

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXVIII

SEPTIEMBRE DE 2004

NÚMERO 108

DIRECTOR DE LA REVISTA: SANTIAGO DÍAZ-PIEDRAHITA



CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
Botánica (Botany)		Química (Chemistry)	
- Sinopsis preliminar de los géneros <i>Herpyza</i> C. Wright y <i>Dioclea</i> K. Kunth (Leguminosae Papilionoideae) en Cuba. [Preliminary synopsis of the genera <i>Herpyza</i> C. Wright and <i>Dioclea</i> K. Kunth (Leguminosae Papilionoideae) of Cuba]. <i>Ángela Beyra Matos, Grisel Reyes Artilés & Lasura Hernández Valdés</i>	313	- El Método Monte Carlo como herramienta para evaluar porosidad en carbones activados. [The Monte Carlo method as a tool in the evaluation of porosity in activated carbons]. <i>Juan F. Orrego, Jhon J. Fernández & Fanor Mondragón</i>	371
- Una nueva especie de <i>Espeletiopsis</i> (Asteraceae, Heliantheae) de Colombia. [A new species of <i>Espeletiopsis</i> (Asteraceae, Espeletiinae) from Colombia]. <i>Santiago Díaz-Piedrahita & Sandra Obando</i>	323	Zoología (Zoology)	
Ciencias de la Tierra (Earth Sciences)		- Estudio de la vocalización de trece especies de anuros del municipio de Ibagué, Colombia. [Study of the vocalization of thirteen anurans from the region of Ibagué]. <i>Manuel Hernando Bernal, Diana Patricia Montealegre & Carlos Andrés Páez</i>	385
- Características de la turbulencia y de la estabilidad atmosférica en Bogotá. [Characteristics of the turbulence and atmospheric stability at Bogotá]. <i>Gerardo de J. Montoya, William Cepeda P. & Jesús A. Eslava R.</i>	327	- Aspectos reproductivos y desarrollo larval de <i>Hyla pugnax</i> (Anura: Hylidae) en el piedemonte andino de Venezuela. [Reproductive aspects and larval development of <i>Hyla pugnax</i> (Anura: Hylidae) in the Andean piedmont of Venezuela]. <i>Andrés Chacón-Ortiz, Amelia Díaz de Pascual & Francisco Godoy</i>	391
Ecología (Ecology)		- A new Colombian frog of the genus <i>Eleutherodactylus</i> from the Northern Cordillera Occidental. [Una nueva especie colombiana del género <i>Eleutherodactylus</i> del norte de la Cordillera Occidental]. <i>John D. Lynch & Cristina Ardila-Robayo</i>	403
- Esquemas de distribución espacial en la comunidad bentónica de arrecifes coralinos continentales y oceánicos del Caribe Colombiano. [Spatial distribution patterns of the benthonic community in coastal continental and oceanic coral reefs of the Colombian Caribbean]. <i>Guillermo Díaz-Pulido, Juan A. Sánchez, Sven Zea, Juan M. Díaz & Jaime Garzón-Ferreira</i>	337	- Las serpientes del género <i>Atractus</i> Wagler, 1828 (Colubridae; Xenodontinae) en la Amazonia colombiana. [The snakes of the genus <i>Atractus</i> Wagler, 1828 (Colubridae; Xenodontinae) in the Colombian Amazonia]. <i>Juan J. Silva Haad</i>	409
Físicoquímica (Physical-Chemistry)		Vida Académica (Academic Life)	447
- Calotropía, autoorganización y evolución. [Calortropy, self organization and evolution] <i>Daniel Barraquán & Alfredo Gómez</i>	349	Constitución de la Academia [Members of the Academy]	455
Historia de la Ciencia (History of Science)		Publicaciones de la Academia [Publications of the Academy]	457
- El Principio de Maupertuis. Un ensayo para una Academia. [Maupertuis' principle, an essay for an Academy]. <i>William A. Ponce</i>	363		

SINOPSIS PRELIMINAR DE LOS GÉNEROS *HERPYZA* C. WRIGHT Y *DIOCLEA* K. KUNTH (LEGUMINOSAE-PAPILIONOIDEAE) EN CUBA

por

Ángela Beyra Matos*, Grisel Reyes Artiles* & Laura Hernández Valdés*

Resumen

Beyra, A., G. Reyes, & L. Hernández: Sinopsis preliminar de los géneros *Herpyza* C. Wright y *Dioclea* K. Kunth (Leguminosae-Papilionoideae) en Cuba. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **28** (108): 313-322, 2004. ISSN: 0370-3908.

Se presenta una sinopsis preliminar de los géneros *Herpyza* C. Wright y *Dioclea* K. Kunth para Cuba. Se incluyen claves dicotómicas, descripciones taxonómicas, ilustraciones y datos químicos, cromosómicos, palinológicos, etnobotánicos, así como de distribución y ecología de los 4 taxones que se registran en el país dentro de dichos géneros. Aunque los resultados definen los caracteres de cada género se requiere de un posterior análisis molecular y biogeográfico de *Herpyza* junto con otros taxones de Phaseoleae para poder dilucidar las relaciones filogenéticas de dicho género con otros de Leguminosae.

Palabras clave: Cuba, *Dioclea*, *Herpyza*, Leguminosae, Papilionoideae, taxonomía.

Abstract

A preliminary synopsis of the genera *Herpyza* C. Wright and *Dioclea* K. Kunth in Cuba is presented, including dichotomic keys to the Cuban taxa, taxonomic descriptions, illustrations and notes on chemical composition, chromosome number, palinology, ethnobotany, as well as distribution and Ecology of four taxa have so far been found in the country. Although the results define the characters of each genus, a molecular biogeographic analysis of *Herpyza* along with other taxa of Phaseoleae is needed to elucidate the phylogenetic relationship of this genus with others genera of Legume.

Key words: Cuba, *Dioclea*, *Herpyza*, Leguminosae, Papilionoideae, taxonomy.

* Centro de investigaciones de Medio Ambiente de Camagüey (CIMAC). Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Cisneros 105 entre Pobre y Angel, Camagüey, C.P. 70 100, CUBA. Teléfono: (053) (032) 296349. Fax: (053) (032) 298268. Correo electrónico: abeyraes@yahoo.com.mx

Introducción

La subtribu Diocleinae de la tribu Phaseoleae (Leguminosae-Papilionoideae), incluye en el mundo 11 géneros y 210 especies en su mayoría del Nuevo Mundo (Lewis & Polhill, 1998; Chappil, 2001). Algunos de los géneros distribuidos mayormente en el Nuevo Mundo se extienden a los Paleotrópicos por su amplia dispersión, por el cultivo o evolución y solamente dos géneros de los once que conforman la subtribu, son del Viejo Mundo.

En Cuba esta subtribu consta de 4 géneros y 35 especies, las cuales incluyen arbustos, o enredaderas lignificadas, trepadoras o con tallos rastreros que enraizan en los nudos.

La presente contribución constituye una sinopsis preliminar de los géneros *Dioclea* y *Herpyza* en el Archipiélago cubano (los cuales se clasifican actualmente dentro de la subtribu Diocleinae), y está basada principalmente en el estudio de las recolecciones depositadas en los herbarios cubanos y en la información bibliográfica disponible.

Materiales y métodos

Las técnicas utilizadas corresponden a las empleadas clásicamente en taxonomía vegetal y se adoptaron algunos términos según la versión castellana del Código Internacional de Nomenclatura Botánica (Saint Louis, 2000).

Se consultaron las recolecciones de los herbarios cubanos, tales como Herbario Nacional de la Academia de Ciencias de Cuba (HAC); Herbario del Jardín Botánico Nacional de la Universidad de la Habana (HAJB); y el Herbario del Centro de Investigaciones de Medio Ambiente de Camagüey (HACC), abreviados de acuerdo con (Holmgren *et al.*, 1990).

Los datos de las localidades, ecótopos y altitudes fueron considerados para este estudio. Además se hicieron salidas de campo con la finalidad de recolectar muestras con flores y frutos, así como actualizar datos de ecología y distribución.

Se actualizó la nomenclatura según la literatura taxonómica disponible, revisada para este género (Maxwell, 1980; Lackey, 1981; Wiersema *et al.*, 1990; Burkill, 1995; Lewis & Polhill, 1998; Hu *et al.*, 2000; Kajita *et al.* 2001; Chappil, 2001).

Se llevó a cabo la producción electrónica del mapa de distribución geográfica de *Herpyza* en el territorio

cubano, el cual se confeccionó a partir de la base de datos de especímenes, obtenida de las localidades inventariadas por especie de las diferentes fuentes documentales (colecciones de herbario, literatura especializada, monografías, etc), las cuales fueron georeferenciadas en un mapa utilizando la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (GIS). El género *Dioclea* no se mapificó por la ausencia de materiales en los herbarios cubanos y por su actual grado de amenaza de extinción.

La nomenclatura sobre formaciones vegetales y tipos de suelos consideradas en este estudio es la publicada en el Nuevo Atlas Nacional de Cuba (Instituto de Geografía ACC e Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía, 1989), en los Mapas de Vegetación Actual y Suelo respectivamente, a escala 1:1 000 000.

Se realizó además una evaluación de todos los taxones de *Herpyza* y *Dioclea* presentes en la flora cubana, con base en los criterios B y D de la UICN (1994) que sustentaron la proposición de categorías de amenaza de extinción.

Tratamiento taxonómico

Subtribu Diocleinae.

Diocleinae Benth. Ann. Wiener Mus. Naturgesch. 2: 113. Jun 1837 (Diocleae).

Subtribe Galactiinae Benth. & Hook. f., Gen. Pl. 1:452. 19 Oct. 1865 (Galactieae).

Plantas lignificadas con hojas trifolioladas, a veces unifolioladas y raramente 5-7-folioladas. Folíolos eglanduloso-punteados, raramente con pelos uncinados. Inflorescencias a menudo prominentemente nudosas, ocasionalmente paniculadas, o axilares y paucifloras, bracteoladas, las flores a menudo grandes y con disco prominente alrededor del ovario, estandarte no apendiculado; estambres diadelfos o pseudomonadelfos en disposición 9+1, el vexilar libre o parcialmente unido a los demás, anteras uniformes o dimorfas 5+5, raramente 6+4, 9+1 ó 8+2; estilo no barbado, no enrollado; estigma generalmente terminal y capitado, raramente subterminal; semillas con canavanina generalmente presente, variables en tamaño y textura, con arilo generalmente inconspicuo, hilo diminuto, corto o frecuentemente largo, o a veces abarcando casi totalmente la circunferencia de la semilla; Polen con gránulos grandes, ampliamente espaciados e irregulares (Ferguson & Skvarla, 1983).

1. *Herpyza* C. Wright in Sauvalle Fl. Cubana, Anal. Acad. Cienc. Med., Fis. y Nat. Habana 5:335. 1869.

SPECIES TYPICA: *H. grandiflora* (Griseb.) Ch. Wright.

Hierba rastrera que enraiza en los nudos; tallo delgado, piloso, ascendente; hojas digitadamente trifolioladas, largamente pecioladas; estípulas libres, no adnatas al pecíolo, ovadas, agudas multiestriadas; estípelas lineares en la base de los peciólulos; folíolos rombo-ovales, obovados o suborbiculares, obtusos o redondeados en el ápice, cuneados en la base, enteros, no glandulares, penninervios, subestrigosos en el envés.

Flores grandes azules, violáceas en seco, dispuestas en racimos no nudosos, axilares paucifloros con 1-3 flores; pedúnculos largos delgados; brácteas ovadas, persistentes, estriadas, subuladas; bractéolas situadas en la base del cáliz, persistentes, ovado-oblongas, estriadas; cáliz tubuloso-campanulado, estrigoso, con 5 lóbulos subiguales tan largos como el tubo o poco más, subulado-lanceolados, ciliados, lóbulos superiores del cáliz separados; estandarte obovado, a obovado-oblongo, auriculado encima de la uña corta; alas oblongo-espátuladas de igual longitud que el estandarte; pétalos de la quilla más cortos que las alas, obtusos, lanceolado-espátulados, connados excepto en el ápice y la uña, siendo esta última delgada. Estambres 10, los restantes filamentos connados en la mitad; anteras todas fértiles, versátiles redondeadas a subcuadradas; ovario oblongo-linear erecto, hirsuto, sésil, pauciovulado con 2-4 óvulos; estilo filiforme, recto, delgado, glabro excepto en la base, estigma terminal, capitado. Fruto en legumbre, sésil, oblongo-linear, con 2-3 semillas ovadas si son monospermas, rectos, oblicuamente mucronados, comprimidos, septados por dentro, rostrados; estrigosos; semillas subcuadradas de 1-4 por legumbre, reniformes a estrofioladas, con hilo orbicular.

NÚMERO CROMOSOMÁTICO. Desconocido.

PALINOLOGÍA. Polen triporado, con una marcada ornamentación de la exina, gruesamente tuberculada, con una estructura granular compleja que consiste en grupos de paquetes densos de columelas y gránulos (Ferguson & Skvarla, 1983).

DISTRIBUCIÓN Y TAMAÑO. Endémica de Cuba. Comprende una sola especie.

HÁBITAT. Crece cerca de las lagunas de arenas blancas (arenas silíceas) y terrenos bajos de Cuba occidental, donde forma alfombra, hasta 50 m de altitud.

COMPOSICIÓN QUÍMICA. Se ha registrado la presencia del aminoácido libre no proteico Canavanina en la semilla, que con seguridad constituye una defensa química contra los herbívoros (Lackey, 1981).

1.1 *Herpyza grandiflora* (Griseb.) C. Wright in Sauvalle Flora Cubana Anal. Acad. Cienc. Med., Fis. y Nat. Habana 5:335. 1869. et in Sauvalle Fl. Cub. 29. 1873; Urban Symb. Antill. 5:369. 1908. c. icon. Prov. Pinar del Río et Insula Pinos; Urban Symb. Antill. 9:452. 1928.

TYPUS: Cuba Occidental "Hab. in Cuba in pinetis et savannis Vuelta Abajo ad Pinar del Río versus, prope Heradura Wright n. 2325 m Oct. flor" (holotipo: HAC)!

Terannus grandiflorus Grisebach Cat. Pl. Cub. 75. 1866.

Rhynchosia grandiflora C. Wright Cat. Pl. Cub. 75. 1866.

Hierba rastrera (Fig. 1), con pubescencia extendida de pelos pardo-oscuros en ramas, pecíolos, peciólulos, pedúnculos, pedicelos, cáliz, estípulas, estípelas, brácteas y bractéolas. Tallo delgado, ascendente, poco ramificado. Hojas digitadamente trifolioladas, estipuladas, con estípulas linear-lanceoladas de hasta 3 mm de longitud. Folíolos rombo-ovales o suborbiculares, de 1.5-3.0 (4,5) X (0.8)1.2-2.2 cm, el folíolo terminal elíptico-oblongo hasta oblongo-linear, obovado o suborbicular, subestrigosos en la superficie abaxial y en los peciólulos, estos últimos de 1mm para los folíolos laterales y de 3mm para el folíolo terminal; generalmente los folíolos con pubescencia pardo-oscuro de pelos aplicados densos en la superficie abaxial y laxos en la adaxial, estipelados, con estípelas de 2-3 X 2 mm, ovadas, agudas, pecíolos de 6-28 mm, subiguales, brevemente denso-estrigoso, venas primarias pinnadas, prominentes en el envés.

Pedúnculos exertos, subtrifloros, los fructíferos de 2-4 cm. Brácteas linear-lanceoladas de 2mm. Flores solitarias o en pares, azules de 18-20 mm, en racimos paucifloros, largamente pedunculados, pedicelos fructíferos de 2 mm. Cáliz de 8 mm, estrigoso, hendido en 5 lóbulos subiguales, linear acuminados, más largos que el tubo, lóbulos de 3-5 mm lanceolado-subulados, tubo de 3-5 mm. Corola papilionada. Estandarte obovado-oblongo, auriculado arriba de la uña y atenuado hacia la uña, ápice emarginado; las alas oblicuas, espátuladas, de igual longitud; los pétalos de la quilla obtusos, lanceolado-espátulados, coherentes en el dorso con uña delgada, más corta que las alas. Estambres 8, el vexilar libre, anteras oblongas. Estilo excediendo en longitud a los estambres, filiforme, recto, ovario sésil pauciovulado, estigma terminal capitado. Legumbre sésil.

