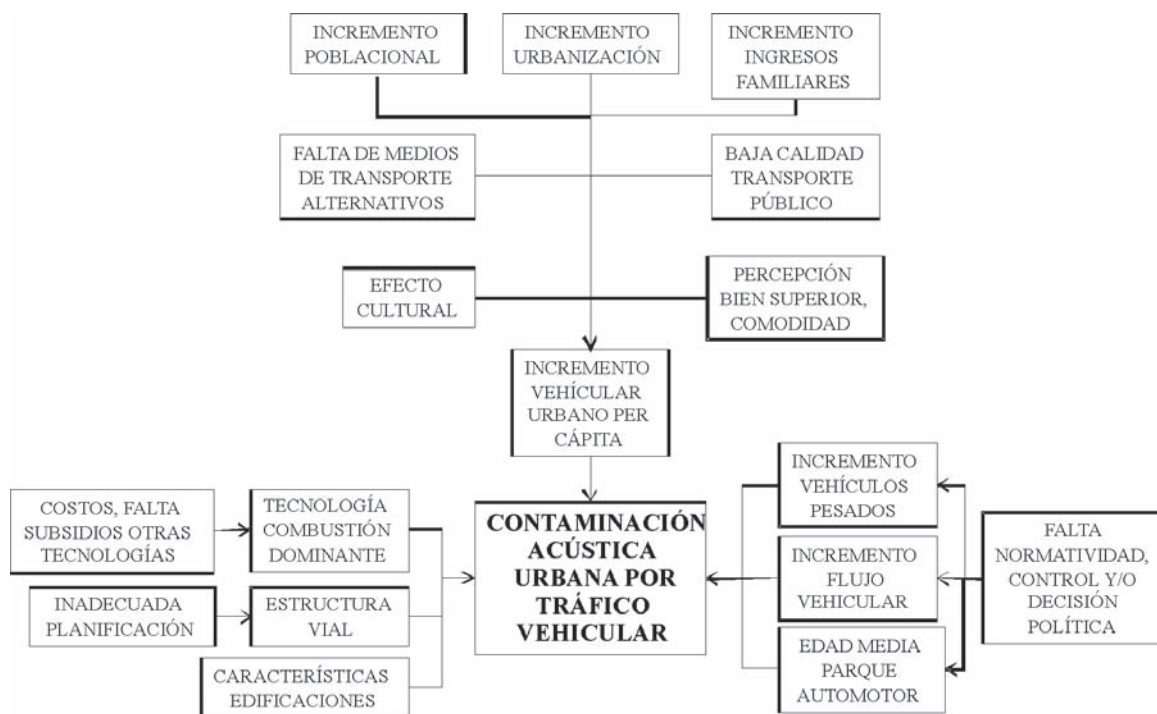


Figura 3. Causas y direccionadores de la contaminación acústica urbana de origen vehicular.

sentido, muestran que los asfaltos de grano mayor (ej. 13 mm) decrecen el nivel de ruido entre 3 y 7 dBA, siendo más importante el diámetro del agregado que el grosor del pavimento (**Meiarashi et al.**, 1996).

Como otras características de la vía que inciden en los niveles de emisión de ruido, se encuentran la inclinación, el diseño de la misma y las señales de tránsito incluida la semaforización. Esta última variable juega un rol muy importante pues conduce a una mayor cantidad de arranques y detenciones, condiciones ambas que generan mayores niveles de ruido, además que cambian el patrón de ruido continuo a cíclico, condición que requiere de distribuciones bi-Gaussianas para su estudio (**Can et al.**, 2007b).

Otras variables que inciden en el nivel del ruido proveniente del tráfico vehicular son el uso de bocinas y alarmas (correlación +), las características del motor y la transmisión, el escape, el mantenimiento del motor (correlación -), la aerodinámica (correlación -), los hábitos de manejo y la carga que se transporta (correlación +) (**OMS**, 1999; **Austroads**, 2005; **FTA**, 2006).

El nivel de ruido adyacente a las vías se ve afectado también por la mayor o menor facilidad de propagación, y en ello inciden la geometría de las vías, la organización del transporte y las estructuras presentes (**Janczur et al.**, 2006). A las anteriores cabría añadir los materiales empleados en dichas estructuras, pues se puede tratar de superficies que reflejen, refracten, absorban o difracten el ruido. De manera general, las superficies duras como el pavimento y el asfalto reflejan las ondas sonoras, mientras que las superficies blandas como el pasto, la hojarasca o la nieve, lo absorben. Por lo anterior, se escucha más fuerte un sonido cuando estamos cerca a superficies duras, pues llegan, por un lado, las ondas que se transmiten directamente hasta el receptor y, por otro, las que se reflejan en diversas superficies (pisos, fachadas, estructuras, etc.). En razón de lo anterior, la legislación europea ha planteado la corrección de las mediciones de ruido vehicular o ruido comunitario cuando éstas se realizan cerca a fachadas de edificaciones, por lo que se deben descontar 6 dBA cuando las mediciones se realizan a menos de 1 m de la fachada y 3 dBA si se realizan entre 1 y 2 m de ésta (**EC**, 2000; **Memoli et al.**, 2007).

Estudios de ruido vehicular realizados en Atenas, encontraron que la atenuación se ve disminuida en calles de cañón (estrechas y con edificaciones altas), y que inciden en tal característica el ancho de la vía, la altura de las edificaciones y la relación entre estas dos variables (**Nicol y Wilson**, 2004).

Así mismo, investigaciones realizadas en Beijing han encontrado diferencias de hasta 3,1 dBA entre unas y otras

vías, las cuales se explican tanto en el flujo vehicular, como en el pavimento, la estructura vial, el porcentaje de vehículos pesados y las actividades urbanas inherentes (**Li et al.**, 2002).

La vegetación arbustiva no constituye, a grandes rasgos, una buena barrera acústica, y por 10 metros de vegetación tupida disminuye la intensidad de 0,2 a 1,2 dBA para bajas y altas frecuencias en su orden (**Harris**, 1985); no obstante, **Bolund y Hunhammar** (1999) señalan niveles de atenuación de hasta 2 dBA para barreras de 5 m de ancho. Las áreas verdes, sin embargo, no sólo reducen la reflexión de las ondas sonoras, sino que tal y como se refirió previamente, reducen las percepciones molestas.

El nivel de ruido que llega al receptor depende, además, de la distancia a la cual se encuentra de la fuente emisora, y se reduce en fuentes puntuales 6 dBA cada vez que se duplica la distancia en campo libre y en ausencia de superficies reflectantes (**Harris**, 1985; **Austroads**, 2005). Para fuentes lineales como el tráfico, se reduce en 3 dBA el  $L_{Aeq}$  y el  $L_{dn}$ , y de 3 a 6 dBA el  $L_{Máx}$  (**FTA**, 2006).

Vale referir que la presión barométrica no afecta la atenuación del sonido, mientras que la incidencia de las condiciones meteorológicas es muy baja y, de manera general, la atenuación por el aire se reduce cuando aumenta la humedad. Sin embargo, las mediciones de ruido que se realizan a menos de 100 m de distancia, se consideran independientes de las condiciones meteorológicas (**Harris**, 1985).

### Niveles de exposición

En Estados Unidos más de 135 millones de personas (87%) viven en áreas con niveles día-noche iguales o superiores a 48 dBA; y 59 millones (mitad de la población urbana) soportan niveles de ruido vehicular de 60 dBA o más. En contraste, 16 millones viven en igual condición por ruido de aeronaves y 3,1 millones por autopistas con tráfico pesado (**EPA-US**, 1978).

Del mismo modo, se estima que 80 millones de personas en Europa viven expuestas a ruidos mayores a 65 dBA (áreas negras) y 170 millones viven entre 55 y 65 dBA (áreas grises) (**EC**, 1996). La Organización Mundial de la Salud (**OMS**, 1999) señala que cerca del 40% de la población de la Comunidad Europea está expuesta a ruidos diurnos provenientes del tráfico vehicular que exceden una presión sonora de 55 dBA; 20% a niveles que exceden 65 dBA; y 30% debe soportar niveles nocturnos superiores a 55 dBA. En adición, uno de cada cinco niños vive en zonas acústicas negras, condición que además de generar estrés, conduce a diversos problemas fisiológicos (**Belojevic et al.**, 2008).

La situación no resulta muy disímil en la China, donde 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).

En Suecia, por ejemplo, cerca de 2 millones de personas (25% de la población) están expuestas a ruidos de tráfico mayores a 55 dBA y se ha establecido que por lo menos un 30% de la varianza de la molestia la produce el nivel de exposición al ruido vehicular (Skånberg y Öhrström, 2002). Específicamente en Estocolmo, el nivel promedio de las calles supera 60 dBA y cerca del 20% de la población debe soportar niveles de ruido mayores a 55 dBA (Bolund y Hunhammar, 1999).

En la Tabla 1 se reseñan los resultados de mediciones de ruido vehicular llevados a cabo en distintas ciudades del mundo. Vale notar como base de referencia, que la EPA-US (1974) definió 55 dBA en ambientes exteriores para evitar

daños auditivos (aunque no sensaciones de molestia). Así mismo, la normativa colombiana para 24 horas es de 65, 70 y 75 dBA para zonas residenciales, comerciales e industriales en su orden (MAVDI, 2006).

Cabe añadir que si bien el ruido vehicular es el más importante en la mayoría de ciudades del mundo, no siempre ocurre así, tal como lo constató un estudio realizado en Nigeria sobre la percepción del ruido en 8 ciudades y donde el 29% de los encuestados respondió que siente molestia *muy alta* ante el ruido urbano. En esta ciudad, sin embargo, la principal fuente emisora fueron los equipos de audio y tal fenómeno fue más recurrente en áreas de alta densidad urbana, en edificios multifamiliares, durante los fines de semana y en horario nocturno. El 84% de la población encuestada consideró que el ruido debía ser controlado por vías legales (Saadu *et al.*, 1996).

Para finalizar este párrafo, cabe presentar la clasificación ambiental propuesta por Lebedowska (2005) fundamentada en el incremento del ruido por causa de los vehículos:

**Tabla 1.** Niveles de presión sonora registrados en diferentes ciudades.

Ciudad o región	Nivel sonoro	Referencia
Vitoria-Gasteiz, España	> 65 dBA día > 55 dBA ciclo diario	Vitoria-Gasteiz (2007)
Pamplona, España	Promedios entre 60 y 75 dBA	Arana y García (1998)
Valencia, España	Promedios diarios > 65 dBA	Gaja <i>et al.</i> (2003)
Cáceres, España	88% de mediciones > 66 dBA	Barrigón-Morillas <i>et al.</i> (2002)
Teherán, Irán	35% de mediciones > 70 dBA	Alimohammadi <i>et al.</i> (2005)
Jalgaon, India	Promedio de 87,9 dBA	Ingle <i>et al.</i> (2005)
El Cairo, Egipto	> 80 dBA	Ali y Tamura (2003)
Assiut, Egipto	> 80 dBA en zonas residenciales	Ali (2004)
Beijing, China	Promedio de 75,6 dBA	Li <i>et al.</i> (2002); Li y Tao (2004)
Laznhou, China	Promedio de 69,3 dBA	Guoxia <i>et al.</i> (2006)
<b>Latinoamérica</b>		
Ciudad de Panamá, Panamá	75% de registros máximos > 100 dBA	Corrales y Henríquez (2007)
Montevideo, Uruguay	Registros máximos > 100 dBA	González y Rocco, 2007
Curitiba, Brasil	93,3% de registros diurnos > 65 dBA 80,6% de registros diurnos > 70 dBA 40,3% de registros diurnos > 75 dBA	Trombetta <i>et al.</i> (2002)
Curitiba, Brasil	73,4 dBA en zonas residenciales	Calixto <i>et al.</i> (2003)
La Plata, Argentina	60 a 80 dBA, carros son fuente del 80% del ruido urbano	Rivera y Guerry (2008)
<b>Colombia (IDEAM, 2006)</b>		
Medellín	Entre 66,8 y 75 dBA	
Cali	70,4 dBA para 24 horas; 71,7 dBA diurno; 66,3 dBA nocturno	
Bucaramanga	> 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 diurno; entre 63,9 y 73,1 dBA nocturno	
Riohacha	Entre 66 y 71 dBA diurno; entre 53 y 64 dBA nocturno	
Bogotá	Entre 76,3 y 84,3 dBA (Puente Aranda; Sandoval, 2000)	
	Entre 70,8 y 82,3 dBA (Chapinero; Ramírez, 2012)	

Ambiente	Relación de ruidos
Muy silencioso	El ruido procedente del transporte es muy bajo en comparación con el ruido de fondo y no incrementa el ruido total
Silencioso	El ruido por transporte es bajo e incrementa en hasta 1 dBA el ruido total
Ruido elevado	El ruido por transporte incrementa entre 1 y 2 dBA el ruido total
Área ruidosa	El ruido por transporte es alto e incrementa entre 2 y 3 dBA el ruido total
Área muy ruidosa	El ruido por transporte incrementa en más de 3 dBA el ruido total

Ruido Total = Ruido de Fondo + Ruido de Transporte

#### 4. Impactos ambientales

##### En la calidad de vida

El ruido es un contaminante producido por múltiples fuentes de emisión que proviene de electrodomésticos, equipos residenciales y maquinaria industrial al interior de las edificaciones, y de medios de transporte, industrias, construcciones, comercio, espectáculos musicales o deportivos y animales domésticos al exterior, estos últimos llamados también ruido comunitario o ambiental. Mientras los ruidos al interior de las edificaciones son generalmente manejados a discreción de las personas, no ocurre igual con los externos y, dentro de estos últimos, el que muestra mayor importancia y recurrencia en sistemas urbanos, es el producido por los vehículos (**Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2008**).

La importancia del ruido en la calidad de vida de las personas queda plasmada en un estudio realizado en el Reino Unido durante los años 1992 y 1993, en el cual se indagó a 1.605 personas sobre aspectos cotidianos que les inquietaban, y encontraron *alta* preocupación por el empleo, la ley y el orden, la contaminación del aire y los precios, en su orden, incluso por encima de tópicos como educación, salud, pensión y vivienda. No obstante, en lo atinente a ambientes interiores, el ruido fue el elemento señalado como más importante, seguido por la contaminación atmosférica (**Williams y McCraeb, 1995**).

De igual modo, un estudio en ambientes urbanos y rurales franceses en el cual se aplicó un cuestionario a 1.791 personas reflejó que el tema ambiental ha alcanzado connotaciones muy importantes en la calidad de vida de ambas poblaciones, a pesar de la baja exposición a

contaminantes en el segundo grupo (**Moser y Robin, 2006**). En virtud a estos resultados, los autores señalan que alrededor del tema ambiental ha ocurrido una *construcción social* de preocupación, por lo que incluso aquellos individuos que no están expuestos ante problemas ambientales, los han interiorizado como una situación de apreciable importancia en sus vidas.

Así mismo, en Estocolmo se llevó a cabo una investigación sobre la percepción de molestia ante el ruido ( $n = 227$ ) y se encontraron diferencias significativas entre los grupos de personas que mantienen las ventanas de sus residencias abiertas y cerradas, así como también entre los niveles de ruido que se perciben al exterior y al interior de las viviendas (**Skånberg y Öhrström, 2002**). El que las ventanas estén abiertas o cerradas no constituye un problema trivial, puesto que esta variable juega un papel relevante ante las condiciones climáticas. Es así como **Nicol y Wilson (2004)** destacan que en Atenas los habitantes de múltiples calles se ven en la disyuntiva de someterse a altos niveles de ruido o de calor durante los meses de verano.

El ruido suele ser el principal aspecto señalado en sistemas urbanos como causa de deterioro ambiental y de estrés (**Moser y Robin, 2006**) y, aún así, en los países en desarrollo no se le ha reconocido la dimensión adecuada a este problema (**Guoxia et al., 2006**).

##### En la salud

El ruido constituye un problema de salubridad pública (**Harris, 1985**), tema que se aborda de manera sucinta en el presente párrafo, pero que puede ser consultado con mayor detalle en la Organización Mundial de la Salud (**OMS, 1999**).

Como primera medida, debe llamarse la atención sobre el hecho que la contaminación sonora se expresa en un espacio y tiempo definido en inmediaciones de la fuente emisora, y su manifestación termina cuando se silencia esta última. No obstante, sus efectos en el hombre como en otros seres vivos, pueden ser no sólo de largo plazo, sino incluso acumulativos.

Numerosas investigaciones han sido realizadas a nivel mundial en relación a los daños ocasionados por el ruido a la salud, definiéndose esta última como un estado de bienestar físico, mental y social y no solamente como la ausencia de enfermedades o debilidad. Los efectos adversos que pueden ser generados por el ruido se refieren a alteraciones fisiológicas, psicológicas o a ambas, y la intensidad de los efectos se relaciona con la exposición a mayores niveles de ruido y a periodos más prolongados; de ello depende que los impedimentos sean temporales o de largo

plazo. Los principales problemas de salud identificados ante el ruido son los siguientes (OMS, 1999):

1. *Impedimento auditivo.* Se refiere a un incremento en el umbral de escucha (pérdida de audición), además de distorsión (paracusis) y zumbidos temporales o permanentes (tinnitus). Estos efectos alteran las actividades diarias e interfieren en aspectos como escuchar el teléfono, el timbre, el despertador, las alarmas o la música. El mayor riesgo ocurre en las frecuencias de 3.000 a 6.000 Hz, aunque en exposiciones prolongadas también se afecta en 2.000 Hz (OMS, 1999).

El nivel de ruido se considera moderado hasta aproximadamente 60 dBA, pero incrementos de este valor generan molestias que se tornan progresivamente más desagradables hasta convertirse en dolorosas a 130 dBA y generan lesiones en el oído a 140 dBA. Algunos autores refieren, que incluso exposiciones cortas por debajo de 100 dBA, pueden causar daños permanentes al oído (Kinsler *et al.*, 1995).

Una evaluación de ruido vehicular llevada a cabo en Sao Paulo (Brasil) que encontró valores promedio entre 70,9 y 80,2 dBA, realizó paralelamente un estudio audiométrico en 624 policías de tráfico y trabajadores urbanos, y encontró pérdida auditiva en el 28,5% de los estudiados, con diferencias significativas por género (mayor en hombres), edad (mayor en edades avanzadas), sectores más ruidosos y ocupaciones previas con presencia de ruido (Melo-Barbosa y Alves-Cardoso, 2005). Estos autores señalan resultados semejantes, en choferes de buses en Curitiba y en Sao Paulo.