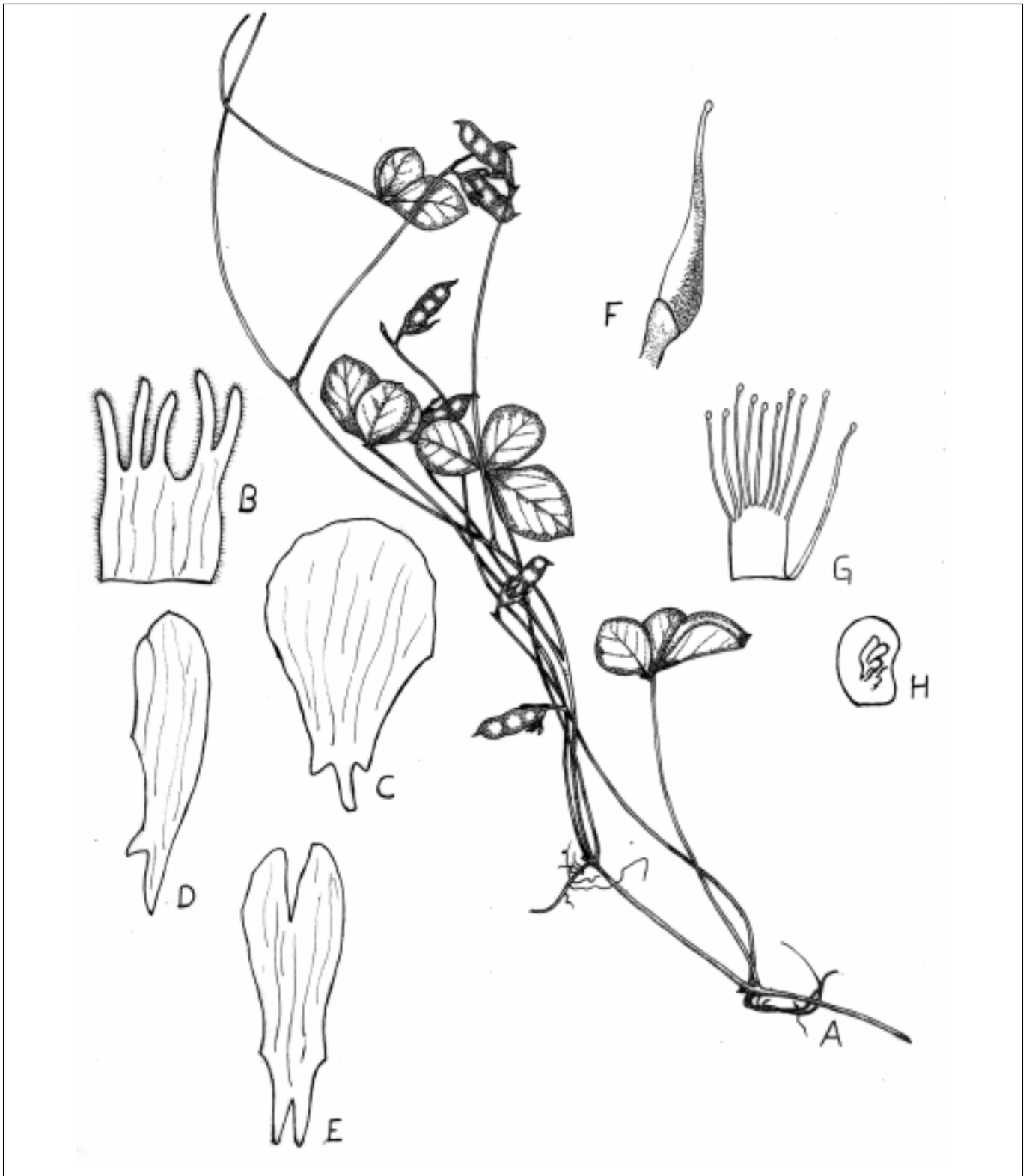


Figura 1. *Herpyza grandiflora* (Griseb) C. Wright. 2325 (HAC).- A, Rama con hojas y frutos (X 1); B, Cáliz (X 6); C, Estandarte (X 3 1/2); D, Pétalo de las alas (X 3 1/2); E, pétalos de la quilla (X 3 1/2); F, Pistilo (X 3); G, Tubo estaminal (X 2 1/2); H, Semilla (X 10).

Recta, linear, oblonga, oblicuamente mucronada, comprimida, algo contraída, rufo-estrigosa con 2-4 –semillas, las legumbres de 8-18 X 3- 6 mm; semillas subredondeadas, comprimidas, hilo pequeño, redondeado.

FENOLOGÍA. Se han observado especímenes florecidos y fructificados en los meses de octubre y noviembre.

DISTRIBUCIÓN. Endémica de Cuba, en la Provincia de Pinar del Río, y en el Municipio Especial Isla de la Juventud (mapa 1).

HÁBITAT. Cerca de las lagunas y terrenos bajos, donde forma alfombra, así como en sabanas de arenas blancas, Pinares de arenas blancas, en vegetación de arenas blancas y lagunas de arenas blancas, en suelos arenoso-cuarcíticos.

ETNOBOTÁNICA. Según **Roig** (1974), no se ha encontrado justificación al nombre vulgar atribuido a esta planta, la que se encontraba abundantemente según el citado autor, en los alrededores de Pinar del Río, cerca de las lagunas y terrenos bajos, donde formaba alfombra. El uso que se refiere en las etiquetas de los herbarios cubanos sobre esta planta es el ornamental.

NOMBRE VERNÁCULO: Papo de Yegua

ESTADO DE CONSERVACIÓN: En Peligro crítico (CR).

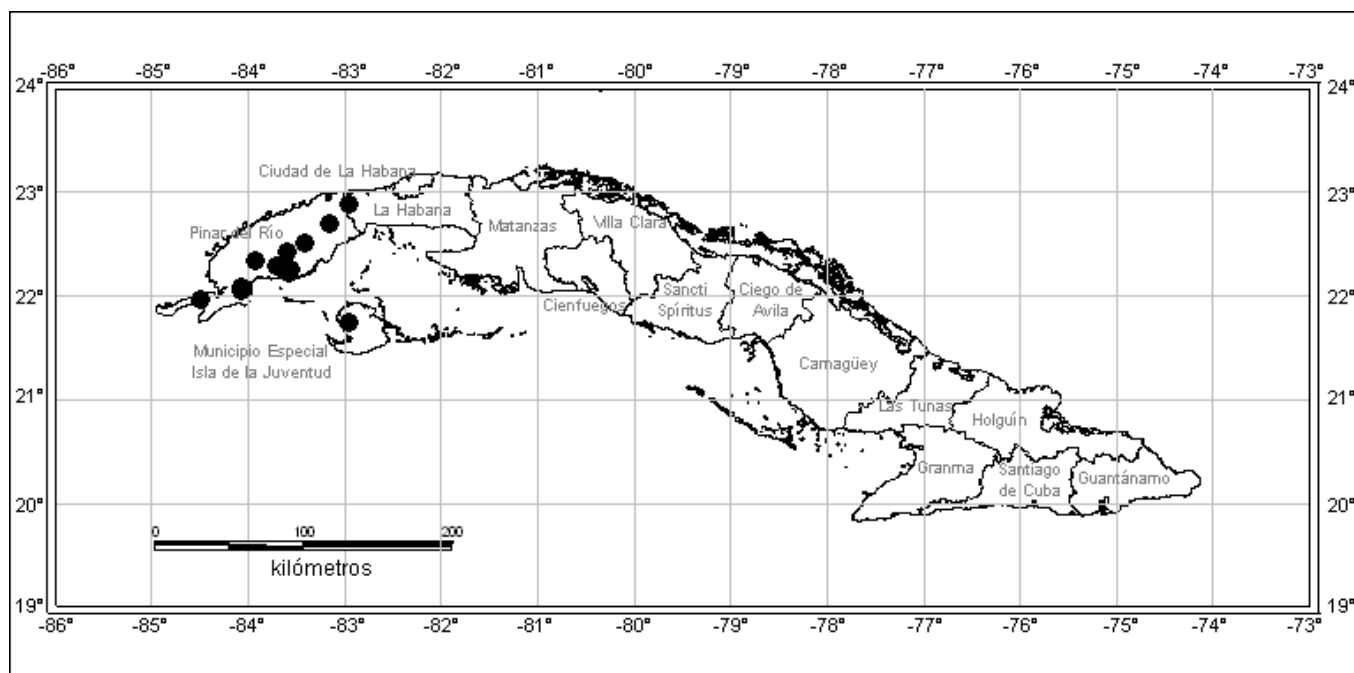
MATERIAL EXAMINADO CUBA. Isla de la Juventud: Sabana de Los Indios, E. P. Killip 45140 (HAC); Borde del Bosque San Francisco de Las Piedras, E.P. Killip 44835 (HAC); Los Indios, Acuña 17623 (HAC).- **Pinar del Río:** Sabanas de Vuelta Abajo, Herradura, Wright 2325 (HAC); Herradura, Van Herman 870 (HAC); Cañada al Oeste del km 12 de la carretera de Pinar del Río a La Coloma, Hno. León 12877 (HAC); Santa Bárbara, Guanés, Alonso Olivé 25281 (HAC); Camino entre Pinar del Río y Ovas, J.T. Roig 13736, 8860 (HAC); cerca de la Laguna del Junco, J.T. Roig 23496 (HAC); Laguna de Santa María, San Luis, León & Alain 22860 (HAC); Entre Pinar del Río y Ovas, a izquierda de la carretera de La Coloma, J.T. Roig 3820 (HAC); San Ubaldo, Sandino, Urquiola & Vega 3019 (HIPR).

1.1.1 *Herpyza grandiflora* (Griseb.) C. Wright var. *stenophylla* Urban Symb. Antill. 9:452. 1928.

TYPUS: “Prov. Pinar del Río inter Pinar del Río et Coloma in campis arenosis (olim Pinetis) ad kilom. 13, m. Nov. flor et fruct.: Wright n. 18233”. Holotipo GH; isotipo NY.

Difiere de la variedad típica en que el folíolo terminal varía desde elíptico-oblongo hasta oblongo linear, midiendo 3-5 X 0.8-1.5 cm.

FENOLOGÍA: Especímenes florecidos y fructificados se observaron durante el mes de noviembre.



Mapa 1. Distribución en Cuba de la especie *Herpyza grandiflora*.

DISTRIBUCIÓN: Endémica de Cuba en la provincia de Pinar del Río.

HÁBITAT: Sabanas de arenas blancas, Pinares de Arenas Blancas.

ESTADO DE CONSERVACIÓN: En Peligro (EN).

MATERIAL EXAMINADO. CUBA. Pinar del Río: Entre Pinar del Río y La Coloma, km 13, Wright 18233 (GH).

2. *Dioclea* K. Kunth Nov. Gen. Et Sp. Pl. 6:437, Tab. 576. 1824.

SPECIES TYPICA: *Dioclea sericea* Kunth.

Nota. **Hutchinson** 1964, hizo una lista de varios sinónimos genéricos. Ninguno de estos nombres se aplicó a las especies cubanas.

Enredaderas lignificadas, trepadoras sobre árboles o arbustos grandes, o bejucos trepadores a gran altura. Hojas pinnadamente trifolioladas, los folíolos laterales generalmente más pequeños que el folíolo terminal, las márgenes enteras, revolutas, con pubescencia variable; estipeladas, con estipelas cerdosas a filiformes; estípulas lanceoladas o triangulares, prolongadas por debajo del punto de inserción o no prolongadas.

Inflorescencias erectas, generalmente simples y axilares, fasciculado-racemosas, nodosas o tuberculadas con raquis nudoso, pedunculadas, brácteas lineares a triangulares, persistentes a deciduas; bractéolas ovadas, flaveladas a orbiculares, persistentes o deciduas. Flores sombreadas con color violáceo, púrpura y azul; tubo del cáliz 4-5-lobulado, pubescente por dentro, glabro o variadamente pubescente exteriormente, los lóbulos superiores parcialmente o completamente fusionados; los laterales pequeños, el inferior más largo; lámina del estandarte oblanceolada a algo orbicular, emarginada, refleja, basalmente biauriculada con aurículas reflejas, y generalmente bicallosa, glabra a puberulenta, carnosa o membranácea, las alas libres, con lámina oblicuamente oblonga a oblicuamente ovada, auriculada, ocasionalmente con un espolón, quilla incurvada, rostrada u obtusa, sus pétalos fusionados distalmente, la lámina triangular a algo oblicuamente oblonga, auriculada; estambres 10, el filamento vexilar, libre en la porción basal de aproximadamente 3 mm de longitud y fusionado en el centro con el resto de los estambres de la vaina estaminal, todos los filamentos libres distalmente, las anteras dimórficas o monomórficas, alternando con las anteras perfectas, las imperfectas pequeñas y abortivas; pistilo comprimido,

geniculado, el ovario viloso, subsentado, 2-pluriovulado; el estilo comúnmente en la porción superior, engrosado en el ápice, el estigma capitado, glabro. Legumbre linear, oblonga a ovado-oblonga, casi aplanada, comprimida o túrgida, coriácea, la sutura superior engrosada o estrechamente alada de cada lado, con dehiscencia variable, a veces 2-valvar, pubescencia variable; semillas grandes, pocas, cúbicas lisas o túrgidas ásperas; si son pequeñas aparecen en gran cantidad, y son ásperas y aplanadas, oblongas a suborbiculares; el hilo linear o ligeramente oblongo, largo, rodeando aproximadamente un quinto a casi la mitad o cerca de las tres cuartas partes de la testa.

DISTRIBUCIÓN Y TAMAÑO. *Dioclea* es un género pantropical con aproximadamente 70 especies, la gran mayoría de ellas distribuidas en Sudamérica Tropical (**Maxwell** Com. Per. 1998).

COMPOSICIÓN QUÍMICA. Presencia del aminoácido no proteico, canavanina en la semilla (**Johns**, 1994).

NÚMERO CROMOSÓMICO. $2n=22$ (**Lackey**, 1981).

PALINOLOGÍA. Grano de polen heteropolar con los colpos fusionados sobre los polos, y estratificación de la pared más especializada dentro de la subtribu (**Ferguson & Skvarla**, 1981).

ETNOBOTÁNICA. Se ha registrado nodulación en especies de *Dioclea* (**Faria et al.**, 1994).

Clave para las especies cubanas de *Dioclea*.

1.a Indumento de la inflorescencia, botones florales y frutos jóvenes ferrugíneo negruzco; brácteas erectas, lineares, caducas; frutos con el pedicelo insertado en la sutura superior, margen superior generalmente recto; bractéolas generalmente caducas
..... 1. *Dioclea wilsonii*.

1.b Indumento de la inflorescencia, botones florales y frutos jóvenes flavescents, ocasionalmente ferrugíneo; brácteas reflexas, usualmente lanceoladas, semipersistentes; frutos con el pedicelo insertado en posición intermedia entre las suturas, margen superior en su porción distal frecuentemente incurva hacia abajo; bractéolas generalmente persistentes
..... 2. *D. reflexa*.

2.1 *Dioclea wilsonii* Standley Publ. Field Columbian Mus., Bot. Ser. 4:310. 1929.

TYPUS: "Honduras, Point Triunfo, near Tela, P. Wilson 336 (holotypus: F)".

Dioclea violacea sensu Mart. FL.Bras. 15 (1):162. 1859 (based on collections such as Guillemín (K); non *D. Violacea* Mart. Ex Benth. (1837), based on Pohl 338 (lectotype: W) and Martius (Paratype: BR).

Enredaderas gruesas. Tallos glabros a densamente ferrugíneo-pilosos. Hojas con folíolos anchamente elípticos a obovados, 7-16 X 4-11 cm, el ápice abruptamente agudo, generalmente glabro excepto en las venas primarias, reticulado arriba, laxamente pubescente debajo, cartáceo, obtuso en la base, los laterales oblicuos, venas laterales primarias en aproximadamente 7 pares; pecíolos laxamente estrigosos a pilosos, el raquis 2-3 cm de longitud, estipelas de hasta 15 mm de longitud; estípulas lanceoladas, de 15-30 mm de longitud, prolongadas de hasta 10 mm debajo del punto de inserción, pilosa y ciliada exteriormente. Inflorescencias de hasta 45 cm de longitud, florecidas más de la mitad de la longitud, los tubérculos clavados, la elongación de la cima variable, el indumento de la inflorescencia ferrugíneo-negrusco; brácteas lineares, erectas de aproximadamente 8 mm de longitud o más larga, caducas; bractéolas anchamente ovadas a flabeladas, 2-3 X 4 mm, caducas; pedicelos de 2-6 mm de longitud. Flores con botones rectos, de aproximadamente 1.5 cm de longitud, tubo del cáliz de aproximadamente 7 mm de longitud, carnoso, ferrugíneo-negrusco-pubescente exterior e interiormente, lóbulos superiores del cáliz parcialmente fusionados, emarginado, de aproximadamente 5 X 9 mm, los laterales agudos de aproximadamente 6 mm de longitud, el lóbulo inferior agudo de aproximadamente 7 mm de longitud; estandarte rotundiforme-orbicular, carnoso, glabro, bicalloso, de hasta 15 mm de longitud, las aurículas semiorbiculares, reflexas, la uña de aproximadamente 3 mm de longitud, las alas oblicuamente oblongas a obovadas, de hasta 15 mm de longitud, la uña de aproximadamente 5 mm de longitud, la quilla triangular, de aproximadamente 8 mm de largo y aproximadamente 9 mm de ancho distalmente, auriculada, la uña de aproximadamente 5 mm de longitud, el margen superior ondulado, culminando en un rostro obtuso; estambres 10, las anteras dimórficas, la antera vexilar y las anteras internas de la vaina estaminal, anteras imperfectas o estériles, que alternan con las perfectas o fértiles de la vaina estaminal, las anteras perfectas de aproximadamente 1 mm de longitud; ovario sésil, argénteo-viloso o bicoloreado, 3-4-ovulado, porción superior del estilo glabro, de aproximadamente 5 mm de longitud, la parte inferior bulbosa. Fruto comprimido, oblongo de aproximadamente 10 X 6 X 1-2 cm, pedicelo adherido a lo largo de la sutura superior, recta arriba, naviculada debajo, indehiscente, glabra, la sutura superior con finas alas en dirección paralela, el margen inferior fino; semillas 2-4(-5), semiorbicular a oblongas de aproximadamente 30 X 25 X

15 mm, ásperas, pardo-oscuras, el hilo rodeando aproximadamente las tres cuartas partes de la testa.

FENOLOGÍA: Florece y fructifica de Octubre a Diciembre.

DISTRIBUCIÓN. *Dioclea wilsonii* es encontrada en el Este de Brasil, a lo largo del Norte de Suramérica, en algunas de las Antillas y a lo largo de América Central y México, en las Islas Hawaii y algunas de las islas del Pacífico y posiblemente introducida en Madagascar. Se reporta de Cuba, sin localidad exacta por **Sauget & Liogier** (1951), y por **Perkins** (citado por **Sauget & Liogier**, 1951).

HÁBITAT. En bosque semideciduo mesófilo.

ESTADO DE CONSERVACIÓN: En Peligro Crítico (CR).

OBSERVACIONES: No se han visto especímenes de esta especie en los herbarios cubanos.

2.2 *Dioclea reflexa* Hook. F., in Hook. Niger Fl. 306. 1849.

TYPUS: "W. Africa, Cape Palmas and region of Fernando Poo, Vogel 32 (K, holotype)".

Canavalia reflexa (Hook. F.) Wright in Sauvalle, Fl. Cub. 535. 1869. (Wright 3539 holotypus: GH).

Canavalia miniata Griseb. no DC.

Enredaderas gruesas de hasta 6 m de altura o más y 3 cm de diámetro; tallos lignificados, glabros o cubiertos con pelos largos esparcidos pardo-amarillentos. Hojas con folíolos anchamente elípticos a obovados de 5-23 X 3-13 cm, el ápice agudo o brevemente acuminado, generalmente glabros, excepto en las venas primarias, reticulados arriba, laxamente pubescentes debajo, cartáceos, obtusos en la base, los laterales oblicuos, venas principales laterales en aproximadamente 8 pares; pecíolos pilosos, el raquis de 2-3 cm de longitud; las estipelas filamentosas, de 3-14 mm de longitud; estípulas lanceoladas, de aproximadamente 22 mm de longitud, prolongadas en aproximadamente 10 mm debajo del punto de inserción, pilosas exteriormente.

Inflorescencias robustas de hasta 45 cm de longitud, florecidas en la mitad de la longitud, los tubérculos o nodos clavados, elongación de la parte superior variable, el indumento generalmente flavescente, ocasionalmente ferrugíneo, los botones a veces negruzcos; brácteas lanceoladas, de 10-20 mm de longitud, aproximadamente 3 mm de ancho, ocasionalmente persistente, reflexa, con pubescencia adpresa-aureo-cinérea; bractéolas flabeladas

2-3 X 2-4 mm, pardo-oscuro-puberulenta exteriormente, persistente; pedicelos de 3-6 mm de longitud. Flores con botones rectos de aproximadamente 1.5-2.0 cm de longitud; tubo del cáliz de aproximadamente 7 mm de longitud, carnoso, con pubescencia oscuro-ferrugínea exteriormente y oscuro-velutina interiormente, lóbulos superiores del cáliz parcialmente fusionados, emarginado de 2-5 X 7 mm, los laterales agudos de aproximadamente 5 mm de longitud, el inferior agudo de 6 mm de longitud; estandarte rotundiforme-orbicular a obovado, carnoso, glabro, bicalloso, de aproximadamente 15 mm de longitud, las aurículas semiorbiculares, reflexas, la uña de aproximadamente 3 mm de longitud, las alas oblicuamente oblongas a obovadas, de aproximadamente 10 mm de longitud, la uña de aproximadamente 5 mm de longitud, la quilla triangular, de aproximadamente 9 mm de longitud y aproximadamente 10 mm de ancho distalmente, débilmente auriculada, la uña de aproximadamente 5 mm de longitud, el margen superior ondulado o con un lóbulo prominente, culminando en un rostro obtuso; estambres 10, el vexilar y los internos, anteras alternas de la vaina estaminal imperfectas, las anteras perfectas o fértiles de alrededor de 1 mm de longitud; ovario sésil, argéteo-villoso, 2-4 (-5)-ovulados, parte superior del estilo glabro, de aproximadamente 6 mm de longitud, la parte inferior bulbosa. Frutos comprimidos, elíptico-oblongo, de aproximadamente 5-20 X 4-7 cm, dehiscente, el pedicelo unido al centro, algo convexo arriba, naviculado debajo, glabro, la sutura superior con paralelismo de finas alas, el margen inferior turgente, sulcado; semillas (1-)2-4, semiorbicular a oblonga de aproximadamente 30 X 25 X 14 mm, duras o ásperas, pardo-oscuro, frecuentemente maculado, el hilo rodeando aproximadamente tres cuartos de la testa.

FENOLOGÍA: florece y fructifica entre octubre y diciembre y esporádicamente en enero.

DISTRIBUCIÓN. Pantropical. Algunos autores consideran que la planta tiene un origen Suramericano (**Robyns**, 1954). Presenta adaptaciones de la semilla para flotar, pues según el citado autor tanto las legumbres como la testa de la semilla contienen depósitos de aire, por lo cual en ocasiones se ha encontrado a la deriva transportadas por corrientes marinas. Reportada de Cuba por **Sauget & Liogier** (1951) por un ejemplar colectado por wright n. 3539 depositado en un herbario de Norteamérica cuyo acrónimo es GH. En Cuba no se colecta desde hace más de 100 años (**Sauget & Liogier**, 1951).

HÁBITAT. En bosque semideciduo mesófilo, matorral xeromorfo costero, bosque de Galería, bosque de ciénaga,

vegetación de costa arenosa, y en la ribera costera por encima del bosque cenagoso de mangle.

NOMBRE VERNÁCULO: Ojo de Buey de Costa

ETNOBOTÁNICA: La parte de la liana no descubierta se usa en Senegal en una preparación con aceite de palma para embrocarse áreas del cuerpo afectadas por reumatismo, y después de una vigorosa limpieza y purificación sobre las áreas de la piel afectadas por sarna (**Berhaut**, 1976). Uso similar tiene el polvo de la semilla en el Congo Brazzavill (**Bouquet**, 1969). Además, la semilla asada es molida y mezclada con caolín y una resina de copal de la especie *Daniellia ogea* (Leguminosae-Caesalpinioideae) para uso oral contra el asma, en Ghana, Africa (**Ampofo**, 1983). Se han detectado trazas de alcaloides en el material de Nigeria (**Adegoke et al.**, 1968) y se considera que es similar a la physostigmine (**Oliver**, 1960). Para el fruto se han señalado propiedades venenosas, y aunque no se ha establecido el principio activo se ha comprobado en la región de Bangui, que su antídoto es la decocción de la raíz de la especie *Pycnocoma minor*, de la familia Euphorbiaceae (**Vergiat**, 1970).

La hoja y tallo se han examinado por efectos tóxicos sobre el agua dulce y en caracol de tierra, *Bulinus globulus*, en trabajos sobre el control de esquistosomiasis, donde no se produjo mortalidad (**Burkill**, 1995). En contraste la raíz dio un 70% de mortalidad en extractos de 100 ppm (**Adewunmi & Sofowora** 1980).

ESTADO DE CONSERVACIÓN: En Peligro Crítico (CR)

OBSERVACIONES. No existen especímenes de esta especie en los herbarios cubanos.

Discusión

De los resultados de este estudio se aprecia que existen caracteres morfológicos diagnósticos que definen los géneros *Dioclea* y *Herpyza*. Así, *Herpyza* se caracteriza por tener el estandarte pubescente sobre la superficie dorsal y el ovario ligeramente estipitado; tallos rastreros que enraizan en los nudos; inflorescencias no nudosas con pocas y pequeñas flores y legumbres; los lóbulos superiores del cáliz separados.

Por otra parte, *Dioclea* se distingue por tener el estandarte glabro, el ovario sésil; tallos trepadores más robustos; inflorescencias nudosas con flores y legumbres numerosas y de mayor tamaño; lóbulos superiores del cáliz parcial o completamente fusionados.

Además, *Dioclea wilsonii* puede ser separada de *D. reflexa* con la cual está estrechamente relacionada por

presentar un indumento en la inflorescencia más oscuro, brácteas erectas y un fruto indehisciente.

De acuerdo con **Maxwell** (1980), las semillas de *D. reflexa* no se pueden distinguir de las semillas de *D. wilsonii* y posiblemente de otras especies de Asia tal como *D. javanica* Benth. El citado autor añade que la dificultad para distinguir *D. reflexa* de *D. wilsonii* se debe a la existencia de algún intercambio de genes.

Generalmente *D. reflexa* podría encontrarse a bajas altitudes, pero escasamente, en la flora que está a la deriva, así, su indumento se presenta en un rango desde amarillo rojizo claro a ferrugíneo, pero nunca oscuro como en *D. wilsonii*.

Además, se considera acorde con **Maxwell** (1980), **Lackey** (1981) y **Lewis & Polhill** (1998), que la característica de las brácteas reflejas, de la cual deriva el epíteto *reflexa*, es un carácter conservador, pero la anchura y el indumento son variables, así como también la tendencia de las brácteas y bractéolas a persistir.

Es interesante destacar que el margen inferior de los frutos de *D. reflexa* se convierte en sulcado y parcialmente abierto, pero no lo suficiente para permitir que las semillas se dispersen. **Maxwell** (1981) señaló que este último carácter puede ser visto en gran parte de los materiales observados, pero podría no mantenerse universalmente.

Se considera que el exocarpo glabro de *D. reflexa* es liso, plano y algo más grueso que el de *D. wilsonii*, y es frecuentemente algo constricto entre las semillas y además a lo largo del margen inferior. Además la inserción del pedicelo de *D. wilsonii* es invariable en el margen superior, el cual es recto, mientras que en *D. reflexa* es variable, y los frutos con una inserción central pueden ser obovados en forma.

Lackey (1981) señaló que no existe conocimiento sobre cuáles son los parientes filogenéticamente más cercanos a *Herpyza*, en la subtribu (Diocleinae) y en tribu Phaseoleae, dentro de la cual se clasifica actualmente el género. *Herpyza* presenta algunos caracteres que no son propios de la subtribu a la cual pertenece, por lo cual consideró anómala su posición taxonómica en la subtribu Diocleinae, y añadió además que este género monotípico endémico de Cuba ha sido muy pobremente estudiado, especialmente desde una perspectiva evolutiva, y no se han encontrado caracteres morfológicos que lo relacionen con otros géneros de leguminosas.

De lo anteriormente expuesto se deduce, que acorde con **Lavin et al.** (2002), se requiere un estudio molecular-biogeográfico, así como un análisis de las divergencias morfológicas y moleculares que permitan dilucidar con más exactitud las relaciones filogenéticas de *Herpyza* con otros taxones de leguminosas.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su reconocimiento a Juan Carlos Rodríguez Romero y a Omar González Echavarría por sus valiosas colaboraciones con la ilustración.

Bibliografía

- Adegoke, E.A., A. Akisanya & S.H.Z. Naqvi.** 1968. Studies of Nigerian medicinal plants. I, a preliminary survey of plant alkaloids, J.W. Afr. Sci. Ass. **13**:13-33.
- Adewunmi, C.O. & E.A. Sofowora** 1980. Preliminary screening of some plant extracts for molluscicidal activity, Pl. Med. **39**: 57-65.
- Ampofo, O.K.U.** 1983. First Aid in plant Medicine, Ghana Rural Reconstruction Movement, Mampong-Akwapim. 4p.
- Berhaut, J.** 1976. Flore du sénégal, ed. 2, vol. **5**. Légumineuses Papilionacées, Dakar. 230-232 pp.
- Bouquet, A.** 1969. Féticheurs et Medecines Traditionnelles du Congo (Brazzaville), Mém. O.R.S.T.O.M. 188 pp.
- Burkill, H.M.** 1995. The Useful plants of West Tropical Africa. Edition 2. vol. 3. Families J-L Royal Botanic Gardens Kew. 857 pp.
- Chappill, J.** 2001. Classification of the Leguminosae employed for cladistic analysis modified from that of Polhill (1994) as indicated. Contacts Jenny Chappill News Seminars, Courses and Programs Research Botany Web Team. The University of Western Australia Home Page. Legume Phylogeny Page.
- Faria, S.M. de, Lima, H.C. de, Carvalho, H.M. Concalves, V.F. & Sprent, J.I.** 1994. Occurrence of nodulation in Legume species from Bahia, Minas Gerais and Espirito Santo States of Brazil. In Advances in Legume Systematics. Part. 5: The Nitrogen Factor, ed. J.L. Sprent and D. McKey, 17-23. Kew. Royal Botanic Gardens.
- Ferguson, I.K., & J.J. Skvarla.** 1981. The pollen morphology of the subfamily Papilionoideae (Leguminosae). In Advances in Legume Systematics. Part. 2. ed. R.M. Polhill and P.H. Raven, 859-896. Kew: Royal Botanic Gardens.
- 1983. The granular interstitium in the pollen of subfamily Papilionoideae (Leguminosae). Amer. J. Bot. **70** (9):1401-1408.
- Holmgren, P., N.H. Holmgren & L.C. Barnett, editors.** 1990. Index Herbariorum Part 1. The Herbaria of the World. Ed. 8. The New York Botanical Garden, Bronx, New York. 693 pp.
- Hu, J.M., M.Lavin, M.F. Wojciechowski, & M.J. Sanderson.** 2000. Phylogenetic Systematic of the tribe Millettieae (Leguminosae) Based on chloroplast *TrnK/matK* sequences and ITS implications

- for evolutionary patterns in Papilionoideae. *American Journal of Botany* **87** (3):418-430.
- Hutchinson, J.** 1964. The genera of flowering plants, 1:426. Oxford University Press.
- Instituto de Geografía ACC e Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía.** 1989. Nuevo Atlas Nacional de Cuba.
- Johns, T.** 1994. Defense of nitrogen-rich seeds constrains selection for reduced toxicity during the domestication of the grain legumes. In *Advances in Legume Systematic*. Part. 5: The Nitrogen Factor ed. J.I. Sprent & D. McKey, 151-167. Kew Royal Botanic Gardens.
- Kajita, T.H., Ohashi, Y., Tateishi, C.D., Bailey, & J.J. Doyle.** 2001. rbcL and Legume Phylogeny, with particular reference to Phaseoleae, Millettieae and allies. *Systematic Botany* **26** (3):515-536.
- Lackey, J.A.** 1981. Phaseoleae. In: **Polhill, R.M. & P.H. Raven (Eds.)**, *Advances in Legume Systematics*. Part. 1. Kew: Royal Botanic Gardens, p. 301-327.
- Lavin, M., A. Beyra-M., G. Lewis, & L. Rico.** 2002. Hotspot diversity in the Caribbean: Museum or cradle? In Horvitz, Carol C., Organizer 2002 Symposium in Panama City, 29 July through 3 August, entitled "Islands in the Storn: biodiversity, natural disturbance and conservation in the Caribbean" Sponsored by the Coalition for Excellence in Tropical Biology.
- Lewis, G.P. & R.M. Polhill.** 1998. A situacao actual da Sistematica de Leguminosae Neotropicais. *Proc. VI Congreso Latinoamericano de Botánica*, Missouri Botanical Garden Press. Pp. 113-129.
- Maxwell, R.H.** 1980. Dioclea. *Annals of the Missouri Botanical Garden*. Dwyer & Collaborators. Flora of Panama. Family 83. Leguminosae vol. **67** (3): 662-675.
- Oliver, B.** 1960. Medicinal Plants in Nigeria, Nigerian College of Arts, Sciences And Technology. 25,60,61 pp.
- Robyns, W.** 1954. Papilionaceae: Glactiinae, in R. Boutique, *Flora du Congo-Belge et du Ruanda-Urundi*. *Spermatophytes*, 6:141-142.
- Roig, J.T.** 1974. Plantas Medicinales, aromáticas o venenosas de Cuba.
- Ministerio de Agricultura, República de Cuba**, Habana 872 pp.
- Sauget, J.S. & E.E. Liogier.** 1951. Leguminosae. *Flora de Cuba*, vol. 2. *Contr. Ocas. Mus. Hist. Nat. Colegio de La Salle*. (10): 312-314.
- UICN.** 1994. Categorías de las Listas Rojas de la UICN (Unión Mundial para la Naturaleza), Gland. Suiza 21 p.
- Vergiat, A.M.** 1970. Plantes magiques et médicinales des Féticheurs de l'Oubangui (Région de Bangui), *I.J. Agr. Trop. Bot. Appl.* **17**: 188.
- Wiersema, J.H., J.H. Kirbride, J.R., & C.R. Gunn.** 1990. Legume (Fabaceae) Nomenclatura in the USDA Germoplasm System. U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin No. 1757, 572 p.

Recibido el 3 de octubre de 2003

Aceptado para su publicación el 11 de febrero de 2004

UNA ESPECIE NUEVA DE *ESPELETIOPSIS* (ASTERACEAE, HELIANTHEAE) DE COLOMBIA

por

Santiago Díaz-Piedrahita* & Sandra Obando**

Resumen

Díaz-Piedrahita, S. & S. Obando: Una especie nueva de *Espeletiopsis* (Heliantheae, Asteraceae) de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **28** (108): 323-326, 2004. ISSN 0370-3908.

Se describe e ilustra una nueva especie de *Espeletiopsis* conocida hasta ahora del Páramo de Tierranegra, sector de La Lejía, en la cordillera Oriental de Colombia. El nuevo taxón es afín a *E. insignis* (Cuatrec.) Cuatrec., especie de la que se separa por presentar menor porte, hojas menores y con diferente forma, y ramas floríferas más cortas y con capítulos más grandes pero en menor número.

Palabras clave: *Espeletiopsis*, Espeletiinae, Heliantheae, Asteraceae, nueva especie, Colombia, Botánica sistemática.

Abstract

A new species of *Espeletiopsis* is described and illustrated from the Paramo de Tierranegra in Norte de Santander, Colombia. The new species is related to *E. insignis* (Cuatrec.) Cuatrec., which differs in its smaller size, smaller leaves and a different form, shorter flowering branches and larger but fewer capituli.

Key words: *Espeletiopsis*, Espeletiinae, Heliantheae, Asteraceae, new species, Colombia, Systematic Botany.

Introducción

El género *Espeletiopsis* Cuatrec. fue propuesto en 1976, con base en un grupo de 24 especies, antes ubicadas en el género *Espeletia* Humb. & Bonpl. Tales especies

comparten como características comunes, el presentar sinflorescencias corimboideo – paniculadas y brácteas alternas en las ramas florales. Aparte de lo anterior, se caracterizan por presentar hojas más coriáceas y con menor cantidad de indumento, pero no muestran diferencias sig-

* Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Correo electrónico: revista@accefyn.org.co

** Instituto de Biología, Universidad de Campinas, Curitiba, Brasil. Correo electrónico: sandraobando@lycos.com

nificativas en las secuencias de ADN, aparte de permitir con frecuencia la formación de híbridos intergenéricos, motivos por los cuales el estatus taxonómico de este grupo aun se discute y cabe la posibilidad de que en un futuro resulte más conveniente considerarlo como un subgénero, más que como un género independiente. Pasados veinte años de la propuesta inicial, Cuatrecasas (1996) publicó una clave provisional para las especies cuyo número se redujo a 20, una de ellas con una variedad. De las mismas, 15 son propias de la flora colombiana y sin excepción prosperan en la cordillera Oriental, en territorio de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Santander y Norte de Santander. A este grupo se agrega una nueva especie conocida hasta ahora del páramo de Tierranegra, en jurisdicción de Pamplona. A continuación se describe el nuevo taxón.