De igual modo, estudios realizados en la ciudad de Jalgaon (India) mostraron niveles de ruido promedio de 87,9 dBA y máximos de 114 dBA, los cuales han generado impedimentos auditivos en los policías de tránsito ( $n = 50$ ) así: 80% en frecuencias entre 250 y 1.000 Hz; 70% en frecuencias de 1.000 a 4.000 Hz; y 46% en frecuencias hasta de 8.000 Hz (Ingle *et al.*, 2005).

Para el estudio realizado por Sandoval (2000) en Bogotá, sobre 1.080 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 audiológico practicado a una muestra de 1.347 personas de la localidad reveló que el 49% de los individuos evaluados

exhibe un descenso auditivo en las frecuencias de 3.000, 4.000 y 6.000 Hz.

2. *Interferencia en la comunicación.* Genera discapacidades y cambios en el comportamiento. Incluye problemas de concentración, fatiga, pérdida de confianza, irritación, malentendidos, pérdida de capacidad de trabajo, problemas de relaciones humanas y estrés. Una conversación normal ocurre de 50 a 55 dBA y para que la inteligibilidad de una conversación sea adecuada, la relación entre habla y ruido debe ser menor a 15 – 18 dBA. Los ruidos superiores a 35 o 40 dBA, provocan dificultades en la comunicación oral y, a partir de 65 dBA, las conversaciones se tornan extremadamente difíciles (OMS, 1999).
3. *Dificultad para dormir.* Entre el 80 y el 90% de los problemas reportados por las personas para dormir, están asociados al ruido comunitario. Algunos efectos del ruido incluyen: dificultad para dormirse, despertarse repetidas veces, menor profundidad del sueño, incremento de la presión sanguínea y de los latidos, vasoconstricción, cambios en respiración, arritmia cardíaca y mayor movimiento. Además están los post-efectos o efectos del día siguiente como fatiga, mal humor, bajo rendimiento, uso de medicamentos o desórdenes mentales (OMS, 1999).

Diversos estudios sugieren que para dormir bien los niveles de presión equivalente no deben exceder 30 dBA para casos de tráfico continuo y los valores máximos no deben ser mayores a 45 dBA cuando hay bajo ruido de fondo (King y Davis, 2003).

Investigaciones realizadas en mujeres adultas en la ciudad de Maebashi (Japón) cerca a vías ruidosas, han involucrado tanto cuestionarios como mediciones de ruido y valoración de diversas variables socioeconómicas. En ellos se ha encontrado correlación positiva entre el tráfico vehicular nocturno y muchos de los efectos citados, así como una relación lineal directa entre el número de veces que se despierta la persona y el nivel de ruido. En este efecto incide notoriamente si se trata de ruidos continuos o impulsivos, el intervalo entre los ruidos, la edad de las personas (directamente proporcional), el nivel de presión sonora y la presencia de vibraciones. Así mismo, se observó relación inversa entre el insomnio y la distancia a la vía en niveles de ruido mayores a 50 dBA, por lo que los autores definen el problema como de carácter *epidemiológico* (Sasazawa *et al.*, 2004). Estudios similares han encontrado también relaciones lineales positivas entre el insomnio y el flujo vehicular

pesado en el rango de 0 a 20 m de distancia a las vías, cuando los niveles de ruido son del orden de 65 dBA (**Kageyama et al.**, 1997).

4. *Efectos cardiovasculares y fisiológicos.* Los ruidos agudos activan el sistema autónomo y hormonal generando cambios en la presión sanguínea, la tasa cardíaca y la vasoconstricción. En situaciones prolongadas generan hipertensión (relación débil), isquemia cardíaca (relación estrecha), resistencia vascular periférica, cambios en la viscosidad de la sangre y de los lípidos, cambios en el balance electrolítico, cambios hormonales en la epinefrina, la norepinefrina y el cortisol (**OMS**, 1999).

Para ambientes urbanos de Alemania, se estima que el 17% de los casos de isquemia cardíaca se deben al ruido vehicular; esta relación ha sido ampliamente demostrada por diversos estudios longitudinales y transversales (**Babisch**, 2005).

Estudios realizados en Belgrado que evaluaron la presión sanguínea y el pulso en niños que viven expuestos a altos y bajos niveles de ruido vehicular (> a 45 dBA en la noche y a 60 dBA en el día para los primeros), hallaron hipertensión en un 5,7% de quienes están sometidos a mayor ruido y de 1,48% en los de menor ruido ( $p = 0,054$ ), así como mayor presión sistólica y pulso (**Belojevic et al.**, 2008). Dichos autores aclaran, sin embargo, que alrededor de este tema ha habido investigaciones con resultados contradictorios.

5. *Salud mental.* Incluye efectos diversos como ansiedad, estrés, náuseas, dolor de cabeza, inestabilidad, pérdida argumentativa, impotencia sexual, cambios de humor, incremento de conflictos sociales, irritabilidad y desórdenes psiquiátricos como neurosis, psicosis e histeria. Conlleva también al consumo de drogas, tranquilizantes y píldoras para dormir (**OMS**, 1999).
6. *Efectos en desempeño.* Ha sido ampliamente documentado que la exposición al ruido afecta las capacidades de atención, motivación, memoria, lectura y desempeño en tareas cognitivas complejas, hecho que induce a un mayor número de accidentes (**OMS**, 1999).
7. *Efectos en vecindarios.* Los ruidos en vecindarios generan molestia, mal humor, agresividad, decepción, impotencia, depresión, ansiedad, distracción, agitación, cansancio, alteraciones de comportamiento, quejas, insolidaridad y conflictos (**OMS**, 1999).

### Económicos

El automóvil es en muchas ciudades del mundo el medio de transporte por excelencia, por lo que se ha constituido en un problema cada vez más importante no sólo en cuanto a los problemas de ruido sino de contaminación atmosférica (**Austroads**, 2005).

En Estados Unidos los costos ocasionados por el ruido representados en salud y pérdida de productividad, alcanzan entre el 0,2 y el 2% del producto doméstico bruto (GDP) (**Bolund y Hunhammar**, 1999). Por su parte, estudios del Parlamento Europeo estiman que las pérdidas económicas anuales en la Unión Europea inducidas por el ruido ambiental, se sitúan entre \$ 13.000 millones y \$ 38.000 millones de euros, las cuales van en aumento por el crecimiento poblacional, urbano y vehicular (**COM**, 2000). De igual modo, para 1995 se estimaron pérdidas económicas anuales de US\$ 2.500 millones de dólares en China, a causa del ruido (**Li y Tao**, 2004).

Los impactos económicos ocasionados por el ruido no quedan aquí, por cuanto otro problema asociado al mismo se refiere a la desvalorización de las propiedades que se ubican cerca a zonas ruidosas. Estudios desarrollados por la Danish Environmental Protection Agency han encontrado 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). Estudios similares llevados a cabo en Seúl (Corea) mediante el modelo de precios hedónico, encontró que un incremento de 1% en el ruido deprecia en 1,3% el precio de las propiedades próximas a una vía analizada, alcanzando hasta 5% en las viviendas más cercanas (**Kim et al.**, 2007). Para el total de la vía, se obtuvo una pérdida total de US \$ 266,4 millones. Estudios previos asociados al ruido de los aviones, ya habían mostrado que por cada incremento de 1 dBA se deprecian las propiedades entre 0,5 y 0,6% (**Nelson**, 2004).

Una forma distinta de visualizar el impacto económico del ruido, lo evidencia el que el 75% de las personas en Estados Unidos como en Europa, están dispuestas a pagar más impuestos para mejorar la calidad ambiental del lugar de residencia (**Moser y Robin**, 2006). Igualmente, en Estocolmo el papel recreacional de las áreas verdes es tan alto, que el 45% de la población está dispuesta a pagar costos mayores de alojamiento por vivir cerca de ellas y lejos de ambientes ruidosos (**Bolund y Hunhammar**, 1999).

Estudios experimentales llevados a cabo en Santiago de Chile, evaluaron la disposición de las personas a pagar por vivir en lugares que brinden mayor bienestar y menor contaminación. Sobre un muestreo en 150 apartamentos

en diferentes zonas de la ciudad, encontraron que no sólo hay disponibilidad a pagar US\$ 25,4 dólares anuales por cada decibel que puedan reducir en sus residencias, sino que la población ha incorporado este contaminante al conjunto de variables que toman parte en la decisión de compra de vivienda (**Galilea y Ortúzar**, 2005).

Estudios similares en la ciudad de Leipzig (Alemania), muestran que la gente expone alta preferencia por vivir en zonas verdes, con bajos niveles de contaminación atmosférica y de ruido (**Kabisch**, 1998). De acuerdo con **Tree Trust y Bonestroo** (2007), los parques, las zonas verdes y los bosques al interior de las ciudades, generan valorización de las propiedades, incremento estético y beneficios psicológicos y de salud. A su vez, generan millonarios ahorros al gobierno y con ello a los habitantes, al reducir las inundaciones y mejorar la calidad del aire.

### En la fauna

Además de los impactos económicos, de salud y de calidad de vida referidos, más recientemente ha llamado la atención el impacto del ruido urbano sobre la fauna, e incluye para el caso de las aves (aunque no excluye a otros taxa), problemas de comunicación que han forzado a que se desarrollen mecanismos biológicos para contrarrestar los mismos, incluidos los cambios en las frecuencias de canto y en el patrón temporal, sin descartar que pueda haber también pérdida de abundancias y de diversidad (**Katti y Warren**, 2004). Algunos de estos problemas se deben a especificidades del ruido vehicular como el hecho que predomina en bajas frecuencias (**Raimbault y le Dubois**, 2005), situación que afecta a todas aquellas especies que se comunican en las mismas, por lo que prevalecen las especies que se comunican en altas frecuencias (**Warren et al.**, 2006). Estos últimos autores destacan la investigación llevada a cabo en Alemania por Bergen y Abs, quienes encontraron que en áreas urbanas algunas especies de aves han adelantado sus cantos a horas más tempranas, respecto a las zonas de bosque cercanas.

**Warren et al.** (2006) destacan que los sistemas urbanos exhiben una acústica profundamente alterada respecto a la de ecosistemas naturales, mostrando alta heterogeneidad espacial, ciclos diurnos, presencia de superficies reflectantes y muy altos niveles de ruido. Estas condiciones llevan a que se afecten diversas conductas de reproducción, huida, territorialidad, etc., dependientes de la comunicación animal, las cuales deben ser afrontadas por las especies a través de la plasticidad fenotípica o de la evolución. Señalan que las especies de ranas y aves que viven cerca de arroyos, han debido adaptarse a tales condiciones sonoras e igual debe ocurrir con estos

grupos en los sistemas urbanos, so pena de sufrir su extinción local.

La Figura 4 sintetiza los aspectos más sobresalientes relativos a los impactos ocasionados por el ruido vehicular.

## 5. Control del ruido vehicular

### Riesgo

Pensar en un *desarrollo* que no lleve del brazo el bienestar social, constituye un retroceso del camino recorrido por la humanidad, por cuanto los avances en el conocimiento y la tecnología, son precisamente para mejorar las condiciones de vida del hombre. De allí que cualquiera que sea la forma de desarrollo que adopte una comunidad, a ésta debe subyacer un mayor bienestar humano general. Por lo anterior, en tanto los sistemas urbanos se hacen más populosos, deben priorizarse las soluciones a los problemas relacionados con la salud y la calidad de vida de la población, condición entre otras más, para constituir ciudades saludables (**Marek y Kassenberg**, 1990).

Sobre la base de la premisa anterior, hay que recalcar como primera medida, que el ruido vehicular, junto con otros tipos de ruido, es un contaminante ambiental que constituye un factor de *riesgo* para la salud de las personas, en especial en aquellas situaciones en que se sobrepasan los umbrales permisibles. Desde la USEPA se abordaría este campo bajo el concepto de *riesgo ecológico*, condición en la cual el funcionamiento normal de una población, ecosistema o paisaje, se ve amenazado por fuerzas externas o factores de estrés que en el presente o en el futuro, pueden afectar la salud, la productividad, la estructura genética, el valor económico o la calidad estética del sistema. Su evaluación incluye la determinación de las probabilidades de ocurrencia, la significación cuantitativa de tales efectos y el manejo de las fuentes de estrés dentro de límites aceptables (**Cowling et al.**, 1990).

El riesgo se estudia, comúnmente, mediante una relación entre el daño potencial de un tensor y el grado de exposición al que se somete una población (o comunidad, ecosistema, etc.) o, también, por la relación entre la cuantía del tensor en el ambiente y la cuantía definida en las normas para que no ocurran daños (**Maki y Slimak**, 1990). Entre algunos objetivos de la evaluación de riesgos se encuentran la caracterización del tensor y su expresión espacial y temporal, la respuesta de la población a tales niveles, la comparación del tensor con estándares si los hay, y la puesta en marcha de medidas para reducir éstos a niveles que no afecten la salud de la población. Por lo general, se acompaña de un modelo conceptual

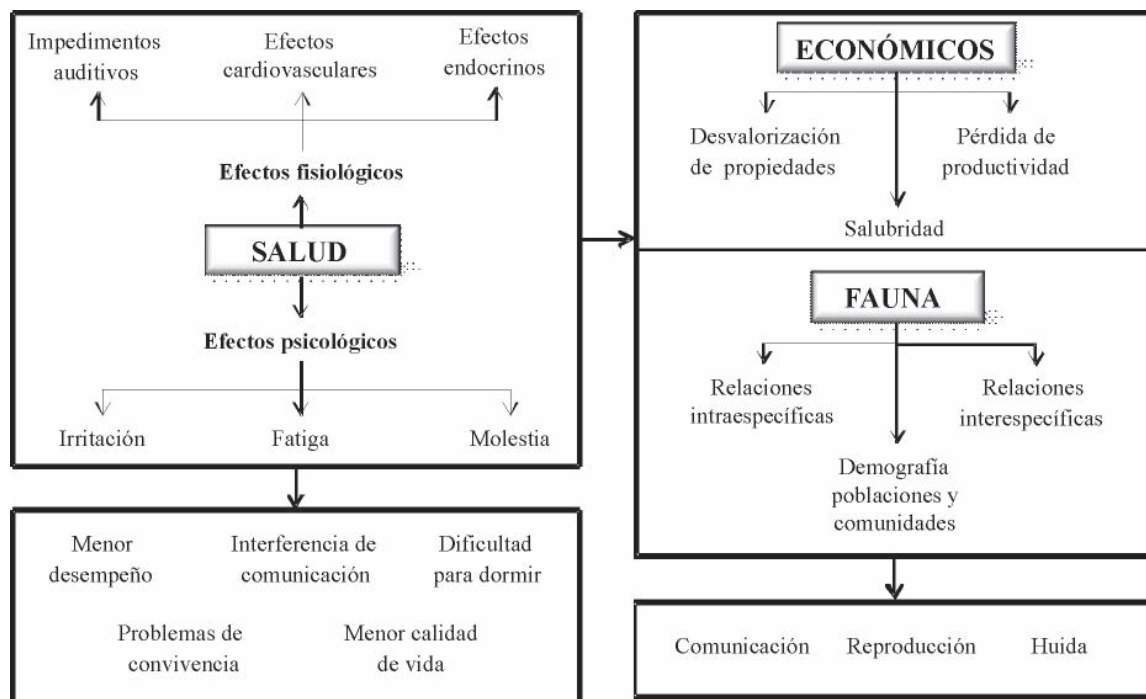


Figura 4. Principales impactos ocasionados por el ruido vehicular.

que representa las interrelaciones entre entidades ecológicas y el tensor al cual están expuestas, así como de un monitoreo que evalúa la eficacia de las medidas implementadas (EPA-US, 1998).

El punto de quiebre en el control de los riesgos del ruido vehicular urbano, recae esencialmente en la *voluntad política* de los gobiernos para hacerle frente a tal problemática. Un gobierno que priorice el bienestar ciudadano, adecuará las políticas públicas y la legislación para definir e incorporar medidas de prevención, mitigación y corrección, así como medidas de control y programas de monitoreo, en torno a niveles de *no riesgo* para la población.

Tomando como ejemplo lo ocurrido en Estados Unidos, el Congreso comisionó a la EPA mediante el Acta de Control de Ruido de 1972, a publicar información científica sobre el ruido, involucrando aspectos de cualidad, cantidad, efectos y niveles permisibles para proteger la salud pública y el bienestar de los ciudadanos. A partir de allí surgió el estudio «Information on Levels of Environmental Noise Requisite to Protect Public Health and Welfare with an Adequate Margin of Safety» (EPA-US, 1974), junto con su posterior complemento de 1978. Tal estudio fundamentó sus directrices sobre la base de la 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. Tal ha sido la importancia que se ha dado al

tema, que hoy día se exige en Estados Unidos la medición del ruido, su modelación y mitigación, en los estudios de impacto ambiental relativos a la construcción de vías o facilidades para el transporte (FTA, 2006).

Otros lineamientos para abordar el riesgo generado por el ruido vehicular y procedente de otras fuentes, han sido planteados por la Organización Mundial de la Salud, que estableció límites de 30 a 35 dBA dentro de las viviendas y 45 dBA como nivel de referencia para que no se presenten molestias o daños auditivos. Algunos otros parámetros definidos por esta Organización precisan que la exposición a 50 dBA durante 16 horas genera malestares moderados y de 55 dBA durante 16 horas conlleva a malestares fuertes. Recalca que la sensación de desagrado ante el ruido es mayor en horarios nocturnos e inicia en niveles sonoros de 37 a 42 dBA (OMS, 1999).

De igual modo, la Directiva 2002/49/CE de la Unión Europea, demandó la elaboración de mapas de ruido para todas las ciudades con más de 250.000 habitantes, como para aquellos ejes viales cuyo tráfico supera los seis millones de vehículos al año, como medida de valoración de dicha problemática. De conformidad con las legislaciones existentes para mitigar el ruido vehicular, en Europa se han hecho enormes esfuerzos para que los fabricantes reduzcan el ruido de los motores a través de normatividades y estímulos económicos, a la vez que se han definido restric-



ciones de circulación en zonas y horarios particulares (EC, 2000; 2006).

Otros casos que muestran los efectos de la determinación política en la reducción del ruido vehicular, se encuentran por ejemplo, en El Cairo, donde se implementaron prohibiciones 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 el caso de la ciudad de Lázhar donde la restricción de vehículos y la prohibición del uso de bocinas, contribuyeron significativamente a la reducción de este contaminante (Guoxia *et al.*, 2006).

Tal como se demostró previamente, las mediciones de ruido en diversas ciudades del mundo incluida Latinoamérica, señalan que se sobrepasan con creces las directrices y estándares internacionales y las normatividades nacionales respectivas, constituyéndose en un problema de salubridad pública. Algunas de las razones para que se dé tal problemática principalmente en países en vías de desarrollo, incluyen: el desconocimiento gubernamental y comunitario del tema, la falta de voluntad política y los costos políticos de la implementación de medidas. Ante las dos primeras causas referidas, la Academia, las Organizaciones no Gubernamentales, los Centros Médicos y de Salud, y otras Instituciones versadas en la temática, deberán encargarse de la divulgación y concientización de la población, para que de forma progresiva las propias comunidades movilicen fuerzas hacia la valoración y el control de dicha problemática.

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 este problema. Tal como lo mostró el estudio de Moser y Robin (2006), se trata de llevar a cabo una construcción social que asocie el ruido vehicular a la pérdida de bienestar, salud y calidad de vida. Sólo entonces, se abordarán de forma apropiada las medidas para poner en cintura a los impactos ambientales generados por este contaminante.

En cuanto a los costos políticos, estos representan, en muchas ocasiones, el nudo gordiano que impide una postura clara y transparente de los gobiernos municipales, puesto que las decisiones políticas de temas como el expuesto, están influenciadas por los intereses económicos de gremios con gran influencia en las altas esferas del gobierno, como son los transportadores, y los fabricantes e importadores de vehículos. Al mismo tiempo, decisiones restrictivas que recaigan sobre alguna fracción de la población, bien sean los propietarios de vehículos, motocicletas, taxis, buses o camiones de reparto, constituyen por sí mismas, medidas impopulares de alto costo político que los gobiernos prefieren no afrontar.

## Modelación

La planificación urbana constituye una de las herramientas más importantes con que cuenta un gobierno para la prevención de riesgos ambientales, sin embargo, en países en vía de desarrollo ésta suele ir décadas atrás de las necesidades vigentes, por lo que no aporta, por regla general, medidas eficientes y preventivas, sino medidas tardías de choque y correctivas. Los problemas no se prevén, se presentan como hechos consumados que desbordan a las administraciones, y por ello con frecuencia resultan incluso más costosos de solucionar.

El uso de modelos computacionales en los países desarrollados es altamente apreciado como instrumento de planificación para evaluar problemas ambientales, incluidas las fuentes contaminantes, su dispersión en el ambiente, los impactos sobre la población humana y hasta los mismos procesos regulatorios, muchos de los cuales se rigen en Estados Unidos y en otros países del mundo por las directrices de la EPA, que creó en el año 2000 el *Council for Regulatory Environmental Modeling* (CREM). La modelación involucra tanto leyes, políticas y normativas, como también riesgos ambientales y costos-beneficios de las medidas a implementar (**Committee on Models in the Regulatory Decision Process**, 2007). La modelación del ruido vehicular no escapa a tales directrices cuando se trata de proyectos de transporte, y se viene implementando en el marco de los estudios de impacto ambiental requeridos de manera previa a la construcción y operación de los mismos. En estos estudios, se plantean escenarios alternativos, cuya elección no se circunscribe a un análisis de costos, sino que integra el bienestar ciudadano de las poblaciones adyacentes. Los proyectos no terminan allí, sino que precisan las medidas de prevención, mitigación y corrección necesarias para no generar detrimento en la calidad de vida de los ciudadanos, así como los costos de implementación que, por demás, son sufragados por los mismos proyectos. Por lo general, las medidas se conciertan con las comunidades de tal modo que no generen impactos ni afecten las actividades regulares locales.

Los modelos de predicción de ruido vehicular de naturaleza estadística han dado muy buenos resultados en tráfico rodado, y se fundamentan en características como el flujo, la composición y la velocidad, en su orden, si bien algunos modelos más incluyen variables tales como ancho de la vía, inclinación, tipo de pavimento y efecto de las barreras acústicas (Arana, 1989; Arana *et al.*, 2000; Arana y Asian, 2001; Arana y García, 2001; Barrigón-Morillas *et al.*, 2002; Pamanikabud y Tansatcha, 2003; Austroads, 2005; FTA, 2006; Janczur *et al.*, 2006). Algunos de los modelos más utilizados incluyen el *Traffic noise model V.2.5.* de la Federal

Highway Administration de los Estados Unidos (FHWA, 2004; FTA, 2006), el *Calculation of road traffic noise o CoRTN* del Reino Unido cuyos descriptores se han homologado recientemente a los de otros países (Abbott y Nelson, 2002; Abbott y Stephenson, 2006); el *Richtlinien für den Lärmschutz an Straben o RLS90* de Alemania y el *Nordic prediction method for road traffic noise-statens planverk 96-SP* de los países nórdicos. Otros modelos matemáticos además de los anteriores, incluyen el *Nord2000 Method*, el *Nouvelle methode prevision de bruit de trafic – NMPB* y el *Reken-en meetvoorschrift verkeerslawai II o RMV II*, además de algunos software comerciales como el *Bruel & Kjaer predictor*, el *RoadNoise*, el *TNOISE*, el *SoundPLAN* y el *NBSTOY*, entre otros (Austroads, 2005).

Algunos ejemplos que han implementado tales modelos en la toma de decisiones incluyen los siguientes:

- En Mataró en inmediaciones de Barcelona, y de manera previa a la construcción de una avenida circunvalar, se modeló y simuló un proyecto vial con el propósito de reducir los niveles de ruido vehicular a 65 dBA en el exterior de las residencias durante el día y a 55dBA durante la noche. A partir de las simulaciones, se definió la necesidad de implementar barreras acústicas en algunos sectores y el cambio de pavimento en otros (Puigdomènech *et al.*, 1996).
- Para la construcción de un viaducto en la ciudad de Beirut, se emplearon modelos matemáticos de predicción del ruido vehicular que debieron ser ajustados a las condiciones locales y que condujeron a un análisis de sensibilidad para evaluar el efecto de diversas medidas de mitigación (El-Fadel *et al.*, 2002).
- En la ciudad de Curitiba se aplicó modelación matemática en cercanía a grandes avenidas, para determinar las variables que mostraban mayor incidencia en el ruido vehicular (Calixto *et al.*, 2003).
- Análisis de sensibilidad y simulaciones fueron realizadas para la ciudad de Teherán, para determinar el peso de cada variable incidente del ruido vehicular (Alimohammadi *et al.*, 2005).
- En Japón se desarrolló un simulador de tráfico (Dynamic Road Traffic Noise –DRONE), a partir del cual se estimaron los niveles de ruido en distintos puntos críticos de la ciudad y sobre la base de tales resultados, evaluaron y propusieron medidas de mitigación que incluyeron la reducción del tráfico pesado y la construcción de barreras acústicas (Bhaskar *et al.*, 2007).

- Sobre la base de 2 alternativas para un proyecto ferroviario en el Medio Oriente, se siguieron los lineamientos dados por la FTA y se modeló el ruido esperado a causa del proyecto. Sobre tales predicciones se realizó un análisis multicriterio posterior que definió la mejor alternativa (Hamed y Effat, 2007).

Otros resultados de la modelación:

- En estudios de modelación de ruido y contaminación atmosférica vehicular en Macao, se encontró que el contorno urbano de las zonas históricas con vías angostas, redes complejas y alta densidad de intersecciones, tienen menos tráfico y con ello menos ruido. No obstante, en estas calles de cañón los efectos de contaminación atmosférica en CO son más altos, por la menor ventilación que reciben (Tang y Wang, 2007).
- Modelos estadísticos de ruido vehicular también han sido empleados en Beijing, donde se encontró alta relación con el flujo vehicular y el porcentaje de vehículos pesados (Li y Tao, 2004).
- En la ciudad de Bogotá se evaluó el desempeño de los modelos macroscópicos en la predicción del ruido vehicular y se desarrolló un modelo microscópico contextualizado al ruido vehicular local (Ramírez, 2012).

La importancia del papel de la modelación en el estudio del ruido vehicular, se reconoce en la diversidad de modelos con diferentes aproximaciones matemáticas que vienen siendo desarrollados, incluyendo además de los estadísticos previamente referidos, modelos de redes neuronales (Cammarata *et al.*, 1995; Nooralahiyan *et al.*, 1998; Genaro *et al.*, 2009), microscópicos con autómatas celulares y agentes (De Coensel *et al.*, 2005; Can *et al.*, 2007a); además de físicos que incluyen difusión, paquetes de energía, de rayo y de dinámica de fluidos, utilizados para evaluar los efectos de reflexión de las fachadas (Picaut y Simon, 2001; Kang, 2002; Picaut, 2002; Thorsson y Ögren, 2005). Más recientemente, se vienen evaluando nuevas aproximaciones matemáticas así como descriptores de ruido, que tienen presente la semaforización la cual puede modificar el ruido de continuo a cíclico (Can *et al.*, 2007b).

### Medidas de mitigación

No puede cerrarse este artículo sin exponer y evaluar algunas soluciones a los impactos y el riesgo generado por el ruido vehicular en los sistemas urbanos. Cabe referir que muchas de las medidas que mejoran el tráfico vehicular, reducen tanto la contaminación auditiva como la atmosférica, por lo que las soluciones a los problemas de tráfico y

embotellamientos, pueden coadyuvar a resolver la contaminación.

Las medidas para reducir el ruido se pueden implementar tanto en la fuente, como en la propagación y en el receptor (Figura 5).

**Medidas sobre la fuente**

1. *Normas de emisión.* Tal como lo han demostrado las investigaciones a nivel mundial, el mayor ruido vehicular proviene de camiones, buses y motocicletas. La regulación mediante normas y mecanismos de control para las motocicletas no debería revestir mayores dificultades, en especial en lo que compete al ruido producido por escapes y motores, aún así, cabe preguntarse por qué sigue constituyendo la principal causa de ruido de numerosas ciudades alrededor del mundo.

El ruido generado por los camiones, por su parte, proviene tácitamente del motor y aumenta con la carga que transporta, por lo que no resulta fácil, en sentido técnico, aminorar tal ruido cuando se trata de vehícu-

los pesados que distribuyen bienes y mercancías dentro de los cascos urbanos, salvo el que se restrinja su movilización a ciertas avenidas procurando evitar su paso por zonas residenciales, vías angostas, etc. El uso de camiones de bajo tonelaje para tales servicios aminoraría el ruido, pero, en algunos casos, podría ser económicamente inviable, por lo que se requeriría de análisis más rigurosos. En algunos países se han definido, por demás, disposiciones sobre el uso de cornetas y frenos de aire para este tipo de transporte al interior de las ciudades.

En los buses, por otro lado, los problemas técnicos están prácticamente resueltos en vehículos nuevos y recientes, no obstante, la actualización del parque automotor del sistema de transporte público, conduce a elevados costos económicos que, de una u otra forma, recaen directa o indirectamente en los usuarios del servicio bien sea por vía de tarifas, impuestos o auxilios. Una medida como ésta, a su vez, conlleva procesos de negociación con fabricantes, ensambladores e importadores que ofrecen muchas veces en el mercado de los países en vías de desarrollo, vehículos con

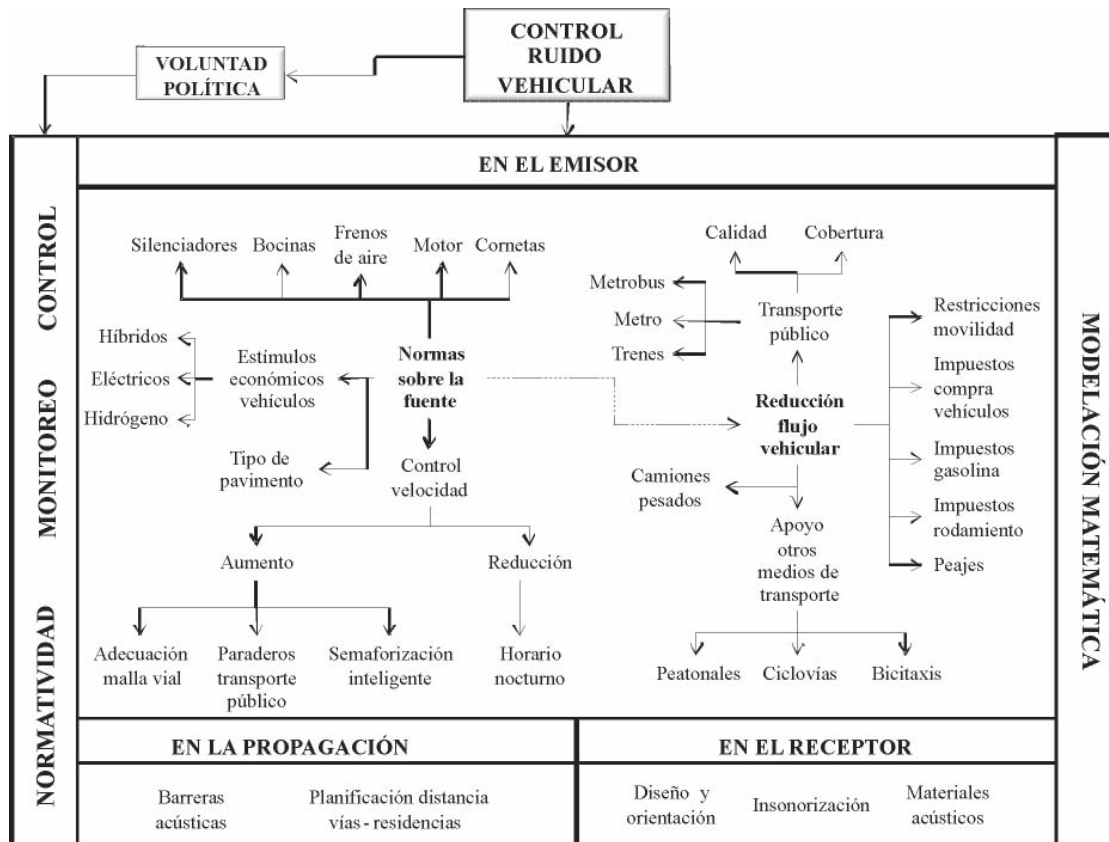


Figura 5. Soluciones a la problemática del ruido vehicular.

especificaciones ambientales inferiores a las exigidas en los países desarrollados; por demás, muchas de estas empresas representan multinacionales con alta capacidad de injerencia en las decisiones nacionales.

Estudios en Curitiba mostraron por ejemplo, que hay correlación directa entre el ruido generado por los buses y los años que llevan operando (**Trombetta**, 2006). En ciudades como Bogotá, por ejemplo, el transporte está representado por un gremio con alta influencia en las esferas políticas locales, por lo que los gobiernos recientes han mostrado alta tolerancia ante las determinaciones de actualización (vía chatarrización) del parque automotor más viejo y más contaminante.

2. *Normas de reducción vehicular.* Entre las mismas se encuentran altos impuestos a los vehículos, a la movilidad y a los combustibles, como también, restricciones de movilización por zonas y horas según el tipo de vehículo. Esta medida, sin embargo, desempeña un papel más relevante en lo concerniente con la solución de los embotellamientos y la minoración de la contaminación atmosférica, que del ruido.

Estudios de **Ribeiro y Balassiano** (1997) en Río de Janeiro, estimaron un total de 10 millones de viajes motorizados diarios en la ciudad, 85% de los cuales ocurren en vehículos privados. Las emisiones del sistema de transporte público (buses) son del orden de 4.050 Ton/CO<sub>2</sub>/día y la de vehículos particulares 7.947 Ton/CO<sub>2</sub>/día, que al llevarse a emisiones por pasajero, dan 0,338 Kg/CO<sub>2</sub>/pasajero/bus/día y 2,58 Kg/CO<sub>2</sub>/pasajero/carro/día, con una razón de 7,6 a favor del transporte público. Las conclusiones son evidentes, hay una necesidad prioritaria de mantener un transporte público de calidad, para así desestimular el uso de los vehículos privados, en razón de la mayor eficiencia del primero sobre el segundo. Con ello, se consumiría una cifra notoriamente más baja de combustibles, dando alivio parcial a la contaminación atmosférica y al calentamiento urbano y global.

Por otro lado, para las motocicletas podrían implementarse prohibiciones de uso durante las horas nocturnas en sectores residenciales. En cuanto a los camiones, en muchos países se han restringido las zonas y horas de reparto, con miras a salvaguardar la tranquilidad nocturna, pero tales medidas se hacen sobre la base de no generar conflictos con los horarios en que se llevan a cabo diversas actividades in-

dustriales y comerciales; además, se da prelación a los camiones livianos de reparto.

La reducción de vehículos de transporte público, por su parte, tendría que ir de la mano con otros planes de transporte masivo que, generalmente, resultan muy costosos como es el caso de metros, trenes o tranvías. No obstante, sí tiene cabida la exclusión de rutas excesivas en algunas avenidas. A manera de ejemplo, en la Carrera 7ª en Bogotá, el Gobierno local identificó en el 2011 un excedente de más de 1.000 rutas de buses y aún así, no aplicó alguna medida correctiva, situación que demuestra muchas de las afirmaciones realizadas a través de este documento.

De gran importancia ha sido el cambio del sistema tradicional de buses por el de metro-buses, el cual ha venido ganando gran aceptación en múltiples países latinoamericanos, ya que demuestra alta eficiencia en la movilización de pasajeros. En la ciudad de Bogotá, este sistema exhibe, no obstante, niveles de emisión sonora similares a los del sistema tradicional de buses (**Ramírez**, 2012).

Sobre las restricciones vehiculares y a manera de ejemplo, para sobrellevar la saturación de las vías en diversas ciudades de Colombia, se han implementado restricciones de movilización en el parque automotor incluido el transporte privado y el público, medida que opera por horas y días de la semana según la matrícula del vehículo (*pico y placa*). Las medidas de restricción vehicular que se han venido tomando en Colombia han surgido por el colapso del tráfico y no para resolver problemáticas ambientales, ampliamente menospreciadas por los gobiernos locales.

3. *Normas de reducción de la velocidad.* La velocidad tal como se refirió en párrafos previos, se relaciona directamente con los niveles de ruido y su regulación puede ser de ayuda en horarios nocturnos en sectores que así lo ameriten. Sin embargo, en muchas ciudades de los países en vías de desarrollo el tráfico acontece sobre vías saturadas donde los embotellamientos están a la orden del día, situación que genera mayor ruido por las continuas acciones de aceleración-desaceleración. Por tanto, en estas situaciones se requiere de un tráfico más expedito, que requiere de vías en buen estado, semaforización inteligente y mayor organización del tráfico (ej. paraderos de buses y taxis). Es claro que algunas de estas medidas se pueden implementar de forma simple, pero otras requieren importantes inversiones económicas.