Espeletiopsis sanchezii S. Díaz & S. Obando, sp. nov.
Fig. 1

Caudex lignosus, rectus, usque ad 5 m. Folia coriacea, discolora, leviter flexibilis in sicco, usque 25 – 28 cm longa x 5 – 7.5 cm lata, obovata, acuta breviter acuminata, pseudopetiolata, breviter vaginata, margine leviter revoluta; nervo medio supra impresso, subtus crassissimo et valde elevato; nerviis secundariis usque 30, supra impressis, subtus prominentibus, ad marginem arcuatis anastomosatisque, pagina superiore laxe sericea et gradatim glabra; pagina inferiore lanosa. Rami floriferi axillares lignulosi, lanosi, cum foliorum rosula longitudine aequantes, 30 – 37 cm longi., cum 10 – 12 foliis ramealibus amplexicaulibus anguste – obovatis vel bracteiformibus, subcoriaceis, tomentoso – lanatis, usque 10 cm longis (vaginis inclusis), foliis proximalibus ipsis minoribus. Panicula corymbifera basitonica usque ad 40 cm alta, 70 – 120 capitulis munita; pedunculis primariis brevibus, in dimidia parte longiores, sursum gradatim minoribus. Capitula radiata globulosa breviter pedunculata; receptaculo convexo circa 6 mm diam; involucrum herbaceum 8-bracteato, 2 – seriato, exteriores bracteae ovatae vel ovatae – ellipticae, 10 nervatae usque ad 10 mm longae x 6 mm latae, extus ad apicem villosae, intus glabris, bracteae transitoriae decrescentes, steriles, extus cum tomenti versus basim atque apicem, intus glabris; paleae florum foeminarum anguste-ovatae acutae 3.5 – 4.5 mm longae x 1.2 – 1.5 mm latae, extus cum tomenti pilosi versus basim; paleae flosculorum hermaphroditorum anguste – obovatae usque ad 6 mm longae x 2 mm latae ad apicem pilosiusculae; flores foeminei ligulatae circa 35; tubus florum ligularum versus basim cum corona pilosa característica, pilis clavatis pluricellularibus stramineis; ligulae late – elliptica patente 3.5 mm longae x 1.5 mm latae, 2 – denticulatae

aurea, styli glabri 2.0 – 2.5 mm longi, rami stigmatici bifidi 1 mm longi; floculi hermaphroditi steriles circa 65 in capitulo, campanulati 5 – denticulati lutei 7 – 8 mm longi, tubo 3.5 mm longo glabro versus apicem piloso, lobis triangularibus ca. 1 mm long, intus glabris extus pilosis; filamenta antherarum in parte superiore distincta, antherae ca. 3 mm longae, ovarium globosum glabrum, stylo 7 mm longo stygma dilatato. Achaenia triquetra obovata nigricantia glabra epapposa 2.5 – 3.0 mm longa x 1.0 – 1.5 mm lata.

Typus: COLOMBIA: Departamento de Norte de Santander, Pamplona, sector de La Lejía, páramo de Tierranegra, 3200 – 3300 m. *L. Roberto Sánchez, Miguel A. Murcia & William Valencia* 7281. Holotypus COL, Isotypi COL, HECASA.

Plantas erectas hasta de 5 m alt., coronadas por una roseta de cerca de 120 hojas coetáneas; tallo simple, desnudo, leñoso y con médula bien desarrollada. Resina incolora, traslúcida, con olor a trementina.

Vaginas foliares, semilunares, anchamente ovadas, de color verde pálido en fresco, en seco, rígidas, quebradizas y de color marrón, de 3 cm long x 3 – 4 cm lat. en las hojas maduras, en las juveniles de 4 cm long x 4 cm lat., adaxialmente desnudas, abaxialmente cubiertas de indumento flocoso, estramíneo; lámina foliar coriácea, ligeramente flexible en seco, obovada en las hojas maduras y de 25 – 28 cm long x 5 – 7.5 cm lat., en las hojas intermedias y juveniles angosto obovada y con tendencia a incurvarse hacia un lado; ápice agudo, acuminado, base atenuada en un pseudopecíolo hasta de 0,6 de longitud y 0.8 cm de anchura. Hojas juveniles angosto obovadas y de 11 – 21 cm long x 2.5 – 3.5 cm lat.; superficie adaxial glabra o casi glabra en las hojas mayores, en las demás con indumento seríceo fácilmente desprendible, verde claro brillante en vivo, en seco marrón claro; superficie abaxial con indumento blanco en vivo que pasa a dorado en seco; margen finamente revoluta; nervio medio impreso por la haz y cubierto de indumento en las hojas inmaduras, por el envés muy engrosado y prominente, ensanchado hacia la base y cubierto de indumento villosa, más o menos caduco; nervios secundarios 20 – 30 por lado, impresos por la haz, prominentes por el envés, y que divergen en ángulo 50 – 60° con respecto al nervio medio, arqueados y anastomosados hacia la margen, distantes entre si 1 – 1.5 cm.; retículo impreso en la haz, prominente en el envés.

Ramas floríferas axilares, semileñosas y cubiertas de denso indumento blanquecino, de 30 – 37 cm long incluida la inflorescencia; hojas bracteiformes, ample-

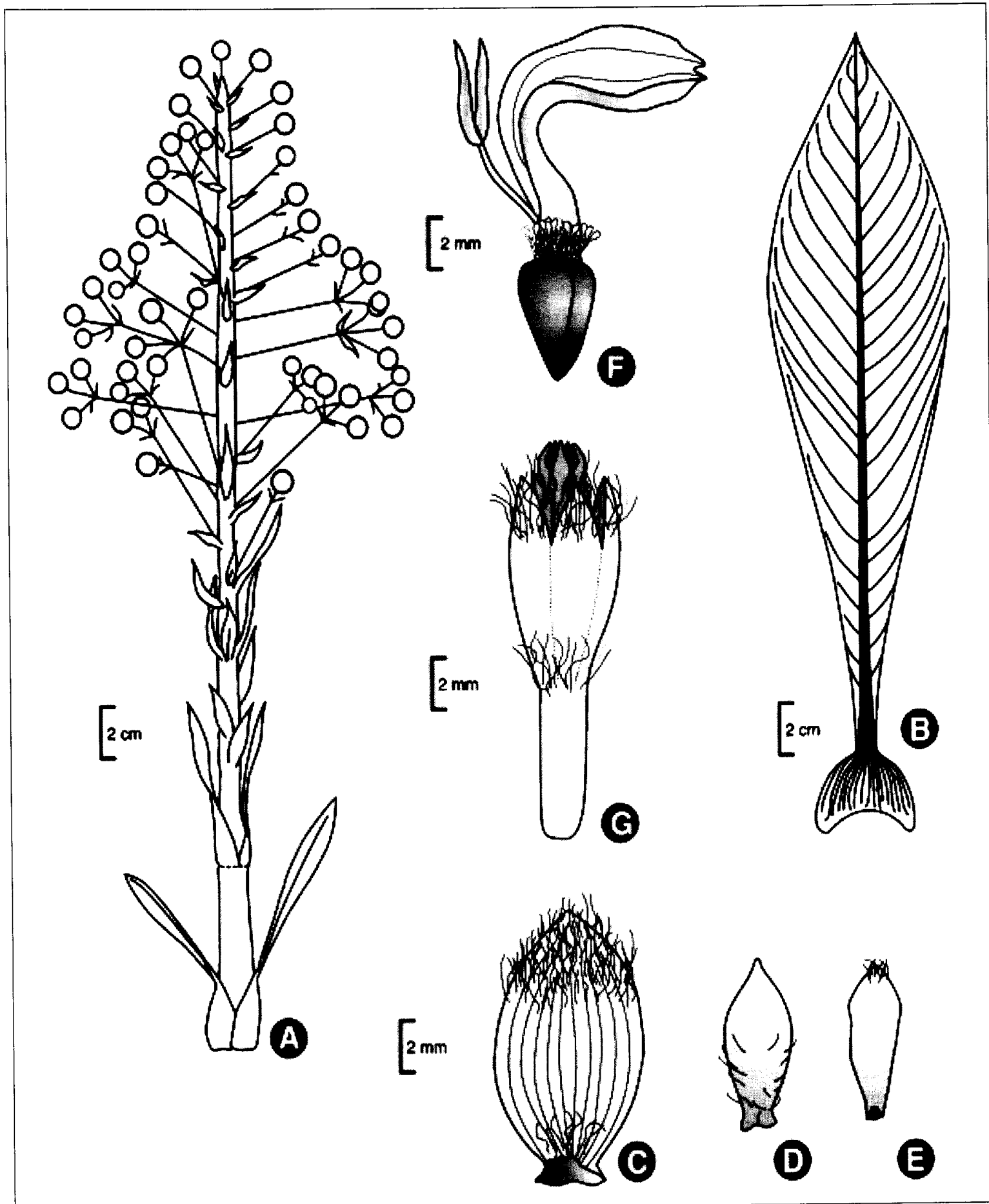


Figura 1. *Espeletopsis sanchezii* S. Díaz & S. Obando sp. nov. A. Esquema de la rama florífera; B. Perfil foliar; C. Filaria; D. Palea de las lígulas; E. Palea de los flósculos hermafroditas, F. Flor femenina ligulada, G. Flósculo hermafrodita. Diseño digital de María Andrea Izquierdo elaborado con base en esquemas de los autores.

xicaules, ca 10, decrecientes hacia el ápice, las inferiores con lámina similar a la de las hojas de la roseta, hasta de 9.5 cm long x 0.8 cm lat, las superiores ovadas a angostamente ovadas, y largamente acuminadas. Panícula corimbiforme pluricéfala basitónica deformada por el alargamiento proximal del eje y formada por 70 – 120 capítulos dispuestos en 34 – 40 cimas de 2 o 3 capítulos; pedúnculos de las cimas hasta de 6 cm long; al origen de cada cima corresponde una bráctea semiamplexicaule similar a las hojas bracteiformes estériles pero de menor tamaño, hasta de 3.5 cm long x 0.5 cm lat.; estas brácteas decrecen hacia el ápice de la rama floral. Brácteas, pedúnculos, bractéolas y pedicelos, densamente fúlvido lanosos.

Capítulos erectos de 1.2 – 1.3 cm diam., pedúnculos hasta de 6 mm long, pedicelos de 1.5 – 2.5 cm long, densamente cubiertos de indumento villosos blanco, más denso hacia la inserción del capítulo, receptáculo cónico de 5 – 6 mm diam., involucre formado por ocho filarias dispuestas en dos series, las exteriores ovadas, cóncavas, engrosadas y esclerificadas en la base membranosas hacia el ápice 7 – 8 mm long x 5.0 – 5.5 mm lat., con 10 nervios longitudinales y el dorso cubierto en el tercio apical de indumento villosos, las interiores obovadas, cóncavas, engrosadas y esclerificadas en la base, pilósulas en el dorso de la porción apical. Paleas de las flores femeninas angosto – ovadas, de 3.5 – 4.5 mm long x 1.2 – 1.5 mm lat, agudas en el ápice, internamente glabras, en el dorso con escasos pelos pluricelulares hacia la base; flores femeninas liguladas ca. 35 por capítulo, ovario obovado, blanquecino de ca. 2.5 mm alt, tubo de ca. 1 mm long, cubierto por una corona de pelos claviformes pluricelulares, lígulas elípticas, reflejas, amarillas en vivo, de 3.5 mm long x 1.5 mm lat, bidentadas, estilo de 2.0 – 2.5 mm long, estigma bifido, ramas estigmáticas de 1 mm long; paleas de los flósculos hermafroditas obovadas de 6 mm long x 1.8 – 2.0 mm lat, con un mechón apical de pelos pluricelulares en la cara dorsal; flósculos hermafroditas estériles ca. 60 por capítulo, campanulados, amarillos en vivo, de 7 – 8 mm long, 5-denticulados, lóbulos de ca. 1 mm long, pilosos en la cara dorsal, tubo basal de 3.5 mm long, cubierto externamente de pelos en la porción superior, porción ensanchada, estambres algo más largos que la corola y el pistilo, filamentos glabros, adnatos a la porción tubular de la corola, anteras singenésicas de ca. 3 mm long, ovario glabro, estilo de 7 mm long, estigma dilatado. Aquenios triquetros de 2.5 – 3.0 mm long x 1.0 – 1.5 mm lat, glabros, lisos y negruzcos.

Etimología

El epíteto específico hace homenaje al biólogo Luis Roberto Sánchez, primer recolector de esta especie y entusiasta investigador de la flora nortesantandereana.

Comentarios

Espeletiopsis sanchezii S. Díaz & S. Obando muestra su mayor afinidad con *E. insignis* (Cuatrec.) Cuatrec., especie de la que se puede separar, entre otros caracteres por el menor porte (4 – 5 m. vs. 8 – 10 m), el limbo foliar menor (25 – 28 cm long. vs 50 – 70 cm long.) la forma de la lámina foliar, (oblanceolada y acuminada en el ápice, entera y levemente revoluta, vs. oval – lanceolada, atenuada en ambos extremos e irregularmente sinuada). Adicionalmente, las ramas florales son más cortas, pues no sobrepasan la altura de la roseta, en ellas el corimbo se deforma como consecuencia de un alargamiento proximal y los capítulos son más grandes, pero se presentan en menor número (70 – 120 vs. 240 – 300).

En la clave para identificar las especies de *Espeletiopsis* (Cuatrecasas, 1996) el nuevo taxón se puede incluir a la altura del numeral 17 así:

- 16'. Lígulas de las corolas periféricas amarillas o verdoso – amarillentas. Corolas del disco verdosas 17
17. Lámina foliar obovada de 20 – 30 cm long. y con ápice agudo acuminado *E. sanchezii*
- 17". Lámina foliar ovado lanceolada u ovado obtusa, mayor de 50 – 70 cm long.
- 17"". Lámina foliar ovado – lanceolada de 50 – 70 x 11 – 15 cm, aguda *E. insignis*
- 17'''. Lámina foliar ovado – obtusa de 50 x 19 – 20 cm, *E. trianae*
18. Lígulas de color crema

Bibliografía citada

- Cuatrecasas, J. 1976. A new subtribe in the Heliantheae (Compositae): Espeletiinae. *Phytologia* 35 (1): 43 - 61.
- _____. 1996. Clave provisional de las especies del género *Espeletiopsis* Cuatrec (Espeletiinae, Compositae). *Annales Jard. Bot. Madrid* 54: 370-367.

Recibido el 5 de abril de 2004.

Aceptado para su publicación el 15 de junio de 2004.

CARACTERÍSTICAS DE LA TURBULENCIA Y DE LA ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA EN BOGOTÁ

por

Gerardo de J. Montoya G.¹, William Cepeda P.² & Jesús A. Eslava R.¹

Resumen

Montoya, G., W. Cepeda & J. Eslava: Características de la turbulencia y de la estabilidad atmosférica en Bogotá. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **28** (108): 327-335, 2004. ISSN: 0370-3908.

Por primera vez se analizan para la Sabana de Bogotá algunas de las características de la turbulencia y la estabilidad atmosférica como son: la escala de Monin – Obuckov, la temperatura de escala, la velocidad de fricción y el flujo de calor sensible de acuerdo con la teoría de similaridad de Monin – Obuckov. Debido a que esta teoría es poco conocida también se presenta la derivación de estos parámetros usando el método energético e igualmente la manera como estos parámetros pueden ser incluidos dentro de un modelo de dispersión. El cálculo de estos parámetros se llevó a cabo con ayuda de mediciones de la temperatura del aire a 2 y 10 m y del viento a 10 m. En general se destaca la relación entre el calentamiento diurno y el incremento de la turbulencia así: hacia las horas del mediodía y comienzos de la tarde se incrementan; la velocidad de fricción, el flujo de calor sensible y la inestabilidad atmosférica representada por valores negativos de la escala de Monin – Obuckov. A estas horas del día también se observa el máximo de la velocidad del viento. También se hace notoria la relación entre el incremento de la turbulencia y el desarrollo de la convección y formación de tormentas eléctricas en la Sabana de Bogotá. Durante las horas de la noche el viento se torna mínimo, el flujo de calor negativo y la escala de Monin – Obuckov positiva indican condiciones estables y neutrales. Estos resultados pueden ser de interés en estudios de dispersión de contaminantes atmosféricos. La relación encontrada entre la turbulencia y el desarrollo de la convección atmosférica, después de una confirmación más detallada, puede servir como un indicativo para el pronóstico de tormentas eléctricas en lugares donde no se poseen datos de radisondeo.

Palabras clave: turbulencia, estabilidad atmosférica, Bogotá.

Abstract

For the first time for the Sabana of Bogotá, some characteristics of the turbulence and the atmospheric stability are analyzed according to the Monin Obuckov Theory. These characteristics are: The Friction velocity, the temperature scale, the Monin – Obuckov length and the sensible heat

¹ Profesor del Grupo de Meteorología, del Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias - Universidad Nacional de Colombia.

² Profesor del Observatorio Astronómico de Bogotá, Facultad de Ciencias - Universidad Nacional de Colombia.

flux. Because this theory is not widely known, a derivation of these parameters, following the energetic method, is presented. Also, it is indicated how, these parameters may be included within a dispersion model.

The computation of these parameters was carried out with temperature measurements at 2m and 10m and wind measurements at 10m. Generally, the results show a high correlation within the diurnal heating and the increasing of the turbulence as follows:

Toward the noon and early afternoon increase; the friction velocity, the heat flux and the Monin – Obuckov length. The wind velocity also reaches the maximum value at this time too. Also it is noticeable a high correlation is seen between the diurnal increasing of the turbulence and the development of convection and formation of thunderstorms over this area. During the night, the wind become weak, the heat flux is negative and the Monin - Obuckov length positive leading to stable and neutral condition.

These results may be of interest in air pollution studies. Also, the link founded between the diurnal increasing of the surface turbulence and the convection activity, after a complementary and detailed confirmation of this finding, can be used as a predictive indicator of thunderstorm formation in regions where the upper air observation are absent.

Key words: turbulence, atmospheric stability, Bogota.

1. Introducción

En los modelos de dispersión los parámetros de la turbulencia y en particular la estabilidad atmosférica son parámetros de entrada muy importantes debido a que estos mecanismos regulan la dispersión de los contaminantes y en parte determinan la calidad del aire.

Asociado con la falta de observaciones específicas a menudo en los modelos de dispersión la estabilidad atmosférica se tiene en cuenta de manera simplificada haciendo uso de tablas tales como las de Pasquill & Gifford (por ejemplo; **Turner** (1964), **Pasquill & Smith** (1983)).

Con la implementación de la red de observaciones micrometeorológicas del Departamento Administrativo del Medio Ambiente DAMA, surgió la posibilidad de analizar las características de la turbulencia y de la estabilidad atmosférica de una manera mas realista y mediante el uso de la teoría de similaridad de Monin - Obuckov (**Monin & Obuckov**, (1954)), también señalada adelante simplemente como teoría M-O.

El objetivo de este trabajo fue el de determinar las características de la turbulencia y de la estabilidad atmosférica en una localidad del distrito capital y mostrar la aplicación de la teoría de similaridad de Monin – Obuckov como una alternativa para ser usada en modelos locales de dispersión y otras aplicaciones micrometeorológicas.

La exposición del trabajo está organizado así: en la siguiente sección se derivan los parámetros principales de la

teoría de Monin – Obuckov. En la sección 3 se aplica la teoría M-O para Bogotá y en la sección 4 se presentan las conclusiones. Finalmente, en el apéndice A se muestra como encaja la teoría de similaridad de Monin – Obuckov dentro de los modelos de dispersión.

2. La teoría de similaridad de Monin - Obuckov

Los principales resultados de la teoría de similaridad de Monin Obuckov fueron inicialmente establecidos a través del análisis dimensional, **Monin & Obuckov** (1954). Sin embargo, estas mismas relaciones pueden ser obtenidas de manera menos abstracta y de más fácil interpretación física con ayuda del método energético (ver por ejemplo **Feagle & Bussinger**, 1980). Este último procedimiento fue el utilizado en este trabajo.

La teoría de similaridad establece como resultado una relación implícita entre cuatro parámetros: La Velocidad de fricción u_* , la escala de Monin – Obuckov L , la temperatura de escala θ_* y el flujo de calor E_b . Más adelante se sugerirá un algoritmo para el cálculo de estos parámetros.

2.1 Algunas definiciones preliminares.

Inicialmente es necesario hacer algunas definiciones y anotaciones. En primer lugar es conveniente representar el valor actual (o total) de una variable meteorológica como la suma de un valor medio (valor no perturbado) más una perturbación (o desviación del valor medio) o sea,

$$a = \bar{a} + a' \quad (1)$$

En otras palabras, la perturbación a' es la diferencia entre el valor total y el valor medio del flujo no perturbado. Además, se definen las siguientes covarianzas las cuales tienen también significado de flujo:

$$E_m = \tau = \rho \overline{u'_i v'_j} \rightarrow \text{Flujo de momento o tensión de Reynolds} \quad (2)$$

$$E_h = C_p \rho \overline{w' \theta'} \rightarrow \text{Flujo de calor.} \quad (3)$$

Utilizando la teoría de **Prandtl** (1925), lo que también se conoce como cerradura de primer orden o teoría K, el coeficiente de turbulencia K_m , se define como,

$$K_m = -l^2 \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (4)$$

en donde l es el camino de mezcla y \bar{u} es la velocidad media del viento. Los flujos anteriores se escriben en la forma proporcional a los gradientes verticales de las sustancias respectivas, es decir;

$$E_m = -\rho K_m \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (5)$$

$$E_h = -\rho C_p K_h \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \right) \quad (6)$$

Usando la temperatura potencial virtual la última expresión se escribe también como,

$$E_h = -\rho C_p K_h \left(\frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z} \right) \quad (7)$$

A E_h se le denomina flujo de flotación.

En la teoría M-O, se considera inicialmente la transferencia de turbulencia en una atmósfera neutral y posteriormente en una atmósfera estratificada estable o inestablemente.

2.2. Transferencia de turbulencia en una atmósfera estratificada neutralmente.

En el caso de una atmósfera estratificada neutralmente existe apenas turbulencia mecánica. De acuerdo con el

método energético la energía necesaria para la existencia de una perturbación (llámese vórtice, torbellino o remolino turbulento) es proporcional a:

$$u_*^2 \approx l^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dz} \right)^2 \quad (8)$$

En donde a u_* se le conoce como la velocidad de fricción. Nótese que teniendo en cuenta los resultados (4) y (5) el flujo de momento dividido entre la densidad se expresa como;

$$\frac{E_m}{\rho} = u_*^2 \quad (9)$$

Asumiendo que el camino de mezcla es proporcional a la altura z , o sea, $l = kz$, en donde k es la constante de Karman e integrando esta ecuación entre θ y u y entre z_0 y z , obtenemos el perfil logarítmico de la velocidad en la capa superficial.

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (10)$$

En esta ecuación z_0 se conoce con el nombre de nivel de rugosidad y se determina experimentalmente. La fórmula (10) es el principal resultado para una atmósfera neutral e indica que el viento en la capa superficial aumenta en forma logarítmica con la altura.

Si se conocen; el nivel de rugosidad y la velocidad del viento a una altura dada, entonces pueden ser determinadas la velocidad de fricción u_* , el coeficiente de turbulencia y otras características.

2.2. Transferencia de turbulencia en una atmósfera no neutral

Para el caso de una atmósfera no neutral o sea estratificada estable o inestablemente, además de la energía de turbulencia generada por el flujo medio, debemos considerar adicionalmente la generada por la fuerza de flotación asociada con la fluctuación local de la densidad. En este caso, en lugar de la expresión (8) debemos escribir,

$$u_*^2 \approx (l)^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 - \alpha \frac{g}{\bar{\theta}_v} l^2 \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \quad (11)$$

en donde, α es un coeficiente de proporcionalidad el cual se determina experimentalmente. Luego de algunas transformaciones, la expresión anterior puede ser escrita como,

$$\frac{u_*^2}{k^2 z^2 (\partial u / \partial z)^2} = [1 - \alpha R_i]^{1/2}, \quad (12)$$

en donde,

$$R_i = \frac{g \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z}}{\bar{\theta}_v (\partial u / \partial z)^2} \quad (13)$$

es el número de Richardson. De acuerdo con esta expresión, el número de Richardson es la relación entre las energías de flotación en el numerador e inercial o de cizallamiento en el denominador. Esta última predomina cerca de la superficie y decrece con la altura más rápidamente que el término de flotación. Resulta interesante conocer la altura en la cual estos dos términos se igualan. A esa altura se llama escala de Monin-Obuckov la cual derivaremos más adelante.

Definimos ahora una función universal,

$$\phi_m = \frac{kz}{u_*} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (14)$$

Con ayuda de esta definición escribimos la expresión (12) como,

$$\phi_m = [1 - \alpha R_i]^{-1/4} \quad (15)$$

Resolviendo las ecuaciones (5) y (7) con respecto a los coeficientes de turbulencia, y luego haciendo la relación entre estos dos resultados tenemos:

$$\frac{K_m}{K_h} = \frac{E_m C_p \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z}}{E_h \frac{\partial u}{\partial z}} = \frac{E_m C_p \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z}}{\rho \frac{\partial u}{\partial z}}$$

Substituyendo en esta expresión a E_m / ρ de acuerdo con (9) obtenemos,

$$\frac{K_m}{K_h} = \frac{u_*^2 \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z}}{\frac{E_h}{\rho C_p} \frac{\partial u}{\partial z}} \quad (16)$$

Realizando sobre esta expresión algunas transformaciones que involucran las igualdades (8), (13) y (14) obtenemos la siguiente expresión,

$$\frac{K_m}{K_h} = -R_i \phi_m \frac{L}{z} \quad (17)$$

en donde, L se llama escala de Monin - Obuckov y se escribe como,

$$L = - \frac{T_v \bar{C}_p \rho u_*^3}{kg E_h} \quad (18)$$

Nótese que en el denominador del lado derecho de esta expresión aparece el flujo de calor. Por eso, L es una medida de la estabilidad atmosférica. Cuando el flujo de calor es positivo (la temperatura potencial virtual aumenta con la altura), de acuerdo con los signos en (7) y (18) tenemos estabilidad. Por el contrario, cuando $\partial \bar{\theta}_v / \partial z, < 0$ tenemos inestabilidad atmosférica. Nótese además la fuerte dependencia de L de la velocidad de fricción u_* .

De acuerdo con lo anterior, la escala de Monin-Obuckov es entonces negativa para inestabilidad atmosférica, positiva cuando la atmósfera es estable y tiende infinito para una estratificación neutral, **Blackadar** (1997).

Finalmente denotando, $\zeta = z/L$, escribimos la expresión (18) como,

$$\zeta = \frac{K_h}{K_m} \phi_m R_i \quad (19)$$

Colocando $K_h = K_m$ en la ecuación (7), involucrando esta ecuación y la relación (8) no es difícil escribir el número de Richardson dado por (13) como,

$$R_i = \frac{z}{\frac{T_v \bar{C}_p \rho u_*^3}{gk E_h}} = \frac{z}{L} = \zeta,$$

Haciendo $z=L$ en el lado derecho de esta expresión, llegamos a la conclusión de que la escala de Monin-Obuckov L , representa la altura en la cual los flujos de cisallamiento y flotación son iguales.

Otro parámetro importante en la teoría de Monin - Obuckov es la temperatura de escala θ_* . Ella se define a través de la siguiente igualdad,

$$\theta_* u_* = - \frac{E_h}{\rho c_p} \tag{20}$$

Operando sobre (16), teniendo en cuenta a (20) y después de ciertas manipulaciones obtenemos:

$$\frac{K_m}{K_h} = - \frac{kz}{u_*} \frac{\partial u}{\partial z} (1 - \alpha R_i)^{1/2} \frac{\chi z}{\theta_*} \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z}$$

Definimos ahora otra función universal,

$$\phi_h = \frac{kz}{\theta_*} \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z} \tag{21}$$

Haciendo uso de las definiciones (14) y (21), escribimos la expresión anterior como,

$$\frac{K_m}{K_h} = \frac{\phi_h}{\phi_m} \tag{22}$$

Las ecuaciones; (15), (19) y (22) relacionan cinco variables; ϕ_m , ϕ_h , K_m/K_h , R_i y ζ . Hallando otra relación adicional se pueden expresar las primeras cuatro variables en función de ζ . Esta relación adicional fue encontrada experimentalmente, **Bussinger et al.** (1971).

De acuerdo con estos resultados; para una atmósfera inestable ($\zeta < 0$), esta relación adicional es:

$$\zeta = R_i \tag{23}$$

Para el caso estable ($\zeta > 0$), la relación;

$$R_i = \frac{\zeta}{1 + \beta \zeta} \tag{24}$$

Además se encontró que los coeficientes α y β son aproximadamente: $\alpha = 16$; $\beta = 5$.

Ahora podemos hallar los perfiles verticales del viento y la temperatura en la capa superficial.

Para encontrar el perfil del viento, suponemos $\phi_m = \phi_m(\zeta)$ y escribimos la relación (14) como;

$$\frac{kz}{u_*} \frac{\partial u}{\partial z} = \phi\left(\frac{z}{L}\right)$$

El resultado de integrar esta ecuación es;

$$u = \frac{u_*}{k} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \Psi_m\left(\frac{z}{L}\right) \right] \tag{25}$$

En donde,

$$\Psi_m = \ln\left[\left(\frac{1+x^2}{2}\right)\left(\frac{1+x}{2}\right)^2\right] - 2 \arctan x + \frac{\pi}{2};$$

$$x = \left(1 - 16 \frac{z}{L}\right)^{1/4} \tag{26}$$

y

$$\Psi_m = -5 \frac{z}{L} \tag{27}$$

para el caso estable.

Para determinar el perfil de la temperatura, se escribe a (21) como,

$$\frac{\chi z}{\theta_*} \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z} = \phi_h(\zeta),$$

Integrando esta ecuación de manera similar a como se hizo con el perfil del viento se obtiene,

$$\theta - \theta_0 = \frac{\theta_*}{k} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \Psi_h\left(\frac{z}{L}\right) \right] \tag{28}$$

En donde, θ_0 es la temperatura potencial medida en la altura z_0 y,

$$\Psi_h = 2 \ln \left[\frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - 16 \frac{z}{L}} \right) \right], \text{ (caso inestable);}$$

$$\Psi_h = -5 \frac{z}{L} \text{ (caso estable).}$$

3. Cálculo de las características de la turbulencia y de la estabilidad atmosférica en Bogotá.

Realizando mediciones de la temperatura en dos niveles, z_1 y z_2 y del viento en uno, se pueden calcular las características de la turbulencia y de la estabilidad atmosférica, mediante la utilización de los resultados de la teoría de Monin – Obuckov o sea de las relaciones (18), (20), (25) y (28).

Estas igualdades expresan una relación implícita entre la temperatura de escala θ_* , la velocidad de fricción u_* , la escala de Monin – Obuckov L y el flujo de calor sensible E_b . Para obtener el valor de estos parámetros se usa un método iterativo de solución de este sistema de ecuaciones.

En el ejercicio que se presenta a continuación se utilizaron mediciones realizadas por el Instituto DAMA en la estación, “Escuela de Ingeniería”, en dos niveles; 2 y 10 m para la temperatura y 10 m para el viento. Este último encontrado por interpolación entre 2, 8 y 20 m. Los cálculos fueron realizados para un valor del nivel de rugosidad igual a 0.1 m. Para el análisis se tomó una secuencia de tres días consecutivos de datos horarios. Por razones de continuidad de los datos, se eligió el período comprendido entre el 15 y el 17 de agosto de 1999. Los resultados fueron los siguientes:

3.1 El flujo de calor sensible

El flujo de calor sensible muestra una clara dependencia de la insolación diurna, (Fig.1).

Los valores máximos se presentan durante el intervalo cuando se registra la temperatura máxima. El flujo de calor sensible tiene valores positivos mínimos durante la salida y puesta del sol y es negativo durante la noche.

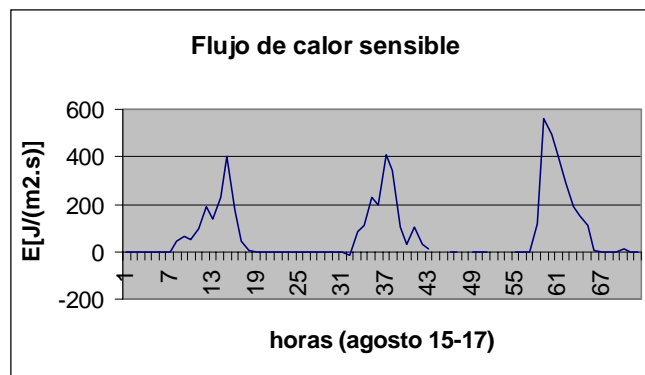


Figura 1. Flujo de calor sensible

3.2 Velocidad de fricción

La velocidad de fricción y el viento a 10 m, tienen comportamientos similares al flujo de calor con valores máximos después del medio día y mínimos durante la noche, (Fig.2).

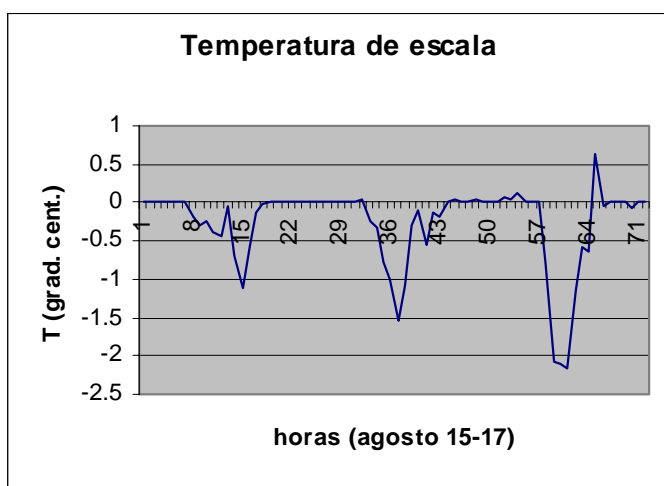
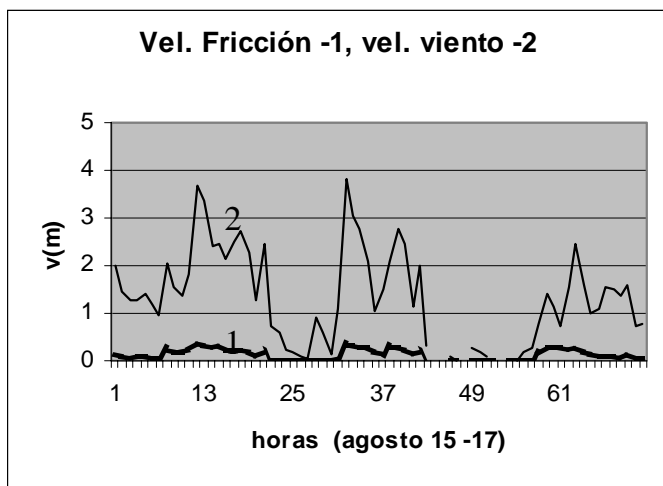


Figura 2. Viento y velocidad de fricción (izquierda) y temperatura de escala (derecha).

3.3 Temperatura de escala

La temperatura de escala, se muestra en la Fig.2 (derecha). En esta figura se observa que la temperatura de escala tiene signo opuesto al flujo tal como aparece en la fórmula (20).

3.4 Escala de Monin Obuckov L.

En la Fig. 4 se muestra la variación de la escala de Monin – Obuckov.

Debido al gran rango de variación de los datos, fue preciso dividir la secuencia en 6 gráficos. Se observa que L es por lo general negativo durante las horas diurnas mostrando inestabilidad atmosférica para esas horas.

Durante las horas nocturnas L por lo general es positivo apuntando a estabilidad atmosférica. Los altos valores de L indican la presencia de condiciones neutrales en la atmósfera.