4. *Normas de uso de bocinas.* El uso de este aditamento vehicular debe ser exclusivo de situaciones en que se corre peligro de colisión o accidente, y de hecho en muchas normatividades así se ha planteado. No obstante, en ciudades congestionadas se ha convertido en un medio de expresión de molestia e inconformidad con el tráfico, agravando el problema de contaminación acústica. Como si fuera poco, a este ruido caótico con frecuencia se suma el de los silbatos de los policías que pretenden aliviar las congestiones, con más ruido.

A la par con esta norma, cabrían otras relativas al uso de silenciadores y alarmas, unas y otras requieren en esencia de campañas contra el ruido o, en su defecto, de medidas de control y penalización. Constituye la norma más simple y menos costosa de implementar y, tal como se vio previamente, ya ha mostrado resultados importantes en diversas ciudades.

5. *Pavimento.* Otra medida se refiere al uso de pavimentos que absorban el ruido y reflejen bajos niveles acústicos y aunque no debería representar por sí misma dificultades para su ejecución, puede chocar con los materiales y las técnicas tradicionales usadas en cada país y ciudad. Esta medida, aunque sencilla, requiere de conocimientos sobre el tema así como de voluntad política, unos y otros escasos en los países en vías de desarrollo.
6. *Otras medidas.* La implementación de métodos de transporte no convencionales como las ciclovías, los

peatonales, los bicitaxis u otros tipos de transporte *alternativo*, lleva de la mano barreras culturales que tendrían que ser trabajadas a través de campañas de educación ambiental. Como se encontró en el estudio de **Winters et al.** (2007) en Canadá, existen aprensiones de la comunidad ante algunos de estos métodos de transporte, que pueden dar al traste con la puesta en marcha de los mismos.

Una medida adicional de gran relevancia se refiere a la creación de estímulos económicos en torno al uso de vehículos eléctricos, de hidrógeno, híbridos u otros, tecnologías algunas de ellas aún en desarrollo que no han alcanzado su masificación, entre otras, por los mayores costos que representan y por la visión cortoplacista de sus gobernantes que no vislumbran las invaluable ventajas de un menor consumo de combustibles fósiles y de reducción de la contaminación auditiva y atmosférica. Es importante resaltar que en Kathmandu se realizó la conversión de los vehículos de 3 ruedas y del 20% de los buses a motores eléctricos, hecho que redujo los niveles de contaminación acústica y atmosférica de la ciudad (**McDonald**, 2008).

#### Medidas sobre la propagación

7. *Construcción de barreras acústicas.* Esta medida de mitigación-corrección es común en autopistas de países desarrollados pero no al interior de los sistemas urbanos (Fotos 1 y 2). La misma está aún lejos de ser viable en países en vías de desarrollo por los eleva-



Fotos 1 y 2. Uso de barreras acústicas en autopistas cercanas a centros urbanos (izquierda: Alemania, derecha: Italia).

dos costos que suscita, máxime cuando generalmente no existen los recursos para mantener una malla vial de mediana calidad.

Por su parte, las barreras construidas con vegetación, parecen no ser muy eficientes a nivel acústico, y serían de muy difícil implementación en ambientes con espacios restringidos.

Otra medida expuesta en la literatura y que cabe ser mencionada en la propagación del contaminante, se refiere a la planificación y el diseño de las áreas residenciales a distancias apreciables de las vías con alto flujo vehicular. No obstante, y tal como se expuso previamente, la planificación urbana no suele ser vanguardista en los países en desarrollo y no solucionaría los problemas ya existentes.

### Medidas sobre el receptor

8. *Insonorización de viviendas.* Esta medida más que actuar sobre la fuente emisora y el ruido ambiental urbano, mitiga los niveles de ruido al interior de las residencias. Por tanto, no resuelve el problema urbano de contaminación acústica, el cual se mantiene para transeúntes, peatones y usuarios del espacio público. Los costos de tales medidas como también ocurre con los aeropuertos, recaen en muchos países desarrollados en los mismos proyectos de transporte pero, es muy probable que en los demás países recaigan de forma exclusiva en la población residente.

Una propuesta encaminada a proyectos habitacionales futuros, se refiere a incorporar normas sobre uso de materiales con altos coeficientes de absorción en las fachadas, si bien otros aspectos embebidos en el diseño y en la orientación de las edificaciones, podrían también aportar beneficios (Harris, 1985).

En síntesis, la humanidad se encuentra expuesta hoy ante múltiples contaminantes que, producto del devenir del desarrollo, vienen acompañados de daños a la salud y de pérdida de calidad de vida, muchos de los cuales se manifiestan en los sistemas urbanos donde la población se aglomera con gran rapidez. Claramente se requiere, por un lado, de mayor conciencia ambiental pero, también, de políticas y acciones con lineamientos concretos que afronten tales problemas con el nivel de importancia que se requiere.

Si bien el tema ambiental hace sólo unas décadas no era parte de la agenda política de los países en desarrollo, ha venido incorporándose lentamente a la misma, aunque pareciera que muchas veces está permeada por intereses económicos y políticos particulares, que ocultan y dilu-

yen tales problemáticas, y que dificultan y restringen las acciones encaminadas a su solución.

No se puede negar que los países en vías de desarrollo tienen restricciones económicas importantes para hacer ciudades ambientalmente saludables y sostenibles, pero más cierto es, que sin la voluntad política para encaminar los sistemas urbanos en tales directrices, sus habitantes quedan condenados a una calidad de vida paupérrima. Tal voluntad política debe quedar representada no sólo en normatividades justas que involucren el bienestar colectivo y no el particular, sino también, en medidas de control y monitoreo que velen por su cumplimiento.

### 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.
- ., 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>.
- Ali, S.A. 2004. Investigation of the dose-response relationship for road traffic noise in Assiut, Egypt. *Applied Acoustics*, **65**:1113-1120.
- ., 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*, Vol. **2**(4):229-236.
- Arana, M. 1989. Estudio del Ruido Ambiental en Pamplona. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia.
- ., Asian, J.M. 2001. Elaboración de Mapas Acústicos Mediante Técnicas Computacionales. Universidad Pública de Navarra. [http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=91](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=91).
- ., García, A. 1998. A Social Survey on the Effects of Environmental Noise on the Residents of Pamplona, Spain. *Applied Acoustics*, **53**(4):245-253.
- Arana, B.M., García, A. 2001. Variación temporal de los niveles de contaminación sonora en Pamplona y Valencia. *Tecnicacústica*, La Rioja 1-6.
- Arana, M., Martínez de Virgala, A., Aleixandre, A., San Martín, M.L., Vela, A. 2000. Modelos de Predicción del Ruido de Tráfico Rodado. Comparación de Diferentes Standards Europeos. Univ. Púb. de Navarra. <http://www.sea-acustica.es/publicaciones/4350ba015.pdf>.

- Austroroads.** 2005. Modelling, Measuring and Mitigating Road Traffic Noise. Project No. TP1085, Sydney. <http://www.austroroads.com.au/>.
- Babisch, W.** 2005. Traffic, noise and health. En: Environmental Health Impacts of Transport and Mobility, P. Nicolopoulou-Stamati et al. (eds) pp. 9-24. Springer, Netherlands.
- 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.
- Belojevic, G., Jakovljevic, B., Stojanov, V., Paunovic, K., Ilic, J.** 2008. Urban road-traffic noise and blood pressure and heart rate in preschool children. *Environment International*, **34**:226-231.
- Bhaskar, A., Chung, E., Kuwahara, M.** 2007. Development and implementation of the areawide Dynamic ROad traffic Noise (DRONE) simulator. *Transportation Research Part D* **12**:371-378.
- Bolund, P., Hunhammar, S.** 1999. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, **29**:293-301.
- Calixto, A., Diniz, F.B., Zannin, P.H.T. 2003. The statistical modeling of road traffic noise in an urban setting. *Cities*, **20**(1):23-29.
- Cameron, I., Lyons, T.J., Kenworthy, J.R.** 2004. Trends in vehicle kilometres of travel in world cities, 1960-1990: underlying drivers and policy responses. *Transport Policy* **11**(3):287-298.
- Cammarata, G., Cavalieri, S., Fichera, A.** 1995. A Neural Network Architecture for Noise Prediction. *Neural Networks*, **8**(6):963-973.
- Can, A., Leclercq, L., Lelong, J.** 2007a. Dynamic estimation of urban traffic noise: Influence of traffic and noise source representations. *Applied Acoustics*, doi:10.1016/j.apacoust.2007.05.014.
- \_\_\_\_\_, **Leclercq, L., Lelong, J., Defrance, J.** 2007b. Capturing urban traffic noise dynamics through relevant descriptors. *Applied Acoustics*, doi:10.1016/j.apacoust.2007.09.006.
- Carles, J.L., Barrio, I.L., de Lucio, J.V.** 1999. Sound influence on landscape values. *Landscape and Urban Planning*, **43**:191-200.
- Chiquetto, S.** 1997. The environmental impacts from the implementation of a pedestrianization scheme. *Transp Res*, **2**(2):133-146.
- 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).
- Committee on Models in the Regulatory Decision Process. National Research Council.** 2007. Models in Environmental Regulatory Decision Making. The National Academies Press. Washington, D.C.
- Committee to Review the NIOSH Hearing Loss Research Program.** 2006. Hearing Loss Research at NIOSH: Reviews of Research Programs of the National Institute for Occupational Safety and Health. The National Academic Press, Washington, D.C.
- 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>.
- Cowling, E.B., Grodzinski, W., Breymeyer, A.** 1990. Assessment and Management of Ecological Risks. En: Ecological Risks: Perspectives from Poland and the United States (Polish Academy of Sciences, National Academy of Sciences, Ps: 3 - 13). The National Academies Press, Washington, D.C.
- DAMA - Departamento Técnico Administrativo de Medio Ambiente.** 2007 (consulta). <http://www.dama.gov.co/ruido>
- 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.
- Demirel, H., Sertel, E., Kaya, S., Seker, D.Z.** 2008. Exploring impacts of road transportation on environment: a spatial approach. *Desalination*, **226**:279-288.
- EC - European Communities.** 1996. Commission Green Paper on Future Noise Policy [COM(96)540]. European Commission, Brussels.
- \_\_\_\_\_. 2000. Position paper on EU noise indicators. Luxemburgo. [http://ec.europa.eu/environment/noise/pdf/noise\\_indicators.pdf](http://ec.europa.eu/environment/noise/pdf/noise_indicators.pdf).
- 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).
- Efron, A.** 1971. El mundo del sonido. Ed. Técnicas Marcombo, Buenos Aires.
- El-Fadel, M., Shazbak, S., Baaj, M.H, Saliby, E.** 2002. Parametric sensitivity analysis of noise impact of multihighways in urban areas. *Environmental Impact Assessment Review*, **22**:145-162.
- 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.
- \_\_\_\_\_. 1998. Guidelines for Ecological Risk Assessment. EPA/630/R-95/002F. 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.
- Fidell, S.** 2003. The Schultz curve 25 years later: A research perspective. *J. Acoust. Soc. Am.*, **114**(6):3007-3015.
- Frank, L.D., Stone, B. Jr., Bachman, W.** 2000. Linking land use with household vehicle emissions in the central puget sound: methodological framework and findings. *Transportation Research*, **5**:173-196.
- 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.
- Galilea, P., Ortúzar, J de D.** 2005. Valuing noise level reductions in a residential location context. *Transportation Research Part D*, **10**:305-322.
- Gandía, S.** 2003. Curso de contaminación acústica. Facultad de Física, Dpto. de Termodinámica. Universidad de Valencia. <http://www.uv.es/~segarra/docencia/apuntes%20contam%20sonora/Cont%20Ac%3st%2003-04t.pdf>.
- 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.
- Genaro, N., Torija, A., Ramos, A., Requena, I., Ruiz, D.P., Zamorano, M.** 2009. Modeling environmental noise using artificial neural networks. En: *Ninth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, pp. 215-219, Pisa.
- Gidlöf-Gunnarsson, A., Öhrström, E.** 2007. Noise and well-being in urban residential environments: The potential role of perceived availability to nearby green areas. *Landscape and Urban Planning*, **83**:115-126.
- González, A.E., Rocco, G.** 2007. Contaminación Física en Ambiente Urbano: El Ruido. Fac. Ing. Univ. de la República. Montevideo. [www.cepis.ops-oms.org/bvsaidis/impactos/peru/urgctr008.pdf](http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaidis/impactos/peru/urgctr008.pdf)
- 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.
- Hamed, M., Effat, W.** 2007. A GIS-based approach for the screening assessment of noise and vibration impacts from transit projects. *Journal of Environmental Management*, **84**:305-313.
- Harris, C.M.** 1985. Manual de medidas acústicas y control del ruido. McGraw-Hill.
- 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.
- Janczur, R., Walerian, E., Czechowicz, M.** 2006. Influence of vehicle noise emission directivity on sound level distribution in a canyon street. Part I: Simulation program test. *Applied Acoustics*, **67**:643-658.
- Kabisch, S.** 1998. Interdependencies Between Ecological and Social Problems in Residential Areas. En: *Urban Ecology*, J. Breuste., H. Feldmann, O. Uhlmann (Eds.), ps. 17-22. Springer, Berlin.
- Kageyama, T., Kabuto, M., Nitta, N., Kurokawa, Y., Taira, K., Suzuki, S., Takemoto T.** 1997. A cross-sectional study on insomnia among Japanese adult women in relation to nighttime road traffic noise. *Journal of Sound and Vibration*, **205**(4):387-391.
- Kang, J.** 2002. Numerical modelling of the sound fields in urban streets with diffusely reflecting boundaries. *Journal of Sound and Vibration*, **258**(5):793-813.
- Katti, M., Warren, P.S.** 2004. Tits, noise and urban bioacoustics. *Trends in Ecology and Evolution*, **19**(3):109-110.
- 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.
- Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B., Sanders, J.V.** 1995. Fundamentos de acústica. Limusa, México.
- 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.
- \_\_\_\_\_, **Tao, S., Dawson, R.W.** 2002. Evaluation and analysis of traffic noise from the main urban roads in Beijing. *Applied Acoustics*, **63**:1137-1142.
- Maki, A.W., Slimak, M.W.** 1990. The Role of Ecological Risk Assessment in Environmental Decision Making. En: *Ecological Risks: Perspectives from Poland and the United States* (Polish Academy of Sciences, National Academy of Sciences, Ps 77-87). *The National Academies Press*, Washington, D.C.
- Marek, M.J., Kassenberg, A.T.** 1990. The Relationship Between Strategies of Social Development and Environmental Protection. En: *Ecological Risks: Perspectives from Poland and the United States* (Polish Academy of Sciences, National Academy of Sciences, Pg: 41-59). *The National Academies Press*, Washington, D.C.
- McDonald, R. I.** 2008. Global urbanization: can ecologists identify a sustainable way forward? *Front Ecol Environ*, **6**(2):99-104.
- Meiarashi, S., Ishida, M., Nakashiba, F., Niimi, H., Hasebe, M., Nakatsuji, T.** 1996. Improvement in the Effect of Drainage Asphalt Road Surface on Noise Reduction. *Applied Acoustics*, **47**(3):189-204.
- 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.
- Memoli, G., Paviotti, M., Kephelopoulos, S., Licitra, G.** 2007. Testing the acoustical corrections for reflections on a façade. *Appl. Acoust.* doi:10.1016/j.apacoust.2007.05.006.
- MAVDT - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.** 2006. Resolución 0627 de abril 7 de 2006. Bogotá.
- Minnesota Pollution Control Agency.** 1999. A guide to noise control in Minnesota. Minnesota. <http://www.noisepollution.org/library/sndbasic/Sound.pdf>.



- Moser, G., Robin, M.** 2006. Environmental annoyances: an urban-specific threat to quality of life? *Revue européenne de psychologie appliquée* **56**:35-41.
- Naciones Unidas.** 2001. World Urbanization Prospects, The 1999 Revision. New York: United Nations.
- . 2004. World Urbanization Prospects: the 2003 Revision. <http://www.un.org/esa/population/publications/wup2003/2003wup.htm>.
- Nelson, J.P.** 2004. Meta-analysis of airport noise and hedonic property values: problems and prospects. *J. Transport Econ. Pol.*, **38**:1-27.
- Nicol, F., Wilson, M.** 2004. The effect of street dimensions and traffic density on the noise level and natural ventilation potential in urban canyons. *Energy and Buildings*, **36**:423-434.
- Nooralahiyani, A.Y., Kirby, H.R., Mckeown, D.** 1998. Vehicle Classification by Acoustic Signature. *Mathl. Comput. Modelling*, **27**(9-11):205-214.
- 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>.
- Pamanikabud, P., Tansatcha, M.** 2003. Geographical information system for traffic noise analysis and forecasting with the appearance of barriers. *Environmental Modelling & Software* **18**:959-973.
- Picaut, J.** 2002. Numerical modeling of urban sound fields by a diffusion process. *Applied Acoustics*, **63**:965-991.
- , **Simon, L.** 2001. A scale model experiment for the study of sound propagation in urban areas. *Applied Acoustics*, **62**:327-340.
- Puigdomènech, J., Jorge, J., Mulet, J.** 1996. Acoustical Impact of Roads on Medium-Sized Mediterranean Coastal Towns. *Applied Acoustics*, **47**:83-92.
- Raimbault, M., Lavandier, C., Bérengier, M.** 2003. Ambient sound assessment of urban environments: field studies in two French cities. *Applied Acoustics*, **64**:1241-1256.
- , **le Dubois, D.** 2005. Urban soundscapes: Experiences and knowledge. *Cities*, **22**(5):339-350.
- Ramírez, A.** 2012. Caracterización y modelación micro y macroscópica del ruido vehicular en la ciudad de Bogotá. Tesis Doctoral, Facultad Estudios Ambientales y Rurales, Universidad Javeriana, Bogotá.
- Ribeiro, S.K., Balassiano, R.** 1997. CO2 emissions from passenger transport in Rio de Janeiro. *Transport Policy*, **4**(2):135-139.
- 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/v%20imp%20amb%20-%20Prov%20amb.pdf> (consultado 2008).
- Rylander, R., Björkman, M.** 2002. Planning consequences of the maximum db(a) concept—a perspective. *Journal of Sound and Vibration*, **250**(1):175-179.
- Saadu, A.A., Onyeonwu, R.O., Ayorinde, E.O., Ogisi F.O.** 1996. Community Attitudinal Noise Survey and Analysis of Eight Nigerian Cities. *Applied Acoustics*, **49**(1):49-69.
- 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)
- Sasazawa, Y., Kawada, T., Kiryu, Y., Suzuki S.** 2004. The relationship between traffic noise and insomnia among adult Japanese women. *Journal of Sound and Vibration*, **277**:547-557.
- Skånberg, A., Öhrström, E.** 2002. Adverse health effects in relation to urban residential soundscapes. *Journal of Sound and Vibration*, **250**(1):151-155.
- Tang, U.W., Wang Z.S.** 2007. Influences of urban forms on traffic-induced noise and air pollution: Results from a modelling system Environmental. *Modelling & Software*, **22**:1750-1764.
- Thorsson, P.J., Ögren, M.** 2005. Macroscopic modeling of urban traffic noise – influence of absorption and vehicle flow distribution. *Applied Acoustics*, **66**:195-209.
- Tree Trust & Bonestroo.** 2007. City trees. Sustainability guidelines & best practices. [www.treetrust.org](http://www.treetrust.org).
- Trombetta, P.H.** 2006. Occupational noise in urban buses. *International Journal of Industrial Ergonomics*, **36**:901-905.
- , **Diniz, F.B., Barbosa, W.A.** 2002. Environmental noise pollution in the city of Curitiba, Brazil. *Applied Acoustics*, **63**:351-358.
- Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.** Consulta 2008. Guía de aplicación. Calidad ambiental en la edificación para Las Palmas de Gran Canaria. Islas canarias. Manuales de diseño Icaro. <http://editorial.dca.ulpgc.es/ftp/ambiente/00-Apuntes-2006/3-Clima/Clima-R.pdf>.
- Viollon, S., Lavandier, C., Drake, C.** 2002. Influence of visual setting on sound ratings in an urban environment. *Applied Acoustics*, **63**:493-511.
- Vitoria-Gasteiz.** 2007. Plan de Acción Ambiental de la Agenda 21 de Vitoria-Gasteiz, 2002-2007. <http://www.vitoria-gasteiz.org/ceac/agenda21/indicadores/01contaminacion.html>.
- Warren, P.S., Katti, M., Ermann, M., Brazel, A.** 2006. Urban bioacoustics: it's not just noise. *Animal Behaviour*, **71**:491-502.
- Williams, I.D., McCraeb, I.S.** 1995. Road traffic nuisance in residential and commercial areas. *The Science of the Total Environment*, **169**:75-82.
- Winters, M., Friesen, M.C., Koehoorn, M., Teschke, K.** 2007. Utilitarian Bicycling. A Multilevel Analysis of Climate and Personal Influences. *Am J Prev Med*, **32**(1):53-58.

Recibido: enero 20 de 2010.

Aceptado para su publicación: diciembre 2 de 2011.

# DEFORESTACIÓN Y DINÁMICA DEL BOSQUE SECUNDARIO EN LA AMAZONIA COLOMBIANA 1986-2000

Jorge Ruiz<sup>1,4</sup>, Wilmar Cárdenas<sup>2</sup> y Claudia Baquero<sup>3</sup>

## Resumen

**Ruiz J., W. Cárdenas, C. Baquero:** Deforestación y dinámica del bosque secundario en la Amazonia colombiana 1986-2000. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (137): 531-545, 2011. ISSN 0370-3908.

La Amazonia colombiana cubre 477.375 km<sup>2</sup> correspondientes a 41.7% de la plataforma continental colombiana. El bosque amazónico colombiano es, por su área, el más importante del país pues representa más de la mitad de toda su cobertura boscosa. Sin embargo, es poco lo que se sabe sobre su dinámica. Para la Amazonia colombiana, existen considerables diferencias en los estimativos de tasas de deforestación y tasas de sucesión, hecho que tiene enormes repercusiones sobre el balance neto de estos bosques en las cuentas nacionales de CO<sub>2</sub>. Se llevó a cabo una clasificación supervisada de 29 pares de imágenes LANDSAT TM y ETM+ hacia alrededor de 1986 y 2000 para cinco categorías de coberturas de la tierra: agua, praderas naturales, agroecosistemas, arena y afloramiento rocoso. Los resultados sugieren que a pesar de haber regiones con un proceso de sucesión de 620 km<sup>2</sup>, el resultado neto es que durante este período se perdieron unos 12.200 km<sup>2</sup> de bosque, aproximadamente 852 km<sup>2</sup> anuales, y paralelamente el bosque secundario creció anualmente en 43,3 km<sup>2</sup> arrojando una tasa anual de deforestación o “r” de 0,23%. En otras palabras, aproximadamente entre 1986 y el 2000, se deforestó el 2,8% de la Amazonia colombiana. Las mayores tasas de deforestación se observaron al occidente de los departamentos de Putumayo y Caquetá y el suroccidente del Meta. No obstante, se evidencia un proceso de sucesión en la parte central de Caquetá, el noroccidente del Amazonas y Vaupés y Guainía oriental. Los resultados obtenidos cuestionan seriamente los reportados anteriormente, siendo el área deforestada anual en Km<sup>2</sup> un orden de magnitud menor.

**Palabras clave:** Amazonia, Colombia, deforestación, sucesión, teledetección.

- 1 Departamento de Investigaciones, Universidad de La Salle, Carrera 4B No. 59-28. Bogotá, D. C. Colombia.
- 2 Departamento de Economía, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales. Universidad de La Salle, Carrera 4B No. 59-28.
- 3 Jefe de Mercadeo y Producto, Banco ProCredit, Calle 36 No. 16-20, Bogotá, D. C. Colombia.
- 4 Dirección postal: Escuela de Ciencias Sociales, Edificio Central, 3er. Piso. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Avenida Central del Norte, Santiago de Tunja, Boyacá, Colombia. Correo electrónico: jorge.ruiz@uptc.edu.co

### Abstract

The Colombian Amazon covers 477,375 km<sup>2</sup> that accounts for 41.7% of the country's continental platform. The Colombian Amazonian forest is, by its area, the most important in the country, accounting for over one half of Colombia's forest cover. However, little is known about its dynamics. There are considerable differences between secondary forest and deforestation estimates for this region. This fact has profound repercussions on the net CO<sub>2</sub> national balance. A supervised classification was performed for 29 pairs of LANDSAT TM and ETM+ satellite images between 1986 and 2000 for five land cover types: natural pastures, agro-ecosystems, sand, water and rock outcrops. Results suggest that in spite of regions with a succession process of 620 km<sup>2</sup>, about 12,200 km<sup>2</sup> were deforested, approximately 852 km<sup>2</sup> annually and an annual growth of secondary forest of 43.3 km<sup>2</sup> for an annual deforestation rate or "r" of 0.23%. In other words, 2.8% of the Colombian Amazonian forest was lost between 1986 and 2000. The greatest deforestation rates were observed to the west of the territories of Putumayo and Caqueta and to the southwest of Meta. However, succession took place in central Caquetá, northwestern Amazonas, Vaupes and eastern Guainia. Results obtained here seriously question deforestation measured in squared km<sup>2</sup> per annum, previously reported, being one order of magnitude lower.

**Key words:** Amazonia, Colombia, deforestation, succession, remote sensing.

### Introducción

La cuenca amazónica no tiene paralelo global por su biodiversidad y los servicios ambientales que ofrece. No obstante, existen considerables diferencias en cuanto a la contabilidad de la dinámica boscosa en América Latina. En efecto, **Lambin & Geist** (2003) estiman que la deforestación de los bosques húmedos de América Latina para el período comprendido entre 1990 y 1997 fue de 25,000 km<sup>2</sup>, siendo el rango entre 11,000 a 39,000 km<sup>2</sup>; para el mismo período el bosque secundario creció 3,000 km<sup>2</sup>, con un intervalo de 1,000 a 5,000 km<sup>2</sup>. La evidencia parece sugerir que si bien continúa el proceso histórico de deforestación de bosque maduro amazónico (**Fearnside & Barbosa**, 2004), paralelamente, el bosque secundario ha crecido considerablemente (**Coomes et al.**, 2000).

Es un lamentable hecho que a pesar de contar con la tecnología y los recursos adecuados, no se conoce con exactitud el área de bosques talados ni el crecimiento del bosque secundario en Colombia. Se han manejado estimativos muy generales y con amplios márgenes de error. Existe una urgente necesidad de obtener información veraz sobre la extensión, deforestación, estructura, regeneración y diversidad de los bosques tropicales (**Quiñones**, 2002). En el caso colombiano, los estimativos de deforestación a nivel nacional, así como de su distribución espacial, varían sustancialmente entre 1,800 km<sup>2</sup> y 8,000 km<sup>2</sup> por año, dependiendo de los autores y las fuentes de información utilizadas (**FAO**, 2004). En el año 2004 la FAO estableció la tasa de deforestación para el período entre 1990 y 2000 en 1,905 km<sup>2</sup> por año, con base en una regresión lineal en la que se utilizaron datos de algunos depar-

tamentos correspondientes a los años 1975, 1980 y 1996. Según **Vanegas** (1993), sin mencionar de qué forma se llega a estas cifras, entre 1962 y 1987 se sustrajeron de la Reserva Forestal de la Amazonia 59,000 km<sup>2</sup>, para un promedio anual de 2,360 km<sup>2</sup>.

La Amazonia colombiana abriga seis por ciento de toda la cuenca, siendo la cuarta en extensión después de las de Brasil, Perú y Bolivia. El Amazonas colombiano cubre un área de 477.375 y da cuenta de casi la mitad de la plataforma continental colombiana. El bosque amazónico es el más grande del país y representa más de la mitad de la cobertura boscosa colombiana. No obstante, estos ecosistemas se encuentran pobremente estudiados en comparación a sus contrapartidas brasileñas (**Armenteras et al.**, 2006). En contraste con el Amazonas brasileño, el bosque amazónico colombiano no fue sustancialmente transformado como resultado de las bonanzas de la quinina y el caucho (**Palacio**, 2004). Empero, hay evidencia de profundas transformaciones de la región amazónica, por ejemplo en el norte del Guaviare (**Quiñones**, 2002, **Martínez et al.**, 1997; **Etter**, 1991) así como en las zonas occidentales como el Caquetá (**Van der Hammen y Andrade**, 2003). La Amazonia colombiana sufre deforestación por colonos provenientes del interior, así como de grandes ciudades amazónicas como Iquitos, Florencia y Leticia (**Duivenvoorden y Lips**, 1995). Es de agregar el impacto por la exploración y extracción de petróleo en la parte occidental, así como la expansión de la frontera agrícola, incluidos los cultivos ilícitos. Según **García** (1999), el aumento espectacular del crecimiento del área cultivada en coca se debe a la pobreza del campesino colono que no tiene alternativas de cultivos lícitos.

Estudios recientes en la región siguen siendo muy puntuales. **Riaño y Gutiérrez** (2007) abordaron tan solo la frontera tripartita entre Colombia, Brasil y Perú; mientras que **Etter et al.** (2006a) y **Armenteras et al.** (2006) estudiaron cinco zonas muestreadas en el Caquetá y seis en toda la Amazonia respectivamente. Además, surge el problema de imputar las tasas observadas al resto de la Amazonia colombiana, o por el contrario, las pesquisas trabajan con una resolución espacial muy amplia como en el trabajo de **Etter et al.** (2006b). Cabe subrayar que es notable la ausencia de estudios para el departamento del Putumayo.

El trabajo más importante acerca del la dinámica del bosque amazónico hasta la fecha fue contratado por el IDEAM con la empresa Prosis S. A. En esa ocasión se adelantó una comparación entre 1986 y 1996 mediante una clasificación de las coberturas por fotointerpretación en imágenes satelitales LANDSAT Thematic Mapper (LANDSAT TM). Cabe anotar que algunas de las imágenes utilizadas fueron las mismas para ambos períodos, presumiblemente por no contarse con alguna libre de nubes para un año en particular. Los resultados de ese estudio despertaron controversia en la comunidad ambiental colombiana al sugerir una disminución de la deforestación. Como si lo anterior fuera poco, la tasa de deforestación propuesta por el IDEAM (2002) es sensible al tamaño del área de estudio, como se observa más adelante. El presente estudio se ha realizado como una aproximación que busca solucionar esta falencia.

La evidencia científica sugiere que aún falta una evaluación total más precisa de la dinámica de los bosques en la Amazonia colombiana. El IDEAM (2002) llamó la atención sobre la urgencia de establecer la tasa media anual de deforestación en la Amazonia colombiana como consecuencia de la intervención antrópica, como monitoreo de las zonas de colonización y seguimiento al estado de los ecosistemas y como herramienta de gestión ambiental por parte de las entidades locales y regionales. En efecto, los objetivos de protección ambiental requieren de la documentación de la tasa y extensión de la deforestación (**Sánchez-Azofeifa et al.** 2003). No obstante, la cuantificación de la deforestación no es un asunto fácil (**Laurance et al.** 2004; **Fearnside & Laurance**, 2003; **Wood** 2002) particularmente en Colombia, debido a la persistente cobertura de nubes en el piedemonte, esto es, la vertiente oriental de la cordillera oriental así como por problemas de orden público, entre otros.

Hay al menos tres asuntos que se deben tomar a consideración cuando se estudia la deforestación y sucesión en la Amazonia. Primero, las altas tasas de abandono de la tierra, segundo la agricultura itinerante y por último, la rápida sucesión de arbustos a árboles (**Steininger**, 2000).

Considerando que el bosque amazónico colombiano es el más grande del país, las conclusiones sobre la dinámica en su cobertura tienen enormes repercusiones en el balance nacional neto del dióxido de carbono. De los tres componentes principales de dicho balance, Energía, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (CUTS) y Agricultura, el segundo es el que más incertidumbre encierra (UNFCCC, 2003). El efecto es tan grande que no importa que tan precisas sean las estimaciones en los módulos de Energía y Agricultura, no son comparables al efecto de incertidumbre que encierra del módulo CUTS, en particular en un país como Colombia por el tamaño de sus bosques. En efecto, existe una diferencia de un orden de magnitud al comparar los resultados obtenidos en relación con el módulo CUTS entre el estudio adelantado por el IDEAM (2001), esto es 11,880 Giga gramos (Gg) de CO<sub>2</sub> y los registrados por **González** (1998), estimados en 111,275 Gg. Las diferencias de los otros dos módulos, Energía y Agricultura, son irrelevantes y no significativas si se tienen en cuenta los respectivos intervalos de confianza. La diferencia en clasificar a Colombia como productor o sumidero de CO<sub>2</sub> está íntimamente ligada al estimativo de las tasas de deforestación y sucesión que utilizó cada fuente. El IDEAM (2001) se basó, entre otros, en los resultados del estudio contratado a PROSIS, mientras que **González** (1998) se apoyó en los estimativos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). **González** (1998) utilizó una cifra de deforestación de 3,670 km<sup>2</sup> anuales, endosando el estudio de la FAO (1994) aunque consideró que posiblemente esta cifra era muy alta, pudiendo ser del orden de 1,500 km<sup>2</sup>. El estudio de la FAO (1994) a su vez estimó la deforestación para el período 1981 - 1990 basándose en datos oficiales de entidades relacionadas con los bosques. El objetivo del presente estudio no es calcular las cuentas nacionales de gases de efecto invernadero, como si lo es, brindar información más precisa sobre las tasas de deforestación y crecimiento del mayor bosque colombiano, como uno de los insumos para reducir la incertidumbre en el módulo CUTS.

El tipo de sensor, óptico versus radar, es motivo de debate entre la comunidad especializada en teledetección. A pesar de los problemas intrínsecos de trabajar con teledetección óptica en comparación a la de radar, los trabajos que utilizan la primera técnica han sido considerablemente más frecuentes que los segundos en el estudio del cambio de la cobertura boscosa en la cuenca amazónica (**Asner**, 2000). Incluso se han empezado a utilizar sensores de alta resolución como IKONOS. Estos llegan a ofrecer información sin precedentes sobre estructura y composición de los bosques (**Souza & Roberts**, 2005, **Turner et al.** 2003).

Numerosos estudios en Ecuador, Brasil, Perú, Bolivia y Colombia han evaluado las tasas de crecimiento del bosque secundario y de deforestación en la cuenca Amazónica utilizando el satélite LANDSAT, a pesar de la problemática surgida por la cobertura de nubes por ejemplo: **Alves et al.**, 1999; Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - **INPE**, 2005). **Alves** (2002), en su estudio sobre deforestación de la Amazonia brasileña con base en pares de imágenes LANDSAT TM, entre 1991 y 1996 encontró entre un sexto y un 30% de los estados brasileños objeto de estudio con cobertura de nubes, en tanto que decidió descartar el estado de Amapá por presentar un 60% de cobertura nubosa. No es claro que metodología utilizó para estimar la tasa de deforestación neta no dependiente del efecto de nubes, ya que tanto la tasa obtenida como su ubicación geográfica pueden ser resultado de la diferente cobertura nubosa.

Una vez superado el obstáculo de imágenes ópticas, idealmente sin nubes o con menos del 20% de cobertura con nubes, concurren una gran variedad de metodologías a aplicar para identificar cambios en la cobertura boscosa. Existen dos aproximaciones principales para determinar la deforestación así como el crecimiento del bosque secundario. Por una parte, la aproximación multitemporal en teledetección, y por otra, un par imágenes o en su defecto, una sola imagen en la cual se determina la edad del bosque por sus características reflectivas. Sobre esta última alternativa cabe mencionar que se hace difícil distinguir la edad sucesional del bosque a partir de las firmas espectrales. El clasificar erróneamente el bosque sucesional como en clima subestima el papel del bosque, ya que éste último se encuentra en balance carbónico, mientras que el bosque sucesional secuestra carbono y actúa como sumidero (**Grau et al.**, 2004; **Brown & Lugo**, 1990). En efecto, una amplia literatura presenta evidencia que el bosque joven se confunde con el viejo. **Mausel et al.** (1993) sostienen que, con base en imágenes LANDSAT TM, a los siete años el bosque secundario se confunde con el bosque maduro amazónico. Otros estudios, utilizando el mismo sensor, concluyen que a esta situación se llega solo a los 15 años (**Nelson et al.**, 2000; **Foody et al.**, 1996; **Steininger**, 2000; **Moran et al.**, 1994, 2000). Es importante subrayar que en ocasiones las imágenes LANDSAT TM y/o Enhanced Thematic Mapper (ETM+) no pueden distinguir las edades sucesionales del bosque húmedo, tal y como lo reportaron **Sader et al.** (1989) para Puerto Rico y **Steininger** (2000) para Bolivia. En el caso de bosque seco tropical, **Ruiz** (2002) asegura que utilizando LANDSAT 7 ETM+ y con base en las pruebas de rango múltiple de Duncan, se puede distinguir el bosque sucesional menor de 6 años con el de más de 56, mientras que las edades intermedias se confunden tanto con las más jóvenes como con las mayores.