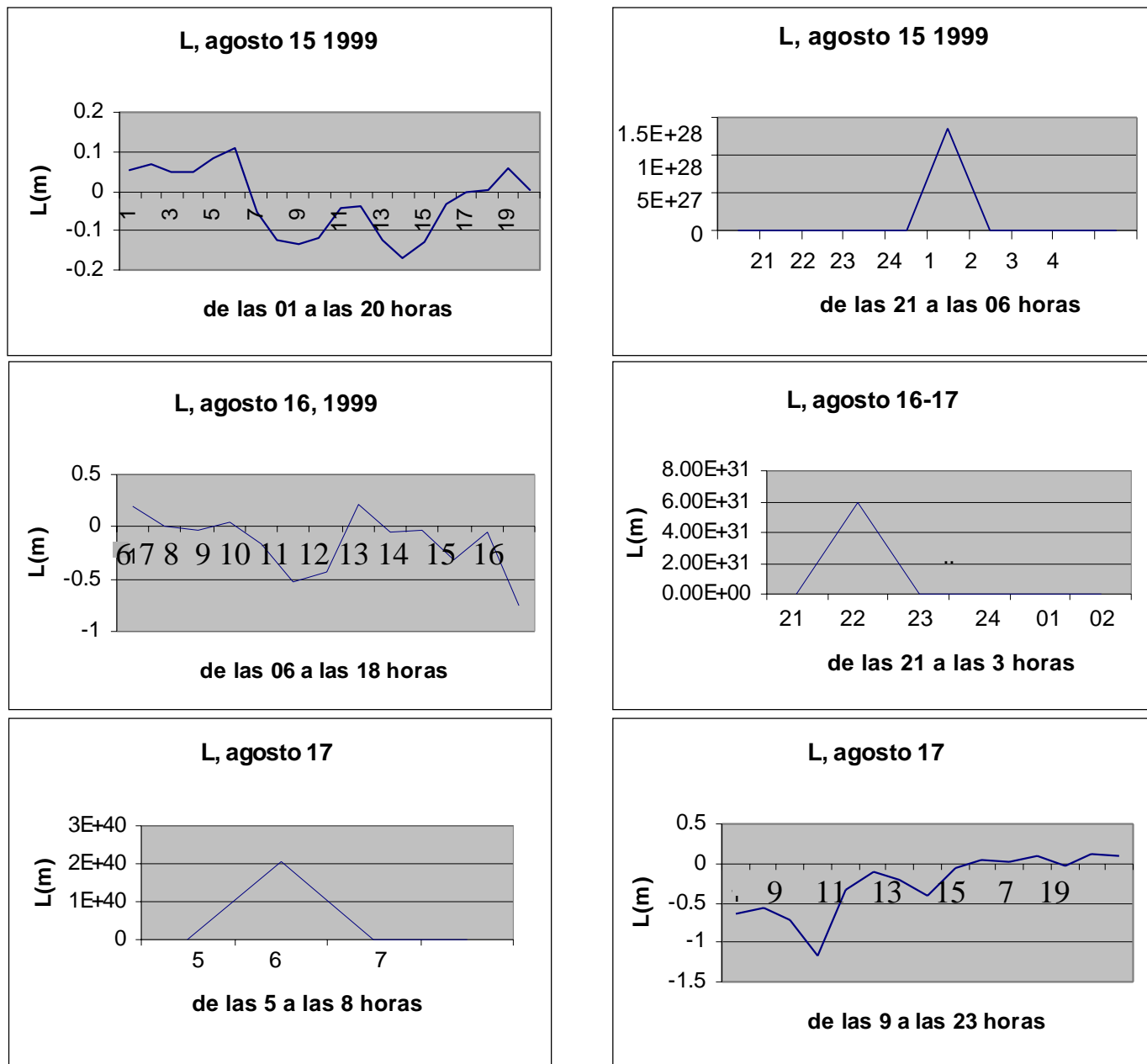


Figura 3. Variación de la escala de Monin – Obuckov durante la secuencia agosto 15 - agosto 17 de 1999.

El análisis conjunto de la Figs. 1-3 muestra que a mayor calentamiento diurno corresponde mayor flujo de calor sensible, mayor inestabilidad en la atmósfera y mayor velocidad de fricción y del viento a 10 m.

La relación directa entre el calentamiento diurno y la velocidad del viento es debida al incremento del flujo horizontal en la medida en que la convección atmosférica progresa. Para confirmar esta hipótesis, en la Fig. 4 se presenta la frecuencia horaria de ocurrencia de tormentas eléctricas en la Sabana de Bogotá, tomado de **Montoya & Eslava (2000)**.

Al comparar esta figura con la Fig. 2 se observa que en ambas; la mayor frecuencia de tormentas eléctricas y la velocidad del viento coinciden con el intervalo de mayor calentamiento diurno (entre la 12 y 15 horas locales).

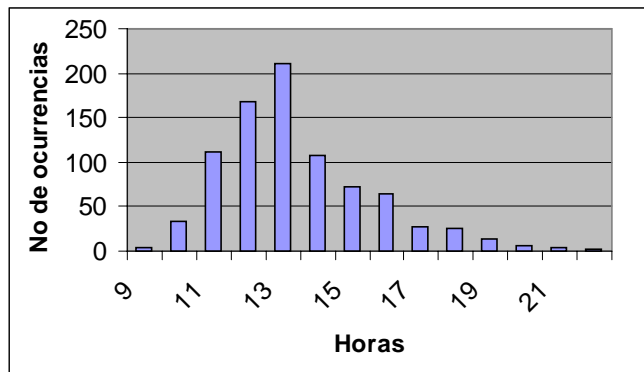


Figura 4. Frecuencia horaria de ocurrencia de tormentas eléctricas en la Sabana de Bogotá. Tomado de **Montoya & Eslava (2000)**.

4. Conclusiones

- Del análisis anterior se desprende que el calentamiento diurno juega un papel muy importante en el comportamiento de la turbulencia en Bogotá. Además, con el desarrollo del calentamiento diurno se intensifica la convección atmosférica, la altura de la capa de mezcla sube y los contaminantes atmosféricos se difunden hacia capas más altas.
- Se detecta una estrecha relación entre el desarrollo de la turbulencia en la capa límite y la formación de la convección profunda en la atmósfera con sus subsecuentes efectos: precipitaciones abundantes, tormentas eléctricas y deposición de granizo en algunos casos. Esto indica la aplicabilidad del análisis de la turbulencia en la capa límite para fines de pronóstico de las tormentas eléctricas y de lluvias convectivas

especialmente en aquellos lugares donde no se posee observaciones de radiosondeo tiempo a corto plazo en la sabana de Bogotá.

- Sin embargo, los resultados anteriormente señalados solo pueden tener un carácter indicativo debido a que la muestra de datos analizada fue muy corta. Estudios futuros con una serie de datos más larga y confiable pueden servir para establecer criterios más afinados sobre el comportamiento de la turbulencia y la dispersión de contaminantes en Bogotá.
- Los resultados de este estudio mostraron la aplicabilidad de la teoría de Monin -Obuckov para estudios de la turbulencia. Por otro lado, estos resultados sirvieron también para validar el algoritmo de cálculo utilizado. Este algoritmo es de fácil inserción dentro de los modelos de dispersión tal como se muestra en el apéndice A.
- Una de las incertidumbres asociadas con la aplicación de la teoría M-O en el trópico, es que como se mostró en la sección 3, esta teoría es cerrada con ayuda de datos experimentales, desafortunadamente no realizados en el trópico. Por tal motivo es aconsejable una repetición de estos experimentos para latitudes bajas.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado dentro del proyecto DIB código 803562. Los autores agradecen a la División de Investigaciones DIB de la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo financiero. Igualmente se agradece al Instituto DAMA por facilitar los datos utilizados en este estudio.

Referencias

- Blackadar, A.K.**, 1997: Turbulence and diffusion in the atmosphere. Springer - Verlag, Berlin Heidelberg New York, 185 p.
- Bussinger, J.A., J.C. Wyngaard, Y. Izumi, & E.F. Bradley**, 1971: Flux - profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.* 28, 181-189.
- Feagle, R. G. & J.A. Bussinger**, 1980: An introduction to Atmospheric physics. Sec. Ed., Acad. Press, Orlando Fla., 431 p.
- Monin, A.S. & A.M. Obuckov**, 1954: basics laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere. *Trans. Gophys. Inst. Acad. Nauk, USSR*, 151, p. 163-187.
- Montoya, G & J.Eslava**, (2000): Análisis de las condiciones que favorecen el desarrollo de la actividad convectiva y de las tormentas eléctricas en la Sabana de Bogotá. *Geofísica. Colombiana.*, 4: 23-30.

Panofsky, H.A & J.A. Dutton (1984): Atmospheric turbulence. John Wiley & Sons, Inc. 397 pp.

Prandtl, L., 1925: Über die ausgebildete turbulenz. Zeitschr. Fur angew. Math. U mech.,5, 136.

Pasquill, F. A. & F.B. Smtih, 1983: Atmospheric diffusion, 3rd Ed., Ellis Horwood, Ltd,437 pp.

Turner, D.B., 1964: A diffusion stability model for an urban area. J. Appl. Met. 3, 83-91.

APÉNDICE A. LA ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA Y LOS MODELOS DE DISPERSIÓN

Uno de los objetivos de un modelo de dispersión es determinar la concentración de los contaminantes atmosféricos en un lugar y momento dados. En este apéndice se muestra como los resultados de la teoría de similaridad de Monin – Obuckov pueden ser introducidos dentro de un modelo de dispersión.

Si se supone que la concentración es dada por una función probabilística de densidad, la cual tiene una forma predeterminada (Gaussiana por ejemplo), el problema se reduce a valorar los parámetros que caracterizan la función de densidad o función de distribución escogida.

Imaginemos por ejemplo, una pluma que se expande en la dirección del viento y consideremos la concentración de materia a lo largo de una línea perpendicular al viento y localizada a una distancia x de la fuente. Si la distribución de materia se supone de tipo Gaussiana entonces la función de densidad en cada punto y de la línea es dada por.

$$G(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (A1)$$

En donde $G(y)$, es la concentración (por unidad de intervalo dy) de contaminantes, y se mide en unidades de σ_y (la desviación estándar). La distribución (A1) es completamente caracterizada por el parámetro σ_y .

Involucrando resultados de la teoría de similaridad (ver por ejemplo **Blackadar** 1997), este parámetro puede ser expresado como;

$$\sigma_y = \frac{\sigma_v}{\bar{u}} x = \frac{k(12 - 0.5h/L)}{\ln(z/z_0) - \psi(z/L)} x \quad (A2)$$

en donde, h es la altura de la capa de mezcla, \bar{u} la velocidad horizontal media. Las demás notaciones que aparecen en esta fórmula son ya conocidas.

Vemos pues que el parámetro σ_y , que caracteriza la distribución (1), depende de las magnitudes h y L . La escala o longitud de Monin – Obuckov L , puede ser determinada a través del algoritmo de calculo que involucra las eucaciones (18), (20), (25) y (28). Una vez obtenidos L , θ_s , u_s , y E_b , la altura de la capa de mezcla h puede ser obtenida utilizando por ejemplo alguna de las fórmulas sugeridas por **Panofsky & Dutton** (1984).

Recibido el 14 de noviembre de 2003

Aceptado para su publicación el 11 de febrero de 2004

ESQUEMAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL EN LA COMUNIDAD BENTÓNICA DE ARRECIFES CORALINOS CONTINENTALES Y OCEÁNICOS DEL CARIBE COLOMBIANO

por

Guillermo Díaz-Pulido^{1,2,*}, Juan Armando Sánchez^{1,3}, Sven Zea^{1,4},
Juan M. Díaz¹ & Jaime Garzón-Ferreira¹

Resumen

Díaz-Pulido, G., J.A. Sánchez, S. Zea, J.M. Díaz, & J. Garzón: Esquemas de distribución espacial en la comunidad bentónica de arrecifes coralinos continentales y oceánicos del Caribe Colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **28** (108): 337-347, 2004. ISSN: 0370-3908.

El Mar Caribe colombiano posee tanto arrecifes coralinos continentales costeros, como oceánicos. A partir de muestreos cuantitativos usando video-transectos de cadena, y análisis multivariados, se determinó que existen esquemas de variación espacial a pequeña (cientos de metros a unos pocos kilómetros) y a gran escala (decenas a cientos de kilómetros) en la composición y abundancia de organismos sésiles. Aunque estos arrecifes conforman una comunidad con las mismas especies de coral y otros organismos, en el sector continental existen exclusivamente las zonas arrecifales de *Siderastrea siderea* y *Agaricia tenuifolia*, y en el oceánico son particulares las terrazas prearrecifales y los arrecifes lagunares y periféricos de barlovento. Estas variaciones reflejan las diferentes historias geológicas, condiciones ambientales predominantes, frecuencia y duración de regímenes de perturbación, y estrategias de vida de especies preponderantes. Al interior de los sectores, la estructura de la comunidad parece estar gobernada por el grado de exposición al oleaje, la profundidad y la geomorfología. Las diferentes escalas en las que la comunidad responde al entorno deben ser tenidas en cuenta al tomar medidas de conservación y manejo en los arrecifes coralinos de Colombia.

¹ Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, INVEMAR, A.A. 1016, Santa Marta, Colombia.

² Universidad del Magdalena, Programa de Biología, A.A. 1122, Santa Marta, Colombia.

³ Department of Systematic Biology and Laboratories of Analytical Biology (NMNH), Smithsonian Institution, P.O. Box 37012, MRC-0163, Washington, D.C. 20013-7012, USA.

⁴ Departamento de Biología y Centro de Estudios en Ciencias del Mar - CECIMAR, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.

* Autor de correspondencia. Correo electrónico: guillermo.diaz@unimag.edu.co

Palabras clave: arrecifes coralinos, distribución espacial, corales, macroalgas, estructura de la comunidad, factores ambientales, Colombia.

Abstract

The Colombian Caribbean Sea presents both coastal continental and oceanic coral reef ecosystems. Based on quantitative sampling using video transects and multivariate analyses we found that there are small (hundreds of meters to few kilometers) and large scale (tens to hundreds of kilometers) spatial distribution patterns in the composition and abundance of sessile organisms. Despite these coral reefs constitute a single community with the same coral species and other organisms, *Siderastrea siderea* y *Agaricia tenuifolia* reef zones occur exclusively in the continental sector, meanwhile, fore-reef terraces and lagoonal and windward peripheral reefs are characteristic of the oceanic sector. These variations may reflect the different geologic histories, prevailing environmental conditions, frequency and intensity of disturbances, and life strategies of dominant species. Within sectors (i.e. continental and oceanic), coral reef community structure seems to be influenced by the intensity of wave exposure, water depth and reef geomorphology. The different spatial scales in which the community responds to the environment should be considered when conservation and management strategies are taken in coral reefs of Colombia.

Key words: coral reefs, spatial distribution, corals, macroalgae, community structure, environmental factors, Colombia.

Introducción

En el Caribe sudoccidental pueden distinguirse áreas geográficas con desarrollo significativo de arrecifes coralinos tanto en el sector costero continental como en el oceánico. Los arrecifes continentales son en su mayoría franjeantes o de plataforma, localizados principalmente en ensenadas y bahías, usualmente formando pequeños archipiélagos cerca de la costa (Wells, 1988). Los arrecifes oceánicos, ubicados a 700 km de distancia de la costa continental (aunque más cerca de Nicaragua), están conformados por complejos arrecifales, arrecifes de barrera, y atolones, y comprenden la mayor extensión de arrecifes coralinos de Colombia (Díaz *et al.*, 2000a). Las características geomorfológicas y descriptivas de los arrecifes continentales (Díaz *et al.*, 1996c; 2000b; López-Victoria & Díaz, 2000; Cendales *et al.*, 2002) y oceánicos (Geister, 1992; Díaz *et al.*, 1996a) del Caribe colombiano han sido bien documentadas. Sin embargo, la mayoría de los estudios cuantitativos del bentos son escasos y restringidos a pequeñas escalas espaciales (e.g., Zea, 1993; Solano, 1994; Díaz *et al.*, 1995; Sánchez, 1995; 1999; Díaz-Pulido & Díaz, 1997; Sánchez *et al.*, 1997; 1998). En el Caribe colombiano no se han explorado patrones geográficos de variación a mayor escala en la estructura del bentos arrecifal, con excepción de tratamientos sobre algunos de sus componentes (Zea, 2001).

Adicionalmente, los siete arrecifes coralinos incluidos en este estudio (Atolones de Banco Serrana, Banco

Roncador, Cayos Albuquerque y Cayos Courtown (=Bolívar); Golfo de Urabá; Isla Fuerte y Bajo Bushnell), quizás por su posición remota con respecto a los centros urbanos, no han sido estudiados cuantitativamente hasta al momento y se desconoce la estructura ecológica de la comunidad bentónica (aunque ver Valderrama & Zea, en prensa). Debido al deterioro que ha ocurrido en los arrecifes coralinos del Caribe en las últimas décadas (e.g., Hughes, 1994), es prioritario explorar los arrecifes coralinos más remotos con el fin de tener un testimonio de su estado actual, así como determinar zonas y hábitats arrecifales de alta diversidad y complejidad biológica para futuras áreas potenciales de conservación (e.g., Friedlander *et al.*, en prensa).

Los esquemas de distribución y abundancia de los organismos sésiles del bentos en un arrecife coralino son el reflejo de procesos históricos, de condiciones ambientales predominantes, requerimientos de sus nichos y la dinámica de sus poblaciones y de complejas relaciones ecológicas entre las especies coexistentes (Brown, 1995). Por tanto, cada especie tendrá una tolerancia de hábitat definida que es el conjunto de posibles 'hábitats' que cumplen con sus requerimientos y pueden ser colonizados (Hutchinson, 1978). Pero la especie estará presente o no en los hábitats potenciales, dependiendo de procesos ecológicos (e.g. reclutamiento, perturbaciones), que son gobernados en buena medida por el azar (Zea, 2001). Los esquemas de distribución y abundancia en el bentos en un arrecife coralino pueden ser estudiados al comparar

las áreas de cobertura del fondo de los diferentes organismos sésiles (=inmóviles), que generalmente son corales escleractíneos y milleporinos, algas de diversos tipos y otros invertebrados, que juntos pueden fácilmente sumar centenares de especies en el caso del mar Caribe. Algunas especies restringen su distribución a un estrecho ámbito ambiental, mientras que otras especies más generalistas se distribuyen a lo largo de varios hábitats, y suelen existir en mayor abundancia en unas condiciones intermedias a lo largo de un continuo ambiental (e.g. octocorales y corales negros [Sánchez *et al* 1997; 1998; Sánchez, 1999], esponjas [Zea, 1993; 2001], algas [Díaz-Pulido & Bula-Meyer, 1997; Díaz-Pulido & Díaz, 1997]).