El objetivo del presente estudio es determinar las tasas de deforestación y de crecimiento del bosque secundario, así como su distribución espacial mediante el uso de dos ventanas del sensor LANDSAT TM y ETM+ desde mediados de 1986 hasta alrededor del año 2000 aproximadamente; para un período entre las dos de 14.32 años. La pesquisa tiene relevancia tanto global como para Colombia en el sentido de brindar información fundamental para poder estimar eventualmente, y con mayor precisión a lo abordado a la fecha, si el país es emisor o sumidero de CO<sub>2</sub>, al menos en lo que respecta a la región biogeográfica con mayor extensión boscosa, como lo es la Amazonia.

### Descripción del área de estudio

Se tomó el perímetro de la Amazonia definido por el Instituto SINCHI de Investigaciones Amazónicas (2011), según el cual la Amazonia colombiana cubre un área de aproximadamente 477.375 km<sup>2</sup>, equivalentes al 41.7 por ciento de la plataforma continental del país. Esta área es considerablemente mayor a la reportada por otros autores; por ejemplo, **Domínguez y Gómez** (1990) la estimaron en tan solo 336,583 km<sup>2</sup> mientras que **Mejía** (1990) la situó en 403,000 km<sup>2</sup>. Según el perímetro del SINCHI, la divisoria de aguas del costado oriente de la cordillera oriental se considera como borde occidental. Si bien en esta zona se alcanzan alturas superiores a los 3,000 m y por ende no constituye bosque amazónico como tal, desde el punto de vista florístico (**Murcia**, 2005, comunicación personal), la mayoría de los ríos amazónicos colombianos nacen allí. Según la definición aquí utilizada, el límite norte de la Amazonia colombiana esta dado al noroccidente por el río Ariari, el Río Guaviare en la parte norte central y luego el Río Vichada en el nororiente. Los límites oriental y sur de la Amazonia están dados por la división política internacional que, en ocasiones, sigue los cauces de algunos ríos como el Orinoco, Putumayo y Amazonas.

Aproximadamente un 80% de la Amazonia colombiana presenta cobertura boscosa que no se debe considerar como un solo ecosistema, sino como un conjunto que incluye bosques de tierra firme, bosques inundables, bosque maduro y bosque achaparrado, entre otros. El resto lo componen: cuerpos de agua, agro-ecosistemas, arena y afloramientos rocosos. Aproximadamente 9,000 Km<sup>2</sup> de afloramientos rocosos existen en la Amazonia colombiana, más que todo en el Caquetá medio y una parte menor en la Amazonia oriental. Como se verá más adelante, por su extensión, esta fue una de las coberturas abordadas desde la teledetección. Estos afloramientos son de especial importancia ecosistémica por sus características geomorfológicas, siendo que se caracterizan por ser formaciones

calcáreas de las eras Paleozoica y Mesozoica (Arbeláez & Parrado-Rosselli, 2005).

### Materiales y métodos

En total 29 imágenes del sensor TM a bordo del satélite LANDSAT cubren la Amazonia colombiana. Algunas de estas imágenes se requieren en su totalidad, otras solo en parte (Tabla 1). Se hizo un análisis del inventario de estas

**Tabla 1.** Lista con fechas de las 29 imágenes LANDSAT TM y ETM+ que comprenden la Amazonia colombiana, circa 1986 y 2000

Imagen Número ("Path_Row")	Area usada en km <sup>2</sup>	Fecha		Años entre fechas
		circa 2000	circa 1986	
3_58	5,524	24-abr-01	04-oct-87	13.56
3_59	4,191	24-abr-01	25-oct-86	14.51
4_57	17,792	09-ene-01	09-oct-85	15.26
4_58	31,456	14-mar-01	04-oct-85	15.45
4_59	9,975	14-mar-01	09-oct-85	15.44
4_60	3,375	08-oct-01	09-oct-86	15.01
4_61	16,518	08-oct-01	20-oct-86	14.98
4_62	11,824	20-nov-99	20-oct-86	13.09
4_63	3,476	20-nov-99	06-oct-86	13.13
5_57	13,394	01-feb-01	01-oct-86	14.35
5_58	27,677	01-feb-01	01-oct-86	14.35
5_59	26,591	29-dic-99	01-oct-86	13.25
5_60	24,957	13-nov-00	01-oct-86	14.13
5_61	25,601	24-jul-00	01-oct-86	13.82
5_62	4,249	08-sep-99	01-oct-86	12.95
6_58	21,358	12-mar-01	03-oct-85	15.45
6_59	26,945	05-ene-00	05-oct-87	12.26
6_60	22,765	13-mar-01	03-oct-85	15.45
6_61	25,509	01-oct-99	08-oct-86	12.99
6_62	3,55	12-mar-01	03-oct-85	15.45
7_58	11,498	03-mar-01	03-oct-85	15.42
7_59	29,624	25-jul-01	08-oct-85	15.81
7_60	24,975	08-sep-00	26-oct-85	14.88
7_61	7,883	13-dic-00	08-oct-85	15.19
8_58	12,814	30-ago-00	24-oct-86	13.86
8_59	30,134	30-ago-00	23-oct-87	12.86
8_60	13,383	30-ago-00	23-oct-87	12.86
9_59	14,36	24-ago-01	23-oct-86	14.85
9_60	5,977	09-nov-01	23-oct-86	15.06
<b>Promedio Total</b>	<b>477,375</b>	21-nov-00	26-jul-86	14.32

imágenes en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). El objetivo era evaluar la disponibilidad de imágenes con el fin de comparar los cambios de la cobertura boscosa en al menos dos momentos o ventanas, siendo uno alrededor del año 2000; el otro pudiendo ser en la década de los 70s, 80s o 90s. En el caso de estas últimas, la década de los 80s resultó ser la más completa, esto es, el mayor número de imágenes LANDSAT 5 TM en los archivos del IDEAM. Para el caso de la década del 2000, se descargaron del portal del *Global Land Cover Facility* (2008) de la Universidad de Maryland 28 de las 29 imágenes de satélite LANDSAT 7 ETM+.

Las imágenes de la década del 2000 son las más precisas de la serie LANDSAT en cuanto a su ubicación real, debido a que el satélite LANDSAT 7 y el sensor ETM+ entraron en órbita en 1999, dotados de la última tecnología. En ERDAS IMAGINE versión 8.5 se georreferenciaron las 29 imágenes de satélite de la década de los 80s, con base en las imágenes LANDSAT 7 ETM+ ya mencionadas (Tabla 1). Ambas ventanas de teledetección se manejaron en el sistema de coordenadas "Universal Transverse Mercator (UTM)", zona 17 tanto norte como sur; y el datum del "World Geodetic Survey" de 1984 (WGS84). El período promedio transcurrido entre las dos ventanas, de 14.32 años, se logró obteniendo las fechas para cada imagen del metadato, luego substrayéndolas, la más reciente de la más antigua y finalmente calculando el promedio (Tabla 1). El menor rango fue de 12.26 años y el mayor de 15.45 años.

En el proceso de georreferenciación del conjunto de datos de la década de los 80s, para cada imagen se utilizaron al menos 20 puntos de control usando los pocos lugares de asentamientos humanos identificables en ambas imágenes, como por ejemplo las pistas de aterrizaje; en la mayoría de los casos se utilizaron los puntos de encuentro de cuerpos de agua. Aunque la dinámica fluvial es un hecho en la Amazonia y los ríos cambian constantemente de curso, lo cual inevitablemente introduce errores de posicionamiento, no existe otra alternativa.

Se llevó a cabo un trabajo de verificación de campo con visitas al sur de la Amazonia colombiana con geoposicionadores (GPS) para obtener puntos de control, así como para identificar áreas piloto para la identificación de áreas de modelo de la clasificación digital supervisada en el software ERDAS IMAGINE 8.5. Esta última consiste en indicar al programa, mediante la digitación de polígonos, con tono o color similar, las clases discretas de las áreas modelo (NASA, 2011) como por ejemplo, cuerpos de agua, bosque inundado, bosque joven, bosque maduro de tierra firme, etc. Vale la pena anotar que en las áreas modelo

escogidas en ERDAS IMAGINE 8.5, se obtuvieron mejores resultados con varias muestras de tamaño pequeño en lugar de las de gran tamaño. Por ejemplo, se obtienen mejores resultados en la clasificación supervisada si se utilizan áreas modelo de ríos pequeños. El caso contrario no produjo buenos resultados, esto es, utilizar grandes áreas en los grandes ríos no clasificó correctamente a los pequeños ríos. La realización de visitas al resto de la Amazonia hubiera sido valiosa; sin embargo, estas visitas no fueron viables a la luz del tamaño de la región, del tiempo disponible, el presupuesto del proyecto y por último pero no menos importante, por los problemas de orden público.

Se desarrolló un procedimiento raso basado en la comparación posterior a las dos clasificaciones. El primer paso fue escoger las mejores imágenes, esto es, con la menor cobertura de nubes, entre las disponibles para completar el juego de las 29 y establecer para cada una su área y el día, mes y año. Esto es muy importante ya que consiste la base de las fechas entre las dos ventanas, además permite calcular el peso de la deforestación o del crecimiento del bosque secundario en el escenario regional (Tabla 1) como se explica más adelante. A la luz de la sobreposición que se presenta entre cada imagen y sus cuatro imágenes contiguas, fue necesario realizar cortes de las mismas. Aquí se siguieron dos criterios, en primer lugar cortar más del área de sobreposición en las imágenes con mayor cobertura de nubes y en segundo lugar, seguir el perímetro propuesto por el SINCHI. Una vez finalizada la etapa de clasificación se corrió un cedazo de tres por tres celdas, cada celda midiendo 30 x 30 m, con el fin de mejorar los resultados y reducir el peso de memoria de la imagen clasificada. En esta forma se obtiene una unidad mínima de mapeo de 90 x 90 metros, equivalentes a 0.81 ha. Este procedimiento tiene un profundo efecto a nivel de ecosistemas. Todos los relictos de bosque o, para ser más exactos, de cualquier tipo de cobertura, menores a esta área son eliminados. Esta área sobrepasa la exigencia de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2004) para lo que es un bosque, según este organismo un bosque debe tener al menos media hectárea. Eso significa que se aumenta la velocidad de procesamiento al reducir la resolución espacial al generalizar las categorías pero se eliminan los parches de todas las categorías, incluido el bosque con áreas inferiores a este umbral. Por tratarse de una aproximación a gran escala de paisaje, el anterior procedimiento no compromete de forma alguna los resultados del estudio.

Hay que considerar que los resultados regionales no son tan fieles como los que se pueden obtener imagen por imagen. Por ejemplo, la vertiente oriental de la cordillera

oriental presenta persistentemente cobertura de nubes y es al mismo tiempo una zona con altas tasas de deforestación. El asignarle un promedio de un departamento, por ejemplo Caquetá, sin lugar a dudas introduciría errores. Es por esto que los estimativos de crecimiento del bosque secundario o de deforestación se llevaron a cabo “imagen por imagen” o corte de imagen utilizados y luego se estimó el total para la Amazonia colombiana. Este método adicionalmente permite observar la distribución espacial de la deforestación, zonas sin cambio o crecimiento del bosque secundario.

Se utilizó para la clasificación de las coberturas de la tierra el Nivel I de clasificación CORINE (*Coordination of Information on the Environment*) Land Cover desarrollado por la Agencia Ambiental Europea, con algunas variantes como se describe a continuación:

**Vegetación natural:** Es el agrupamiento vegetal con predominio de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas, conocidas como autóctonas de la zona, asociadas generalmente a fauna silvestre. Esta categoría se subdividió en dos clases: Bosques y pasturas naturales. En este orden de ideas, se hizo la distinción del pasto natural común en la Orinoquía colombiana, así como en la cercanía de la Sierra de la Macarena, fruto de la intervención humana. A pesar de que ambas clases de pasturas fácilmente se pueden confundir por sus rubricas espectrales, su origen natural o antropogénico reviste vital importancia. El proceso de praderización de la Amazonia, fruto de la quema del bosque, se clasificó como **vegetación cultivada o agroecosistemas**, mientras que las otras sabanas se dejaron como **pradera natural**.

**Agroecosistemas:** Áreas donde la vegetación natural ha sido removida o modificada y reemplazada por diferentes tipos de cobertura vegetal, resultado de actividades antrópicas. Las **pasturas no naturales** están incluidas en esta categoría.

**Cuerpos de agua:** Cualquier área que esté cubierta por agua permanentemente o en algunas épocas del año.

No se tuvieron en cuenta las **superficies artificiales** dadas las características de la zona y la escala de trabajo. Para que tenga sentido esta cobertura en la zona, solo es aplicable a escalas iguales o inferiores a 1:5,000. Sin embargo, se incluyó la categoría **Arena** dadas las playas que se forman en época seca en las riveras. Tampoco se utilizó la categoría **espacios abiertos** sin vegetación. Esta, si bien contemplaba áreas que no tienen cobertura artificial, vegetación o sin presencia de vegetación, fue reemplazada por **afloramiento rocoso**, clase que comprende la roca

desnuda así como la vegetación achaparrada que crece sobre esta. Con el fin de dejar el afloramiento rocoso constante, y reducir el error introducido por clasificar esta clase en cada ventana, se produjeron polígonos de esta clase con base en las mejores imágenes de cada ventana y se utilizaron los mismos polígonos en ambas fechas. Lo anterior evita el problema de tener que utilizar esta clase en el momento de clasificar imágenes en zonas donde no existe afloramiento rocoso, por ejemplo en el Trapecio Amazónico.

La anterior metodología, en armonía con la filosofía de *Corine Land Cover*, permite construir mapas de uso y cobertura de la tierra que se vuelven más complejos a medida que se obtiene mayor información a menor escala. Algunas zonas, como por ejemplo las sombras de nubes sobre las pasturas, se clasificaban erróneamente como bosque, o las pasturas antropogénicas como pasturas naturales. Por lo tanto, tuvieron que ser recodificadas manualmente.

Como era de esperarse, la cobertura de nubes fue diferente para ambas ventanas ver un ejemplo en la Figura 1. En esta se aprecia una cobertura de nubes para 1986 en la parte superior izquierda particularmente sobre un río Para solucionar este problema, se utilizó el programador "Knowledge Engineer" de ERDAS IMAGINE 8.5 con el fin de programar el retiro de las áreas cubiertas por nubes para cada imagen pero para ambas fechas (Ruiz *et al.* 2007). Como resultado se obtienen dos clasificaciones de las imágenes satelitales exclusivamente para las coberturas boscosas y netas de las nubes para tanto la primera como para la segunda fecha, es decir, la cobertura boscosa que en ninguna de las dos fechas tuvo nubes, como se explica mediante un ejemplo a continuación. La cobertura boscosa para el año 2000 esto es Bosque 8 59 00 para la imagen Landsat 7 ETM+ path 8 y row 59 se obtiene a partir de la clasificación del año 2000 (Figura 2) programación que guarda aquellas celdas clasificadas como con cobertura boscosa o aquellas con el número dos (Figura 2). Una regla

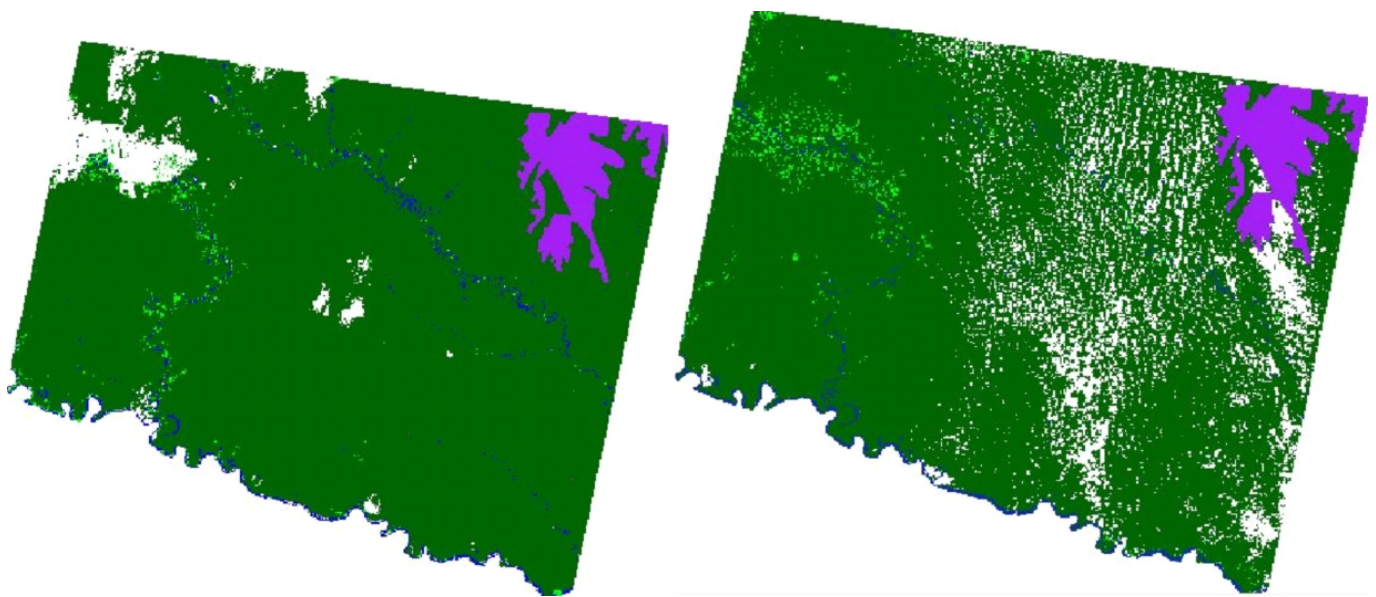


Figura 1. Clasificación de parte de la imagen LANDSAT del "Path" 7 y "Row" 60 correspondiente a parte del Caquetá para 1985 (izquierda) y 2000 (derecha). Nubes en blanco, afloramiento rocoso en morado, cuerpos de agua en azul, agro-ecosistemas en verde claro y bosque en verde oscuro.

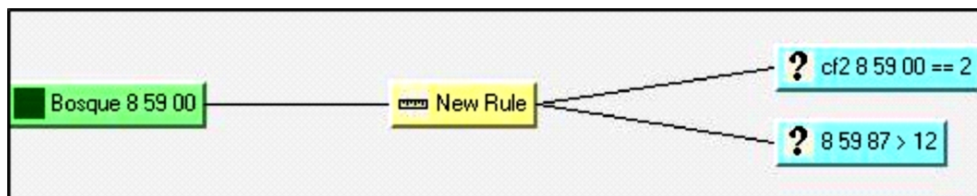


Figura 2. Un ejemplo del procedimiento utilizado la herramienta "Knowledge Engineer" de ERDAS IMAGINE 8.5 para determinar la cobertura boscosa en la década del 2000 neta de nubes de 1987, para la imagen LANDSAT 8\_59. La programación guarda aquellas celdas clasificados en el 2000 como bosque (extremo izquierdo de la figura), esto es iguales a la clase dos y que adicionalmente no fueran nube en 1987, esto es mayores a 12, ya que 12 fue la clase correspondiente a nubes.



adicional que se debe cumplir para guardar una celda en esta rutina es cada celda en el 2000 de bosque no fuera cubierta por nubes en la imagen de 1987, en el ejemplo, mayor a 12 (Figura 2). Como resultado se obtiene la cobertura boscosa del 2000 excluyendo las celdas que correspondían a nubes en 1987. Se debe llevar a cabo el mismo procedimiento pero al revés, esto es, la cobertura boscosa de 1987 neta de nubes del 2000. En otras palabras, se retira exactamente en cada imagen las celdas que tuvieron cobertura nubosa en ambos períodos y que adicionalmente fueron clasificadas como bosque, de tal forma que se tiene una comparación de las zonas que en ninguno de los dos períodos tuvieron cobertura de nubes pero que además fueron bosque. En detalle se aprecia un aumento de la deforestación en sentido noroccidente-suroriente (Figura 3).

Finalmente, las estadísticas de las celdas de cada clasificación para cada par de imágenes, alrededor de 1986 y 2000, se extraen de ERDAS IMAGINE 8.5 y luego se pasan a EXCEL para su procesamiento. Las zonas que se retiraron por cobertura de nubes alrededor del 2000 se les imputan lo observado en 1986-2000, lo anterior bajo el supuesto que tuvieron el mismo comportamiento de aquellas regiones que se pudieron observar. En otras palabras, se asume que en estas zonas de nubes ocurrió lo mismo que en las zonas que no tuvieron nubes. Como resultado se hace una evaluación más precisa del proceso de deforestación, o sucesión.

El siguiente paso consiste en calcular las tasas de deforestación, una vez se ha imputado lo observado para los dos períodos para las zonas de nubes del último período. Se utilizó un indicador en términos relativos como lo es la tasa media de deforestación propuesta por **Dirzo &**

**García** (1990), el cual no se ve afectado por el tamaño de las parcelas estudiadas:

$$r = 1 - [1 - ((A1 - A2)/A1)]^{1/t}$$

Donde:

$r$  es la tasa de deforestación,  
 $A1$  es el área de bosque en el primer período,  
 $A2$  en el segundo y  
 $t$  es el número de años entre ambos períodos.

La anterior metodología no es se ve afectada por el tamaño de las parcelas como lo es la propuesta del **IDEAM** (2002), esta última pudiendo dar una impresión equivocada sobre la dinámica del bosque al comparar dos áreas de distinto tamaño.

La tasa media anual de deforestación en  $\text{km}^2$  que propone el **IDEAM** (2002) es la siguiente:

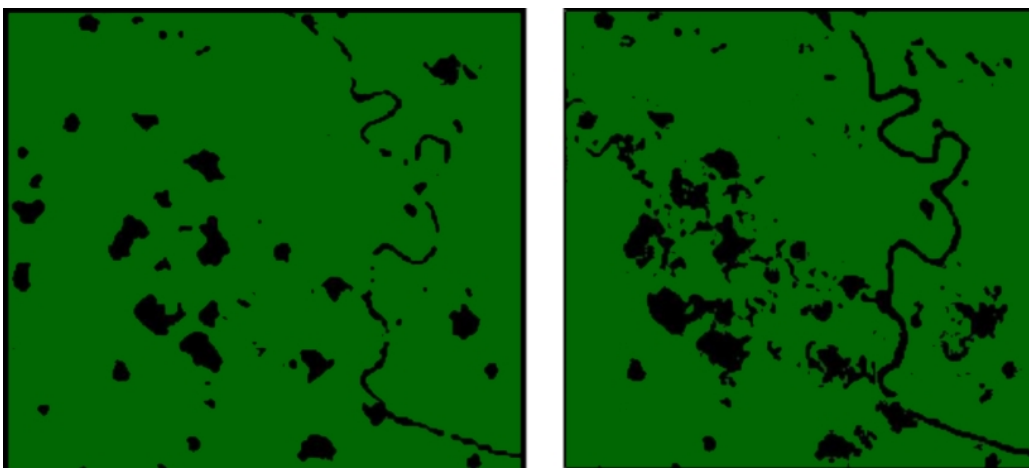
$$\text{TMAD} = (AB_1 - AB_2) / (A\tilde{N}O_2 - A\tilde{N}O_1)$$

Donde:

TMAD = Tasa Media Anual de Deforestación  
 $AB_1$  = Área en bosque primera evaluación  
 $AB_2$  = Área en bosque segunda evaluación  
 $A\tilde{N}O_2$  = Año última evaluación  
 $A\tilde{N}O_1$  = Año primera evaluación

## Resultados

El proceso de georreferenciación del conjunto de imágenes de los años 80s con base en el conjunto del 2000



**Figura 3.** Detalle del "Path" 7 "Row" 60 de la cobertura boscosa en 1987 y 2000 con el retiro de nubes para ambas fechas en ambas imágenes, o sea la zona que en ninguna de las dos fechas tuvo nubes, donde se aprecia un aumento de la deforestación.

arrojó buenos resultados, lo cual se pudo apreciar por la buena superposición de los ríos, centros poblados, entre otros, para las imágenes de ambas fechas. No obstante, el ajuste con el perímetro proporcionado por el SINCHI no fue tan preciso, esto quiere decir que por ejemplo no ajustó bien el curso de los ríos en límite internacional con el perímetro del SINCHI.

En 22 de los 29 pares de imágenes estudiados se observó un proceso de deforestación que varió entre un

mínimo de 0,2% en la imagen 7\_59, hasta un máximo de 41,2% en la imagen 9\_60 (Tabla 2). Este proceso fue particularmente severo en el extremo sur occidental del departamento de Putumayo y Caquetá y el suroccidente del departamento del Meta, durante el período de estudio (promedio de 14,32 años). En contraste, en las siete imágenes restantes se encontró que había crecido el bosque secundario, más que todo en la Amazonia central y oriental, es decir, se evidencia un proceso de sucesión en la parte central de Caquetá, el noroccidente del Amazonas,

**Tabla 2.** Imágenes LANDSAT del Amazonas colombiano *circa* 1986 y 2000 con estimación neta de nubes, esto es, utilizando la misma cobertura nubosa en ambas fechas.

Imagen número (Path_Row)	Cobertura boscosa <i>circa</i> 1986 neta de nubes en km <sup>2</sup>	Cobertura boscosa <i>circa</i> 2000, neta de nubes en km <sup>2</sup> .	Factor	Cambio porcentual signo negativo significa deforestación y positivo bosque secundario
Columna 1	2	3	4= 3/2	5=(2-4)*100
3_58	2878	2,994	1.0404	4.04
3_59	3907	3,924	1.0043	0.43
4_57	14,251	13,955	0.9790	-2.10
4_58	26,669	26,468	0.9920	-0.80
4_59	8,771	8,698	0.9920	-0.80
4_60	3,171	3,154	0.9950	-0.50
4_61	14,450	14,398	0.9960	-0.40
4_62	10,595	10,500	0.9910	-0.90
4_63	2,559	2,480	0.9690	-3.10
5_57	12,692	12,501	0.9850	-1.50
5_58	26,683	26,526	0.9940	-0.60
5_59	19,908	19,985	1.0039	0.39
5_60	17,318	17,321	1.0002	0.02
5_61	15,862	15,701	0.9900	-1.00
5_62	3,451	3,438	0.9960	-0.40
6_58	18,280	18,103	0.9900	-1.00
6_59	24,295	24,539	1.0100	1.00
6_60	18,788	18,550	0.9870	-1.30
6_61	17,239	17,294	1.0032	0.32
6_62	2,860	2,859	1.0000	0.00
7_58	8,945	7,895	0.8830	-11.70
7_59	22,354	22,317	0.9980	-0.20
7_60	20,338	20,417	1.0040	0.40
7_61	6,861	6,806	0.9920	-0.80
8_58	7,261	6,139	0.8450	-15.50
8_59	13,607	11,079	0.8140	-18.60
8_60	10,420	10,141	0.9730	-2.70
9_59	9,188	6,280	0.6840	-31.60
9_60	2,888	1,699	0.5880	-41.20
<b>Total</b>	<b>366,489</b>	<b>356,161</b>	<b>0,9720</b>	<b>-2,80</b>

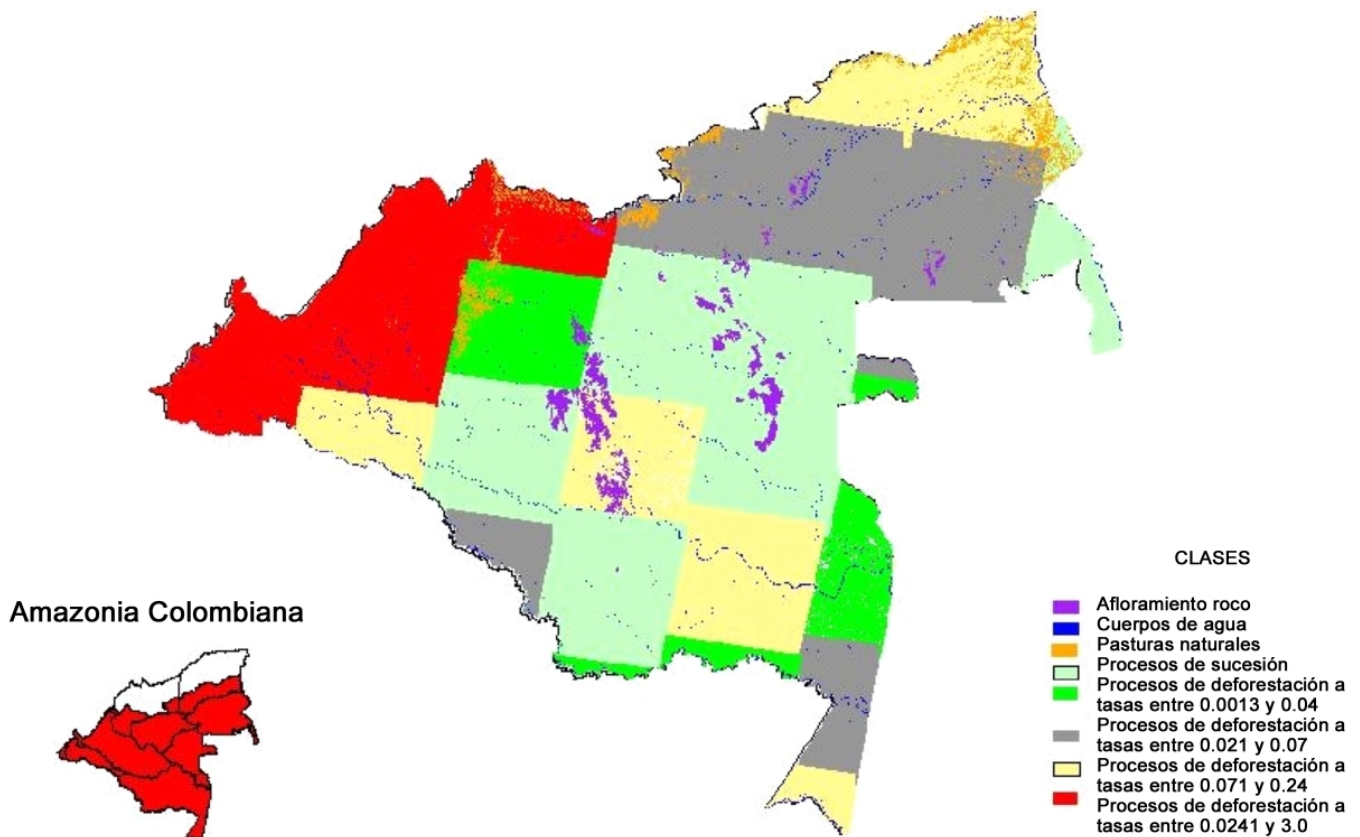
Vaupés y Guainía, alcanzando un máximo de 4.04 en la imagen 3\_58 que corresponde al extremo oriental de la Amazonia colombiana, en el departamento del Guainía (Tabla 1, Fig. 4). El resultado total ponderado para el período de observación entre 1986 y 2000 es de una pérdida de 2,8% del bosque Amazónico colombiano (Tabla 2). Es necesario anotar, sin embargo, que falta contabilizar el área cubierta por nubes para tener claridad sobre la dinámica en términos absolutos.

Como se mencionó con anterioridad, debido a que se trabajó con áreas netas de nubes, a continuación se presentan los resultados expandiendo el efecto observado a aquellas zonas cubiertas por nubes (Tabla 3).

Si se considera el crecimiento de 620 km<sup>2</sup> de bosque secundario, lo que se obtiene de sumar las siete imágenes que arrojaron cifras positivas en la columna 9, Tabla 3, y paralelamente la deforestación de 12,200 km<sup>2</sup>, el resultado neto es que durante este período se perdieron 11,579 km<sup>2</sup>

de bosque. Los resultados sugieren que, en promedio, anualmente se deforestaron 853 km<sup>2</sup>, resultado que se obtiene de dividir la deforestación observada de 12,200 km<sup>2</sup> por los 14.32 años del período de observación. Paralelamente, el bosque secundario creció anualmente en 43.3 km<sup>2</sup>. La tasa anual de deforestación con base en las áreas estimadas de bosque para cada ventana, esto es 388,957 para 1986 y 377,378 km<sup>2</sup> para el 2000 y considerando un lapso de 14.32 años, se obtuvo un "r" o la tasa media anual de deforestación de 0.21% (Tabla 4).

En resumen, la mayor deforestación en la Amazonia colombiana durante el período en cuestión se encontró en el occidente y noroccidente de la Amazonia colombiana, al occidente de los departamentos de Putumayo y Caquetá y el suroccidente del Meta. No obstante, se evidencia un proceso de sucesión un orden de magnitud inferior y más exactamente aproximadamente casi 18 veces inferior, en la parte central de Caquetá, el noroccidente del Amazonas y Vaupés y Guainía oriental (Fig. 4). Menores tasas de



**Figura 4.** Intervalos de tasas anuales de deforestación "r" o sucesión en la Amazonía colombiana 1986-2000, afloramientos rocosos, cuerpos de agua y pasturas naturales para 29 pares de imágenes LANDSAT. Los intervalos de deforestación se tomaron con base en los resultados consignados en la Tabla 4.

**Tabla 3.** Imputación al área con cobertura nubosa asumiendo el mismo cambio observado en la tabla 2, Amazonia colombiana *circa* 1986 y 2000. El signo negativo en la columna 9 indica sucesión.

Número de la imagen "Path_row" Columna	Bosque alrededor del 2000 en km <sup>2</sup> neto de nubes	Área de la imagen utilizada km <sup>2</sup> (De la tabla 1)	Área con nubes alrededor del 2000 en km <sup>2</sup>	Área de nubes que se presume bosque km <sup>2</sup> 2/(3-4)=	Estimado de la cobertura boscosa en el 2000 en km <sup>2</sup> 4*5+2=	Cambio relativo (tabla 2, columna 3)	Estimado de la cobertura boscosa alrededor de 1986 km <sup>2</sup> 6/7=	Cambio entre 1986-2000 en km <sup>2</sup> 8-6=
1	2	3	4	5	6	7	8	9
3_58	2.994	5,524	326	0,58	3.182	1,04	3.058	-304
3_59	3.924	4,191	4	0,94	3.928	1,00	3.911	-21
4_57	13.955	17,792	161	0,79	14.082	0,98	14.385	169
4_58	26.468	31,456	2.150	0,90	28.410	0,99	28.639	-1.741
4_59	8.698	9,975	350	0,90	9.014	0,99	9.087	-243
4_60	3.154	3,375	71	0,95	3.222	1,00	3.238	-51
4_61	14.398	16,518	1.125	0,94	15.450	1,00	15.512	-1.000
4_62	10.500	11,824	600	0,94	11.061	0,99	11.162	-466
4_63	2.480	3,476	283	0,78	2.700	0,97	2.786	-141
5_57	12.501	13,394	0	0,93	12.501	0,99	12.691	191
5_58	26.526	27,677	0	0,96	26.526	0,99	26.686	157
5_59	19.985	26,591	136	0,76	20.088	1,00	20.010	-180
5_60	17.321	24,957	1.361	0,73	18.320	1,00	18.316	-1.002
5_61	15.701	25,601	5.111	0,77	19.617	0,99	19.816	-3.755
5_62	3.438	4,249	76	0,82	3.501	1,00	3.515	-50
6_58	18.103	21,358	191	0,86	18.266	0,99	18.451	14
6_59	24.539	26,945	0	0,91	24.539	1,01	24.296	-244
6_60	18.550	22,765	1.136	0,86	19.524	0,99	19.781	-736
6_61	17.294	25,509	2.867	0,76	19.484	1,00	19.422	-2.245
6_62	2.859	3,55	544	0,95	3.375	1,00	3.375	-515
7_58	7.895	11,498	60	0,69	7.936	0,88	8.988	1.009
7_59	22.317	29,624	1.065	0,78	23.149	1,00	23.196	-795
7_60	20.417	24,975	3.002	0,93	23.206	1,00	23.114	-2.868
7_61	6.806	7,883	731	0,95	7.502	0,99	7.562	-641
8_58	6.139	12,814	1.724	0,55	7.093	0,85	8.394	168
8_59	11.079	30,134	2.540	0,40	12.099	0,81	14.863	1.508
8_60	10.141	13,383	0	0,76	10.141	0,97	10.422	279
9_59	6.280	14,36	2.492	0,52	7.578	0,68	11.079	1.610
9_60	1.699	5,977	582	0,31	1.882	0,59	3.201	1.006
<b>Total</b>	<b>356.161</b>	<b>477.375</b>	<b>28.688</b>		<b>377.378</b>		<b>388.957</b>	<b>11.579,2</b>

deforestación se observaron en el nororiente, en el área comprendida por parte de los departamentos de Vichada en el sur y Guainía en el norte. Procesos de crecimiento del bosque secundario, presumiblemente por abandono de agro-ecosistemas, se encontraron en el extremo oriental y

sur de la Amazonia colombiana, departamentos de Guainía y Amazonas; mientras que la parte occidental del departamento del Guaviare y nororiental del departamento del Amazonas se caracterizan por leve deforestación con tasas de deforestación entre 0.0013 y 0.04 (Fig. 4).