Definir los esquemas de distribución de tantas especies podría ser una tarea difícil sin la ayuda de métodos numéricos multivariados que reduzcan a proporciones manejables la variación y complejidad de la distribución de especies en un arrecife coralino. El propósito del presente estudio fue determinar los esquemas de distribución espacial de la comunidad bentónica utilizando métodos multivariados, e identificar variaciones recurrentes entre áreas o complejos arrecifales (gran escala, regional) y al interior de ellas (menor escala, local).

La preferencia de hábitat de las especies sésiles se evaluó en diversos tipos de arrecifes coralinos tanto de la región oceánica como costera del mar Caribe de Colombia. Se incluyeron lugares de muy poco acceso al turismo, pocos afluentes con cargas contaminantes y una aparente buena conservación, excluyendo lugares con una larga historia de intervención humana (e.g. Islas del Rosario, Santa Marta, isla de San Andrés, etc.). El sector costero incluyó los arrecifes franjeantes del Urabá chocono, Isla Fuerte y Bajo Bushnell. El sector oceánico comprendió los atolones al norte y sur-sureste del archipiélago de San Andrés y Providencia, en el Caribe sudoccidental. Se quiso también relacionar los esquemas geográficos y de menor escala espacial con variables ambientales predominantes, e inferir sobre el control que éstas ejercen en la distribución de las comunidades. Esta información servirá de base para detectar cambios en el futuro del paisaje arrecifal debidos a impactos naturales y/o antropogénicos.

Materiales y Métodos

Se visitaron tres áreas arrecifales en el sur de la costa continental del Caribe colombiano (Golfo de Urabá, Isla Fuerte y Bajo Bushnell [septiembre-octubre 1995]), y cuatro atolones oceánicos ubicados en el Archipiélago de San Andrés y Providencia en el Caribe sudoccidental (Cayos Courtown [=Bolívar, mayo 1994], Cayos Albuquerque

[mayo-junio 1994], Banco Serrana [mayo-junio 1995], y Banco Roncador [junio 1995]) (Fig. 1). Detalles del clima y oceanografía del sector continental se encuentran en Díaz *et al.* (1996c; 2000b), y Cendales *et al.* (2002), y de la región oceánica en Geister (1992) y Díaz *et al.* (1995; 1996a,b). El área continental estudiada recibe la influencia de descargas de los ríos Sinú y Atrato, trayendo consigo un enturbiamiento estacional del agua, particularmente durante la época de lluvias (mayo-noviembre). Los arrecifes oceánicos, por su parte, tienen muy poca influencia de origen continental, reciben olas con un recorrido (alcançe o "fetch") de más de 2000 km que cubre el ancho entero del mar Caribe, y se ven esporádicamente afectados por el paso de huracanes (e.g. 1988-Joan).

Se establecieron en total 74 estaciones: 16 en los arrecifes continentales (Bushnell 2; Isla Fuerte 2; Urabá 12) y 58 en los oceánicos (Albuquerque 11; Courtown 14; Roncador 17; Serrana 16). Estas fueron distribuidas tratando de cubrir un amplio intervalo de zonas del arrecife coralino. Así, se ubicaron estaciones en bordes externos de terrazas prearrecifales, arrecifes periféricos de barlovento, parches lagunares y taludes, entre otros. En cada estación se evaluó la cobertura de los organismos sésiles mediante tomas en video sobre tres recorridos de cadena de 10 m de longitud (500 eslabones) dispuestos sobre el fondo, paralelos al contorno de profundidad y separados uno del otro por un par de metros (Sánchez, 1995). La cobertura de corales escleractíneos se determinó a nivel de especie, la de algas en lo posible a nivel de género o de grupos morfo-funcionales (v.gr. costrosas, céspedes y fron-



Figura 1. Ubicación de los arrecifes coralinos oceánicos y continentales colombianos en el Caribe sudoccidental. Los triángulos indican los sitios de muestreo.

dosas) y los demás organismos se registraron bajo grupos mayores (v.gr. esponjas, octocorales, otros invertebrados).

Se realizó un análisis de clasificación (Bray-Curtis, UPGMA, transformación arcoseno) y otro de ordenación no paramétrica (Escalamiento Multidimensional no Métrico, MDS) con los datos de porcentaje de cobertura de las especies por estación, para discriminar grupos de estaciones con composición similar y determinar así esquemas espaciales de variación en la estructura de la comunidad (Field *et al.*, 1982). En este análisis se excluyeron especies raras (aquellas que no alcanzaron al menos 4% en alguna estación) y grupos generalistas sin carácter taxonómico, como céspedes algales, algas costrosas, otras algas frondosas, esponjas, octocorales y otros invertebrados. Para identificar las especies características de cada grupo de estaciones (aquellas cuyo mayor porcentaje de cobertura se encuentra en el grupo), se empleó el análisis inverso propuesto por Kaandorp (1986). Con el objeto de relacionar la estructura de la comunidad con variables ambientales, se correlacionaron las coordenadas de las estaciones en el mapa MDS, con la profundidad, grado de exposición al oleaje (determinada visualmente en una escala de 0 [no detectable] a 4 [alta]), densidad de peces herbívoros (estimada empleando el método de censos visuales estacionarios [Mejía & Garzón-Ferreira, 2000; datos almacenados en el Sistema de Información Geográfica de INVEMAR en Santa Marta]) y rugosidad del sustrato (índice de rugosidad: longitud de la cadena / longitud horizontal del transecto). Para ello se utilizó el método de correlaciones no paramétricas de rango de Spearman (Field *et al.*, 1982).

Resultados

El análisis de clasificación mostró que existen esquemas consistentes y recurrentes de variación en la abundancia y composición de especies en la comunidad sésil, a pequeña escala espacial (cientos de metros a unos pocos kilómetros) y a gran escala espacial (regional, decenas a centenares de kilómetros). A gran escala, las estaciones muestreadas en los arrecifes estudiados se segregaron en parte por áreas geográficas, formando grupos exclusivamente continentales (A, B, C y D), exclusivamente oceánicos (E, F y G) y uno mixto (H) (Fig. 2). Dentro de los arrecifes continentales se presentó también una segregación geográfica, agrupándose las estaciones del Golfo de Urabá separadamente de las del Bajo Bushnell e Isla Fuerte. En contraste, los arrecifes oceánicos no se agruparon por atolón, a pesar de estar separados hasta por cientos de kilómetros, exceptuando un grupo de estaciones ubicadas en la cresta del atolón Courtown (grupo G) que

se segregó del resto de las estaciones (Fig. 2). Sin embargo, esto se debió a que esta misma zona no pudo ser replicada en los demás atolones, por extremo oleaje durante las campañas de muestreo, y por ello este no se considera un esquema de variación a escala geográfica. Buena parte de las especies de coral y algunos grupos de algas estuvieron ampliamente distribuidos a lo largo de las áreas estudiadas (Tabla 1). Especies características (que concentran más del 70% de su abundancia relativa en un grupo dado de estaciones) de los arrecifes continentales fueron los corales *Agaricia tenuifolia* y *Siderastrea siderea* y las macroalgas *Amphiroa* spp. (Tabla 1). Las de los arrecifes oceánicos fueron el coral *Montastraea annularis* y las algas pardas *Sargassum* spp., *Turbinaria* spp. y *Lobophora variegata* (para el grupo F), además del hidrocoral *Millepora* spp. y el zoantídeo *Palythoa* spp. (para el grupo G) (Tabla 1).

Las correlaciones de Spearman entre las variables ambientales vs. las coordenadas de las estaciones en el mapa de ordenación indican que la profundidad (coeficiente de correlación de Spearman $R=-0.513$, $p<0.01$), el grado de exposición al oleaje ($R=0.51$, $p<0.01$) y rugosidad ($R=-0.56$, $p<0.01$) son las variables que mejor explican el arreglo de las estaciones en el espacio multidimensional, o sea, influyen en la distribución de los organismos sésiles.

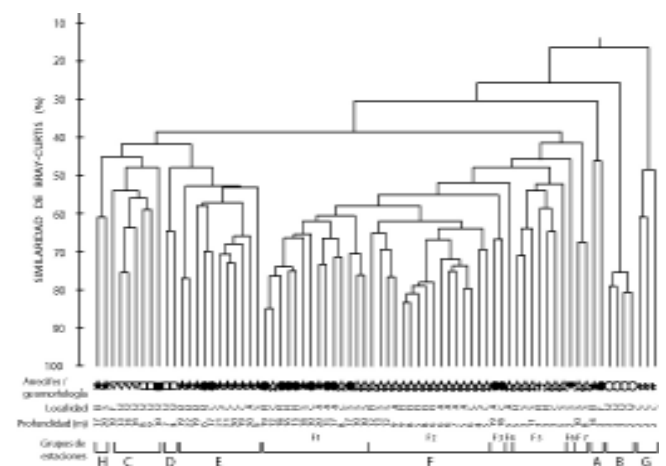


Figura 2. Dendrograma de clasificación de las 74 estaciones muestreadas en los arrecifes oceánicos (A: Cayos Albuquerque. C: Cayos Courtown. R: Banco Roncador. S: Banco Serrana) y continentales (B: Bajo Bushnell. F: Isla Fuerte. U: Golfo de Urabá) indicando los grupos de estaciones (A a H). Estrella negra: terrazas prearrecifales de barlovento. Círculo negro: terrazas prearrecifales de sotavento. Triángulo: corales mixtos. Rectángulo negro: arrecifes de *Agaricia*. Rectángulo: arrecifes de *Diploria*. Estrella: parches lagunares de *Montastraea*. Asterisco: arrecifes periféricos de sotavento. Símbolo de número: arrecifes periféricos de barlovento. Triángulo negro: parches lagunares de *Acropora palmata*. Círculo: arrecifes de *Siderastrea*.

Estas variables indican arreglos de distribución de especies a pequeña escala espacial y al interior de los arrecifes, aunque el mayor grado de exposición al oleaje de las zonas expuestas de los arrecifes oceánicos puede ser responsable en parte de los esquemas encontrados a escala geográfica. De otro lado, las densidades de peces herbívoros a nivel de géneros (*Acanthurus* spp., *Scarus* spp. y *Sparisoma* spp.) presentaron bajos coeficientes de correlación, en general menores a 0.4.

En relación con la combinación entre profundidad y el grado de exposición al oleaje, a pequeña escala espacial, se formaron varios subgrupos de estaciones, tanto al interior de arrecifes continentales como oceánicos (Fig. 2). Entre los arrecifes continentales, en las áreas someras del Golfo de Urabá, que se encuentran expuestos a un fuerte oleaje con periodicidad estacional, se identificaron dos grupos de estaciones. El primero se desarrolla a 2 m de profundidad y estuvo dominado en un 50% por el coral *Siderastrea siderea* (grupo B, Tabla 1). En el segundo grupo (D), que involucra arrecifes someros de *Diploria*, a 5 m de profundidad, las macroalgas *Dictyota* spp. (24%) y *Amphiroa* spp. (10%) y el coral *Diploria strigosa* (12%)

son los elementos dominantes (Tabla 1). Entre los arrecifes continentales profundos, están por un lado los caracterizados por colonias de *Montastraea cavernosa* a 11 m de profundidad (grupo C: corales mixtos), y por otro los dominados por el coral *Agaricia tenuifolia* (grupo A, Tabla 1). Excepto en lo que atañe a diferencias en exposición al oleaje dadas por la profundidad, los arrecifes continentales no presentaron diferencias marcadas en composición y estructura en relación con el grado de exposición al oleaje, pero sí en cuanto a la rugosidad del sustrato, siendo los de *A. tenuifolia* bastante complejos en su estructura espacial y los de *D. strigosa* casi completamente planos (Tabla 2).

Dentro de los oceánicos se agruparon las estaciones de los arrecifes profundos (-17 m) y expuestos al oleaje de todos los atolones, que están constituidos por las terrazas prearrecifales de barlovento (grupo E), dominadas por macroalgas, algas costrosas y cespedes algales y con poca cobertura coralina (20 %, Tabla 1). Las terrazas prearrecifales de sotavento corresponden también a arrecifes profundos (grupo F1: -14 m y grupo F3: -18 m) pero están menos expuestas al oleaje y presentan mayor rugosidad

Tabla 2. Variables ambientales promedio (desviación estándar) por grupos de estaciones identificados en el dendrograma de la Fig. 2. Grupos de estaciones como en la Tabla 1. Grado de exposición al oleaje: escala de 0 (no detectable) a 4 (alta). Índice de rugosidad del sustrato: tiene un valor de 1 cuando el sustrato es completamente plano y aumenta conforme el sustrato se hace más rugoso.

GRUPOS DE ESTACIONES	NÚMERO DE ESTACIONES	VARIABLES						
		Profundidad (m)	Exposición al oleaje	Índice de rugosidad	Densidad de peces herbívoros (no.ind./150m-2)			
					<i>Acanthurus</i>	<i>Scarus</i>	<i>Sparisoma</i>	
Continentales								
A	n=2	8.0 (7.8)	1.0 (0)	1.370 (0.163)	2.0 (2.1)	6.8 (6.7)	7.8 (2.5)	
B	n=4	2.3 (0.6)	1.8 (1.0)	1.148 (0.078)	15.4 (21.4)	6.3 (3.0)	3.5 (1.4)	
C	n=7	11.3 (3.0)	1.4 (0.5)	1.192 (0.042)	6.9 (9.2)	3.5 (2.1)	3.7 (1.5)	
D	n=2	5 (2.1)	1.5 (0.7)	1.099 (0.023)	3 (0.7)	4.3 (5.3)	3.5 (2.1)	
Oceánicos								
E	n=11	17.3 (5.2)	3.1 (0.8)	1.198 (0.068)	7.9 (9.1)	4.5 (2.5)	7.2 (3.2)	
F1	n=15	14.4 (3.8)	1.9 (1.0)	1.334 (0.108)	7.6 (6.7)	11.5 (18.9)	9 (2.5)	
F2	n=16	7.5 (2.7)	1 (0.8)	1.411 (0.105)	8.3 (14.3)	10.3 (8.3)	12.8 (5.9)	
F3	n=2	18.3 (0.4)	2 (1.4)	1.314 (0.037)	3 (2.8)	4.8 (2.5)	4.3 (1.8)	
F4	n=1	4.8	1	1.382	10.5	6	10	
F5	n=7	4.5 (2.9)	1.1 (0.7)	1.385 (0.141)	4.3 (2.6)	7.3 (3.4)	10.4 (5.3)	
F6	n=1	1.5	2	1.299	18	3.5	6.5	
F7	n=2	8.9 (1.6)	1.0 (0)	1.475 (0.036)	5.3 (1.8)	10.8 (3.9)	15.5 (0.7)	
G	n=3	1.7 (0.2)	4.0 (0)	1.207 (0.072)	42.2 (52.4)	3.3 (2.3)	7.2 (3.7)	
Mixto	H	n=2	18.6 (2.3)	2.5 (0.7)	1.251 (0.037)	2.8 (1.1)	5.5 (3.5)	7.5 (0)

que las de barlovento (Tabla 2); la composición del bentos fue similar a las de barlovento aunque presentan menor cobertura del coral *Diploria strigosa* y de esponjas y mayor cobertura del alga *Lobophora variegata* (Tabla 1). De otro lado, las terrazas de sotavento y los parches lagunares profundos y calmados de *Montastraea* spp. (-8 m, grupo F2) se segregaron por límites no muy bien definidos, ya que carecen de especies características y sólo cuando se combinan los grupos F1, F2 y F3, *Lobophora variegata* resulta ser la especie característica. Las terrazas prearrecifales de sotavento parecen ser una comunidad intermedia en composición entre las terrazas prearrecifales de barlovento y parches lagunares profundos de *Montastraea*.

En los arrecifes oceánicos someros (<5 m de profundidad) se distinguieron grupos de estaciones conformados por parches lagunares de *Montastraea* spp. protegidos del oleaje predominante (grupos F4 y F5), de lagunares de *Acropora palmata* más expuestos al oleaje (grupo F6) y de muy expuestos al oleaje como los periféricos de barlovento (grupo G). Los parches lagunares protegidos de *Montastraea* presentaron la mayor cobertura coralina (46%), especialmente de *M. faveolata* y *M. annularis*, (37%), y una menor cobertura de algas frondosas (Tabla 1). Los arrecifes periféricos de barlovento, que se segregaron claramente en el dendrograma (Fig. 2), reciben un fuerte impacto del oleaje (Tabla 2) y están dominados por organismos incrustantes como *Millepora* spp., *Palythoa* spp. y algas coralíneas costosas. La cobertura de algas frondosas en este grupo es una de las más bajas registradas en este estudio, tan sólo 12% (Tabla 1).

Tanto en los arrecifes continentales como oceánicos las algas fueron el componente más abundante del bentos, con más de 50% de la dominancia del sustrato duro (Fig. 3). Las algas frondosas y los céspedes algales presentaron mayor cobertura en los arrecifes oceánicos que en los continentales, mientras que los corales presentaron mayor cobertura en las áreas continentales (aprox. 45%) con respecto a las oceánicas (30%) (Fig. 3). Las macroalgas más abundantes de los arrecifes continentales fueron *Dictyota* spp. (9%), *Amphiroa* spp. (9%) y *Halimeda* spp. (6%), mientras que las de los oceánicos fueron *Lobophora* spp. (12%), *Dictyota* spp. (9%) y *Halimeda* spp. (7%). Las especies de coral con el mayor porcentaje de cobertura en los arrecifes continentales fueron *Siderastrea siderea* (14%), *Montastraea cavernosa* (4%) y *Agaricia agaricites* (4%), mientras que en los oceánicas fueron *M. annularis* (8%), *M. faveolata* (5%) y *M. franksi* (4%). El número de especies de corales registrados en los perfiles fue el mismo en ambos sectores geográficos (30 especies).