**Tabla 4.** Cálculo de la tasa anual de deforestación “*r*” luego de imputar la dinámica observada a la cobertura de nubes alrededor de 1986 y 2000. “*t*” es el período entre el par de imágenes. El signo negativo en “*r*” denota la recuperación del bosque.

Número de Imagen “path_row”	Cobertura boscosa en km <sup>2</sup> alrededor de		<i>t</i>	<i>r</i>
	1986	2000		
3_58	3.058	3.182	13.56	-0.29
3_59	3.911	3.928	14.51	-0.03
4_57	14.385	14.082	15.26	0.14
4_58	28.639	28.410	15.45	0.05
4_59	9.087	9.014	15.44	0.05
4_60	3.238	3.222	15.01	0.03
4_61	15.512	15.450	14.98	0.03
4_62	11.162	11.061	13.09	0.07
4_63	2.786	2.700	13.13	0.24
5_57	12.691	12.501	14.35	0.11
5_58	26.686	26.526	14.35	0.04
5_59	20.010	20.088	13.25	-0.03
5_60	18.316	18.320	14.13	0.00
5_61	19.816	19.617	13.82	0.07
5_62	3.515	3.501	12.95	0.03
6_58	18.451	18.266	15.45	0.07
6_59	24.296	24.539	12.26	-0.08
6_60	19.781	19.524	15.45	0.08
6_61	19.422	19.484	12.99	-0.02
6_62	3.375	3.375	15.45	0.00
7_58	8.988	7.936	15.42	0.80
7_59	23.196	23.149	15.81	0.01
7_60	23.114	23.206	14.88	-0.03
7_61	7.562	7.502	14.90	0.05
8_58	8.394	7.093	13.86	1.21
8_59	14.863	12.099	12.86	1.59
8_60	10.422	10.141	12.86	0.21
9_59	11.079	7.578	14.85	2.53
9_60	3.201	1.882	15.06	3.47
<b>Total</b>	<b>388.957</b>	<b>377.378</b>	<b>14.32</b>	<b>0.21</b>

### Discusión, conclusiones y recomendaciones

Hay procedimientos más avanzados que el aquí propuesto, para abordar el problema de la remoción de nubes en imágenes ópticas; tal es el caso del árbol de regresión propuesto por **Helmer y Rufenacht** (2005). Empero, la bondad del método aquí propuesto es su sencillez. Es relevante subrayar que los resultados arriba citados contradicen los obtenidos por **Sánchez et al.** (2001) quienes concluyeron que el crecimiento de bosque secundario era superior a la deforestación. Cabe mencionar que tan solo hay una dife-

rencia de cuatro años entre los dos estudios. Esto es, el estudio de estos autores es correspondiente al periodo 1986-1996 mientras que el presente termina en el año 2000.

Si bien la presente investigación documenta un proceso de crecimiento del bosque secundario, este es muy reducido en comparación con la deforestación. No se pueden adelantar otras comparaciones con los resultados aquí registrados, ya que los demás estudios publicados recientemente sobre la cuenca, como se mencionó anteriormente, son muy puntuales, (por ejemplo: **Riaño & Gutiérrez**, 2007; **Armenteras et al.**, 2006; **Etter et al.**, 2006a; **Quiñones**, 2002). La alta tasa de deforestación encontrada en el Putumayo en el presente estudio es preocupante, toda vez que se perdió más del 40% de la cobertura boscosa en un periodo de tan solo 15 años. Esto quiere decir que de continuar la tendencia observada, la cobertura boscosa del departamento del Putumayo podría desaparecer completamente para el año 2021.

En el presente trabajo se utilizaron dos ventanas con base en imágenes LANDSAT, correspondientes a aproximadamente el 2000 y a mediados de la década de los 80s, pudiéndose establecer el área de bosque “maduro” y áreas de bosque secundario entre 10-15 años. Esta aproximación parece ser mejor que aquella derivada de clasificar dos o tres clases de edad en el bosque, con base en un solo mosaico de imágenes LANDSAT. Un problema que surge al trabajar entre dos fechas tan distantes (mediados de los 80 a 2001), es que durante estos 14 o 15 años un bosque pudo ser talado, abandonado y encontrarse otra vez en estado de sucesión sin que se pueda discernir este hecho con la técnica de la teledetección multispectral. Por consiguiente, se estima que las tasas de crecimiento de bosque secundario aquí propuestas son bastante precisas, mientras que las de deforestación deben ser superiores, en concordancia con lo propuesto por **Steininger** (2000). Por la anterior razón, se debe procurar adelantar estudios con menores intervalos entre ventanas, así como extender el período de estudio. Es muy conveniente entonces completar otra, o preferiblemente dos ventanas de imágenes LANDSAT de la década de los años 70. En este orden de ideas, se deberían adelantar estudios periódicos, inicialmente por décadas, luego lustros y ojalá anuales sobre este particular. Las regiones que mayor atención merecen son los frentes de colonización al occidente, en particular el Putumayo y Caquetá que exhiben las más altas tasas de deforestación.

En el bosque húmedo tropical, la cobertura de nubes constituye un problema mayor en la teledetección óptica. La metodología aquí utilizada es una opción sencilla para

abordar el problema de las regiones que permanecen ocultas, bajo el supuesto que estas tuvieron idéntico comportamiento a las que se pudieron apreciar. Este supuesto no deja de ser cuestionable en zonas con abundante cobertura de nubes, como lo es la vertiente oriental de la cordillera oriental. Cabe subrayar la posibilidad de trabajar con secciones pequeñas de imágenes para el piedemonte, en lugar de calcular una sola tasa para la zona del piedemonte y la zona plana como se efectuó en la presente pesquisa. Otra opción es utilizar la tecnología de radar. Sobre este particular **Asner** (2000) sugiere que los mejores resultados se obtienen con resolución inferior a 50 metros.

Es importante destacar que se requiere mucho trabajo de campo para lograr el ajuste y corrección de la clasificación digital, así como para la evaluación de la misma. No obstante, en grandes áreas como es el caso de la Amazonia colombiana, la verificación de campo es muy costosa, por lo que se hace necesario trabajar adicionalmente con estudios de vegetación ya adelantados, como los realizados por el Instituto SINCHI. Esta fue la metodología adelantada por **Boyd et al.** (1999) en Camerún y **Foody y Curran** (1994) en Ghana. Es evidente que una empresa así sólo es posible con el concurso de otros institutos del SINA, el IGAC, INGEOMINAS, el Proyecto SIMCI 2 del Ministerio del Interior y de Justicia y las corporaciones autónomas con jurisdicción en la cuenca amazónica como la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y el Oriente Amazónico (CDA) y la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia (CorpoAmazonia).

Uno de los primeros pasos que debe darse en un futuro próximo es precisar los límites de la Amazonia colombiana, ya que a la fecha no hay claridad sobre el asunto. Es recomendable llegar en una forma concertada entre los institutos del Sistema Nacional Ambiental (SINA) como el IDEAM, SINCHI y el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), así como con las Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico, y CorpoAmazonia y por último el Instituto Geográfico Agustín Codazzi sobre lo que constituye bio-geográficamente la Amazonia. Existen en la actualidad amplios rangos sobre lo que para cada institución es la Amazonia colombiana.

### Agradecimientos

Este estudio fue posible gracias al apoyo financiero de la Universidad de La Salle (contrato PINV-012-05) y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM (contrato 168-04). El apoyo técnico de Omar Jaramillo y Juan Carlos Alarcón fue invaluable. Agradece-

mos el apoyo logístico brindado por José Alfredo Ruiz, Patricia, Betty y Julio de la Oficina de Informática y Telecomunicaciones del IDEAM. Agradecemos el soporte recibido de Alexander Cotte, así como la confianza depositada en nosotros por la Dra. María de Jesús Restrepo, antigua Directora del Departamento de Investigaciones de la Universidad de La Salle y por el Dr. Gonzalo Arango, antiguo Subdirector de Ecosistemas e Información Ambiental del IDEAM que hicieron este estudio posible. Las correcciones, críticas y comentarios de los jurados anónimos nombrados por la revista de la ACCEFYN fueron muy valiosos. Finalmente reconocemos la ayuda recibida de Uriel Murcia del Instituto SINCHI. Esta es una publicación oficial del grupo Caldas reconocido por COLCIENCIAS bajo el número COL0021613 y avalado por la UPTC.

### Literatura citada

- Alves, D. S.** 2002. Deforestation in the Brazilian Amazon. Pp. 95-106. En: *Deforestation and Land use in the Amazon*. Wood, C. H. y R. Porro (Eds.). Boca Ratón: University of Florida Press.
- \_\_\_\_\_, **Pereira, J. L. G., De Sousa, C. L., Soares, J. V. y F. Yamaguchi.** 1999. Characterizing landscape changes in central Rondonia using Landsat TM imagery. *International Journal of Remote Sensing* **20**:2877-2882
- Arbeláez, M. V. y A. Parrado-Rosselli.** 2005. Seed Dispersal modes of the Sandstone Plateau Vegetation of the Middle Caquetá River, Colombian Amazonia. *Biotrópica* **37**:64-72.
- Armenteras, D., G. Rudas, N. Rodríguez, S. Sua, y M. Romero.** 2006. Patterns and causes of deforestation in the Colombian Amazon. *Ecological Indicators* **6**:353-368.
- Asner, G. P.** 2000. Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing* **22**:3855-3862.
- Boyd, D. S.; Foody G. M. & P. J. Curran.** 1999. The relationship between biomass of Cameroonian tropical forests and radiation reflected in middle infrared wavelength (3.0-5.0 mm). *International Journal of Remote Sensing* **20**:1017-1023.
- Brown, S. y A. Lugo.** 1990. Tropical secondary forests. *Journal of Tropical Ecology*, **6**:1-32.
- Coomes, O. T., F. Grimard y G. J. Burt.** 2000. Tropical forests and shifting cultivation: secondary forest fallow dynamics among traditional farmers of the Peruvian Amazon. *Ecological Economics* **32**:109-124.
- Dirzo, R. y M. C. García.** 1990. Rates of deforestation in Los Tuxtlas, a Neotropical area in southeast Mexico. *Conservation Biology* **6**:84-90.
- Domínguez, C. y A. Gómez.** 1990. *La economía extractiva en la Amazonia colombiana 1850-1930*. Bogotá: Tropenbos-Araraucara.
- Duivenvoorden, J. F. y J. M. Lips.** 1995. *A land-ecological study of soils, vegetation and plant diversity in Colombian Amazonia*. Tropenbos Series 12, Wageningen: The Tropenbos Foundation. 438 Pp.

- Etter, A.** 1991. Diversidad Ecosistémica en Colombia Hoy. p. 43-61. En: *Memorias del I Seminario Internacional sobre Biodiversidad*. Bogotá: CEREC – Fundación Alejandro Ángel Escobar, Bogotá.
- \_\_\_\_\_, **C. McAlpine, S. Phinn, D. Pullar y H. Possingham.** 2006a. Unplanned land clearing of Colombian rainforests: Spreading like disease? *Landscape and Urban Planning* **77**:240-254.
- \_\_\_\_\_, **C. McAlpine, K. Wilson, S. Phinn, D. y H. Possingham.** 2006b. Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **114**:369-386.
- FAO.** 1994. *Forest Resources Assessment 1990*. No. 124. *Global Synthesis*. Roma: FAO.
- \_\_\_\_\_. 2004. <www.fao.org> Se tuvo acceso enero 5, 2005.
- Fearnside, P. M. y R. I. Barbosa.** 2004. Accelerating deforestation in Brazilian Amazonia: towards answering open questions. *Environmental Conservation* **31**:7-10.
- \_\_\_\_\_ y **W. F. Laurance.** 2003. Comment on “Determination of Deforestation Rates of the World’s Humid Tropical Forests”. *Science* **299**: 1015.
- Foody, G. M. y P. J. Curran.** 1994. Estimation of tropical forest extent and regenerative stage using remotely sensed data. *Journal of Biogeography* **21**:223-244
- \_\_\_\_\_, **G. Palubinskas, R. M. Lucas, P. J. Curran y M. Honzak.** 1996. Identifying terrestrial carbon sinks: Classification of successional stages in regenerating tropical forests from Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment* **55**:205-216.
- García, E.** 1999. *Colonización y medio ambiente*. Informe Técnico No. 12, Tibaitatá: CORPOICA y Plan Nacional de Desarrollo Alternativo.
- Global Land Cover Facility.** 2008. <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>
- González, F.** 1998. *Inventario preliminar de Gases Efecto Invernadero Fuentes y Sumideros: Colombia 1990*. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Grau, R. T. M. Aide, J. K. Zimmerman y J. R. Thomlison.** 2004. Trends and scenarios of the carbon budget in post-agricultural Puerto Rico (1936-2060). *Global Change Biology* **10**:1163-1179.
- Helmer, E. H. y B. Ruefenacht.** 2005. Cloud-free satellite image mosaics with regression trees and histogram matching. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **71**:1079-1089.
- IAVH.** 2005. *Ecología en la Orinoquía colombiana*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- IDEAM.** 2001. *Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Bogotá: IDEAM.
- \_\_\_\_\_. 2002. *Primera Generación de Indicadores de la Línea Base de la Información Ambiental de Colombia. Tasa media anual de deforestación*. Bogotá, D. C.: IDEAM, IAvH, SINCHI, IIAP, INVEMAR. Tomo 2. Pp. 764-769.
- INPE.** 2005. Relatorio ano 2000-2001: monitoreo da floresta Amazônica Brasileira por satélite. [www.inpe.br/informacoes-Eventos/](http://www.inpe.br/informacoes-Eventos/)
- Lambin, E. F. y H. J. Geist.** 2003. Regional differences in tropical deforestation. *Environment* **45**:22-36.
- Laurance, W. F., A. K. M. Albernaz, P. M. Fearnside, H. L. Vasconcelos, y L. V. Ferreira.** 2004. Deforestation in Amazonia. *Science* **304**: 1109-1111.
- Martínez, L. J., D. E. Vanegas, W. van Wingaarden, M. Quiñones, Buker, W. y D. H. Hoekman.** 1997. *Sistema de información geográfica para la Amazonia: el caso Guavirare*. Estudios en la Amazonia colombiana XIII. Bogotá: Tropenbos Colombia. 460 Pp.
- Mausel, P., Y. Wu y Y. Li.** 1993. Spectral identification of successional stages following deforestation in the Amazon. *Geocarto International* **8**:61-71.
- Mejía, M.** 1990. La Amazonia colombiana, introducción a su historia natural. *Colombia Amazónica*. 56-76.
- Moran, E. F.; Brondizio, E.; y P. Mausel.** 1994. Integrating Amazonian vegetation, land-use and satellite data. *Bioscience* **44**:1-18.
- \_\_\_\_\_, **Brondizio, E. S., Tucker, J. M., da Silva-Forsberg, M. C., McCracken, S. e I. Falesi.** 2000. Effects of soil fertility on forest succession in Amazonia. *Forest Ecology and Management* **139**:93-108.
- NASA.** 2011. [http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect1/Sect1\\_17.html](http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect1/Sect1_17.html)
- Nelson R. F.; Kimes D. S.; Salas W. A.; y M. Routhier.** 2000. Secondary forest age and tropical biomass estimation using Thematic Mapper imagery. *Bioscience* **50**:419-431.
- Palacio, G.** 2004. *Civilizando la tierra caliente. La supervivencia de los bosques amazónicos 1850-1930*. Bogotá: Asociación Colombiana de Universidades. Pp. 131.
- Quiñones, M.** 2002. *Polarimetric data for tropical forest monitoring*. Tropenbos Series 21. Wageningen: The Tropenbos Foundation. 184 Pp.
- Riaño, E. y F. Gutiérrez.** 2007. Aplicación de la metodología Prodes Digital y detalle de su leyenda en la conurbación Leticia y Tabatinga. *Perspectiva Geográfica* **13**:213-225.
- Ruiz, J., W. Cárdenas y C. Baquero.** 2007. Cambio de la cobertura boscosa como sucedáneo de la dinámica colonizadora en el Departamento del Caquetá, 1986-2000. *Revista de Investigación* **7**:97-104
- \_\_\_\_\_. 2002. *Secondary dry tropical forest succession through a 1944-2000 chronosequence in Providencia Island, Colombia*. Storrs, CT, USA: University of Connecticut, tesis doctoral.
- Sader, S. A. Waide R. B. Lawrence W. T. y A. T. Joyce.** 1989. Tropical forest biomass and successional age class relationships to a vegetation index derived from Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment* **28**:143-156.

- Sánchez-Azofeifa, A., Castro, K. L. y M. R. Kalascka.** 2003. Remote sensing research priorities in tropical dry forest environments. *Biotrópica* **35**:134-142.
- Sánchez, J., D. Yanine, G. Mantilla, M. Toro y C. Barbosa.** 2001. Usos del territorio en Colombia. Pp. 278-299. En: Leyva, P. (Ed.) *El medio ambiente en Colombia*. Bogotá, D. C.: IDEAM.
- Souza, C. M. y D. Roberts.** 2005. Mapping forest degradation in the Amazon with Ikonos images. *International Journal of Remote Sensing* **26**:425-429.
- Sinchi.** 2011. <http://sinchi.org.co>
- Steininger, M. K.** 2000. Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: data from Brazil and Bolivia. *International Journal of Remote Sensing* **21**:1139-1157.
- Turner, W, Spector, S., Gardiner, N., Flaleland, M., Sterling, E. y M. Steininger.** 2003. Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology and Evolution* **18**:306-314.
- UNFCCC.** 2003. Methodological issues land use, land-use change and forestry: definitions and modalities for including afforestation and reforestation activities under article 12 of the Kyoto protocol FCCC/SBSTA/2003/L.13. Bonn: UNFCCC.
- Van der Hammen, T. y G. Andrade.** 2003. *Estructura ecológica principal de Colombia. Primera aproximación*. Bogotá: IDEAM.
- Vanegas, D. E.** 1993. Dinámica de la ocupación de la Amazonia colombiana. *Colombia Amazónica* **6**:149-174.
- Wood, C. H.** 2002. Land use and deforestation in the Amazon. Pp. 1-38. Wood, C. H. y R. Porro (Eds.). En: *Deforestation and Land use in the Amazon*. Boca Raton: University of Florida Press.

Recibido: febrero 13 de 2010.

Aceptado para su publicación: diciembre 2 de 2011.