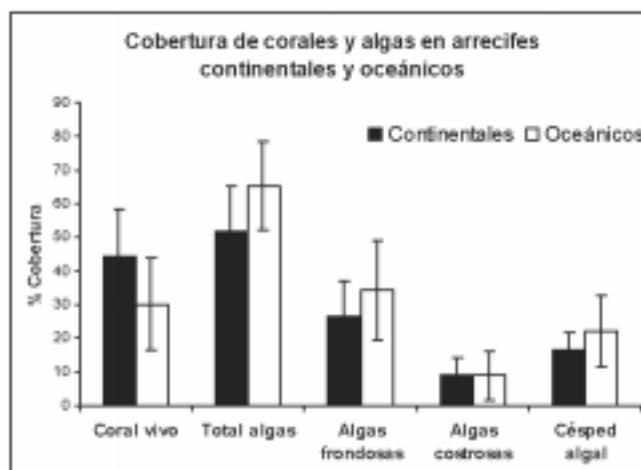


Figura 3. Porcentajes de cobertura coralina y grupos funcionales de algas relativos al sustrato duro (excluyendo arena) en arrecifes continentales y oceánicos. Valores son promedios (continentales: n=16; oceánicos: n=58) con barras de desviación estándar.

Discusión

El bentos de los arrecifes coralinos del Caribe colombiano, aunque se puede decir que comprende una comunidad con las mismas especies de coral y/o grupos funcionales de algas, presenta variaciones estructurales consistentes entre las áreas continentales/costeras y las oceánicas. Los arrecifes continentales albergan unidades de paisaje o hábitats o zonas arrecifales con composición de especies particulares, como por ejemplo los arrecifes de *Siderastrea siderea* y *Agaricia tenuifolia* en el Golfo de Urabá, que no están presentes en áreas oceánicas. Los arrecifes oceánicos contienen también unidades propias con composiciones particulares, como las de las terrazas prearrecifales, laguna y arrecifes periféricos de barlovento. Aunque la naturaleza descriptiva de este estudio no nos permite inferir las causas directas de dichas diferencias, éstas se pueden interpretar debido a diferentes historias geológicas, oceanografía del área, frecuencia y duración de regímenes de perturbación y estrés, y estrategias de vida de las especies en la comunidad.

Diferencias de origen geológico se manifiestan en particularidades geomorfológicas de cada área, creando por una parte ambientes muy expuestos al oleaje en los oceánicos y ambientes generalmente más protegidos en la costa colombiana. La geomorfología de los arrecifes oceánicos presenta cierta monotonía en cuanto a hábitats definidos para el desarrollo de comunidades bentónicas, que se repite a lo largo de todos los atolones (Díaz *et al.*, 1996a; 1996b). El arrecife periférico de barlovento, siem-

pre bordea las zonas de rompiente. La laguna con arrecifes de parche, tiene en el fondo arenas finas y diversos tipos de arrecifes de parche dominados por *Montastraea* spp. (ver revisión en **Díaz et al.**, 1997). Las barras arrecifales de sotavento y terrazas someras adyacentes, son una irregular reunión de terrazas de fondos duros y barras arenosas coronadas con arrecifes que se levantan casi hasta la superficie. La terraza de sotavento y su talud externo, son la continuación paulatina y de inclinación suave hacia sotavento de los fondos duros de la unidad anterior; su margen externo posee bastante desarrollo coralino y presenta un talud externo de pendiente muy fuerte y desde poca profundidad (12-15 m). A diferencia de estos ambientes, las áreas continentales están marcadas por eventos geológicos específicos de la plataforma continental como diapirismo (e.g. **Sánchez**, 1995) o por las caprichosas formas de bahías y otros procesos sedimentarios (ver revisión en **Vernette**, 1986; 1989). Esto hace que los arrecifes de la costa colombiana se salgan de la zonificación estándar comúnmente adjudicada al mar Caribe (e.g., Jamaica: **Goureau**, 1959; **Kinzie**, 1973; ver discusión en **Cendales et al.**, 2002).

La cantidad de seston y transparencia del agua son también dramáticamente diferentes entre las áreas oceánicas y continentales limitando y/o beneficiando ciertas especies. Aguas de baja transparencia, comunes en la costa continental colombiana, cambian la distribución vertical de las especies coralinas y permiten a especies de aguas generalmente profundas colonizar espacios relativamente someros, como ocurre en los arrecifes de *Siderastraea siderea* en el Golfo de Urabá. Se ha documentado que incluso organismos considerados de profundidad como corales negros y octocorales azooxantelados, pueden abundar en ambientes someros de los bancos de la plataforma continental (**Sánchez**, 1999). Estos organismos están también presentes en los arrecifes coralinos oceánicos del Caribe colombiano pero en los ambientes más profundos y taludes del arrecife (**Sánchez et al.**, 1998). Aunque el Caribe sur, incluida la costa colombiana, ha sido considerado como oligotrófico, se presenta la influencia constante de cerca de un 20% de la descarga mundial anual de aguas ribereñas (ríos Amazonas, Orinoco, Magdalena y Atrato) así como surgencias localizadas de aguas frías subsuperficiales debidas a la acción de los vientos (**Müller-Karger et al.**, 1989), cuyos efectos son más notables en las áreas costeras. Esta descarga y las surgencias generan una mayor oferta de alimento suspendido, la que hace que, por ejemplo, las esponjas tiendan a tener una mayor densidad y cobertura en arrecifes continentales que en arrecifes oceánicos (**Zea**, 2001; **Valderrama & Zea**, en prensa).

Estrategias de vida como el tipo de dispersión larval podrían tener también un efecto notorio en la distribución de las especies en conjunto con la geomorfología e hidrodinámica de los arrecifes de coral. Por ejemplo, especies de coral de crecimiento lento que liberan millones de larvas masivamente y de duración media como *Montastraea* spp. (v.gr. **Sánchez, et al.**, 1999), pueden mantener poblaciones homogéneas en los cuatro atolones oceánicos debido a una disponibilidad constante de larvas. Especies de crecimiento clonal rápido, vivíparas y con larvas de dispersión corta, como *Agaricia tenuifolia*, dominan arrecifes franjeantes conectados a lo largo de la costa. Adicionalmente, se ha sugerido que ciertas áreas del mar Caribe, particularmente la porción occidental de la costa colombiana, exhiben una exportación e importación cíclica de larvas de vida libre debido a la hidrodinámica de las masas superficiales en el Caribe sur (**Roberts**, 1997).

Diferentes regímenes de perturbación parecen afectar ambos sectores. Por ejemplo, los arrecifes oceánicos se ven influidos por el paso de huracanes, como el "Joan" que afectó en 1988 las comunidades de corales del archipiélago de San Andrés y Providencia (**Díaz et al.**, 1996b). Por otra parte, los arrecifes continentales no sufren el impacto directo de huracanes, aunque sí pueden ser afectados por las descargas generadas por las fuertes lluvias asociadas (e.g. Joan), o ser alcanzados por fuertes marejadas (e.g. Lenny, nov. 1999). De hecho, estos arrecifes están sometidos de forma más continua a gradientes de estrés dados por la influencia de ríos y aguas dulces de escorrentía, que producen descensos en la salinidad y enturbiamiento de las aguas, y por tanto posiblemente mayor sedimentación sobre el bentos arrecifal.

La profundidad y el grado de exposición al oleaje parecen ser los principales factores que controlan las variaciones en los esquemas espaciales de la comunidad arrecifal a pequeña escala (dentro de las áreas o complejos arrecifales). En general, las zonas arrecifales someras (< 5 m) tuvieron composiciones y abundancias de organismos diferentes a las encontradas en las zonas profundas (> 8 m), y las altamente expuestas al oleaje (i.e. arrecifes periféricos, grupo G) fueron diferentes de las ubicadas en zonas calmadas (arrecifes lagunares someros de *Montastraea*, grupo F5). **Geister** (1977) y **Graus & Macintyre** (1989) señalan que la profundidad, oleaje, luz y geomorfología son los principales factores que controlan los esquemas de zonación al interior de los arrecifes coralinos del Caribe y este modelo parece repetirse igualmente a lo largo de las áreas estudiadas. Los esquemas de zonación de los arrecifes, particularmente de los

oceánicos, con respecto de la profundidad y del oleaje se ajustan bien al encontrado en otras áreas caribeñas (e.g., Jamaica: **Goureau**, 1959). Aunque, como se mencionó anteriormente, existen también arrecifes costeros que parecen ser bastante particulares en cuanto a su estructura ecológica.

Las bajas correlaciones entre las densidades de peces herbívoros con la ordenación MDS sugieren que estos herbívoros juegan un papel secundario en la organización de la estructura de comunidad arrecifal. No obstante, al analizar por separado los esquemas de distribución espacial de las algas en los arrecifes lagunares de los atolones estudiados (**Díaz-Pulido & Díaz**, 1997) se encuentra que la densidad de peces cirujanos (*Acanthurus*) se relaciona con la zonación algal. Algunas de las zonas arrecifales presentes en los complejos arrecifales oceánicos (v.gr., las dominadas por *Acropora palmata* [grupo F6] y *Millepora-Palythoa*-algas coralíneas costrosas [grupo G]), se encuentran también en arrecifes continentales de otras localidades caribeñas (v.gr. islas del Rosario: **Sánchez**, 1995), por lo que es posible que esta relación también persista para las áreas continentales.

La alta cobertura algal registrada en las áreas estudiadas parece ser una situación generalizada en los arrecifes del Caribe (**Hughes**, 1994; **Shulman & Robertson**, 1996). **Hughes** (1994) encontró en los arrecifes coralinos de Jamaica una cobertura algal de más de 90% a 7 m de profundidad y tan solo un 3% de cobertura coralina. Se señala que esta alta abundancia algal es el resultado de una reducción importante en los niveles de herbivoría debidos a la mortandad masiva del erizo negro *Diadema antillarum* y a la sobrepesca de peces herbívoros, como loros (Scaridae) y cirujanos (Acanthuridae) (**Hughes**, 1994; **Shulman & Robertson**, 1996). En las áreas estudiadas se observaron muy pocos erizos *Diadema* (inclusive durante buceos nocturnos) y se ha indicado que las poblaciones del caracol de pala herbívoro *Strombus gigas* se encuentran sobreexplotadas (**Mora**, 1994). La mortandad coralina ocasionada por huracanes, enfermedades y blanqueamiento (**Shulman & Robertson**, 1996; **Zea et al.**, 1998) genera nuevo espacio disponible para la colonización algal (**Díaz-Pulido & McCook**, 2002) que, en conjunto con bajos niveles de herbivoría, parecen explicar su alta cobertura. La mayor cobertura algal y menor cobertura coralina en las áreas oceánicas, con respecto de las continentales, contrasta con lo registrado en la Gran Barrera de Coral de Australia, donde las macroalgas alcanzan los mayores valores de abundancia en los arrecifes costeros y son escasas en los arrecifes alejados de la costa (**McCook et al.**, 1997). Parecería razonable pensar que por la cerca-

nía a la costa, los arrecifes continentales caribeños reciben más aportes de nutrientes que las áreas oceánicas remotas. El aporte de nutrientes se ha sugerido como una de las causas del incremento en biomasa macroalgal en los arrecifes coralinos (**Lapointe**, 1997; ver discusión en **Díaz-Pulido & McCook**, 2003). Sin embargo, la alta abundancia algal en los arrecifes oceánicos no parece ser explicada por aportes de nutrientes debido a su ubicación distante de la costa, ni tampoco por diferencias en densidades de peces herbívoros, ya que estos últimos fueron en general más abundantes en los arrecifes oceánicos que en los continentales (Tabla 2). La marcada estacionalidad de las macroalgas arrecifales es también un factor que debe tenerse en cuenta (**Díaz-Pulido & Garzón-Ferreira**, 2002), sin embargo, la razón de la mayor abundancia de macroalgas en los arrecifes continentales no es clara y requiere de futuras investigaciones.

En síntesis, la variación en la estructura de la comunidad al interior de los arrecifes coralinos del Caribe sur parece estar controlada por la profundidad, exposición al oleaje y geomorfología. Pero a gran escala geográfica (complejos oceánicos vs. continentales), es influida por diferencias en la historia geológica, las condiciones ambientales predominantes y la geomorfología resultantes, que a su vez influyen en la presencia y abundancia de especies con historias de vida particulares. Tales diferencias deben ser tenidas en cuenta al tomar medidas de conservación y manejo en los arrecifes coralinos de Colombia, particularmente en los tipos de hábitats mas diversos y biológicamente complejos, los cuales difieren entre los sectores continental y oceánico.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y Tecnología (Colciencias, Proyecto 2105-09-023-93). A César García por su ayuda en la lectura de video-perfiles y a Luz S. Mejía (INVEMAR) por suministrar gentilmente los datos de peces herbívoros y por su colaboración en el campo. Estamos muy agradecidos con Luz S. Mejía y la tripulación del B/I ANCON por su enorme ayuda en los muestreos de campo. Contribución 842 del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras –INVEMAR–, Colombia. El trabajo de S. Zea es la contribución 237 del Centro de Estudios en Ciencias del Mar –CECIMAR, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.

Bibliografía

Brown, J.H. 1995. Macroecology. The University of Chicago Press, Chicago and London.

- Cendales, M.H., S. Zea & J.M. Díaz.** 2002. Geomorfología y unidades ecológicas del complejo arrecifal de Islas del Rosario e Isla Barú (Mar Caribe, Colombia). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, **26**(101): 497-510.
- Díaz, J.M., J. Garzón-Ferreira & S. Zea.** 1995. Los arrecifes coralinos de la Isla de San Andrés, Colombia: estado actual y perspectivas para su conservación. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Colección Jorge Álvarez Lleras, **7**: 1-150.
- _____, **G. Díaz-Pulido, J. Garzón-Ferreira, J. Geister, J.A. Sánchez & S. Zea.** 1996a. Atlas de los arrecifes coralinos del Caribe colombiano: I. Complejos arrecifales oceánicos. Invemar, Serie de Publicaciones Especiales, **2**: 1-83.
- Díaz, J.M., J.A. Sánchez, S. Zea & J. Garzón-Ferreira.** 1996b. Morphology and marine habitats of two southwestern Caribbean atolls. *Atoll Res. Bull.* **435**: 1-35
- _____, **G. Díaz-Pulido.** 1996c. Geomorfología y formaciones arrecifales recientes de Isla Fuerte y Bajo Bushnell, plataforma continental del Caribe colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, **25**: 87-105.
- _____, **J. Geister.** 1997. Development of Lagoonal reefs in oceanic complexes of the Southwestern Caribbean: geomorphology, structure and distribution. *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.*, **1**: 779-784.
- Díaz, J.M., L.M. Barrios, M.H. Cendales, J. Garzón-Ferreira, J. Geister, M. López-Victoria, G.H. Ospina, F. Parra-Velandia, J. Pinzón, B. Vargas-Angel, F.A. Zapata & S. Zea.** 2000a. Areas Coralinas de Colombia. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales **5**, Santa Marta, 176 páginas.
- Díaz, J.M., G. Díaz-Pulido & J.A. Sánchez.** 2000b. Distribution and structure of the southernmost Caribbean coral reefs: Golfo de Urabá, Colombia. *Scientia Marina*, **64**(3): 327-336.
- Díaz-Pulido, G. & G. Bula-Meyer.** 1997. Marine algae from oceanic atolls in the Southwestern Caribbean (Albuquerque Cays, Courtown Cays, Serrana Bank, and Roncador Bank). *Atoll Res. Bull.*, **448**: 1-18.
- _____, **J.M. Díaz.** 1997. Algal assemblages in lagoonal reefs of Caribbean oceanic atolls. *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.*, **1**: 827-832.
- _____, **J. Garzón-Ferreira.** 2002. Seasonality in algal assemblages on upwelling-influenced coral reefs in the Colombian Caribbean. *Bot. Mar.*, **45**: 284-292.
- _____, **L.J. McCook.** 2002. The fate of bleached corals: patterns and dynamics of algal recruitment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **232**: 115-128.
- _____, **L.J. McCook.** 2003. Relative roles of herbivory and nutrients in the recruitment of coral reef seaweeds. *Ecology*, **84**(8): 2026-2033.
- Field, J.G., K.R. Clarke & R.M. Warwick.** 1982. A practical strategy for analysing multispecies distribution patterns. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **8**: 37-52.
- Friedlander A., J. Sladek-Nowlis, J.A. Sánchez, R. Appeldoorn, P. Usseglio, C. McCormick, S. Bejarano & A. Mitchell-Chui.** 2003. Designing effective marine protected areas in Seaflower biosphere reserve, Colombia, based on biological and sociological information. *Cons. Biol.*, **17**: 1769-1784.
- Geister, J.** 1977. The influence of wave exposure on the ecological zonation of Caribbean coral reefs. *Proc. 3rd Int. Coral Reef Symp.*, **1**: 23-29.
- _____. 1992. Modern reef development and Cenozoic evolution of an oceanic island/reef complex: Isla de Providencia (Western Caribbean Sea). *Facies*, **27**: 1-70.
- Goureau, T.F.** 1959. The ecology of Jamaican coral reef. I. Species composition and zonation. *Ecology*, **40**: 67-90.
- Graus, R.R. & I.G. Macintyre.** 1989. The zonation patterns of Caribbean coral reefs as controlled by wave and light energy input, bathymetric setting and reef morphology: computer simulation experiments. *Coral Reefs*, **8**: 9-18.
- Hughes, T.P.** 1994. Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. *Science*, **265**: 1547-1551.
- Hutchinson, G.E.** 1978. An introduction to population biology. Yale University Press, New Haven and London.
- Kaandorp, J.A.** 1986. Rocky substrate communities of the infralittoral fringe of the Boulonnais coast, NW France: a quantitative survey. *Mar. Biol.*, **92**: 255-265.
- Kinzie, R. A.** 1973. The zonation of West Indian gorgonians. *Bull. Mar. Sci.*, **23**: 93-155.
- Lapointe, B.E.** 1997. Nutrient thresholds for bottom-up control of macroalgal blooms on coral reefs in Jamaica and southeast Florida. *Limnol. Oceanogr.*, **42**: 1119-1131.
- López-Victoria, M. & J.M. Díaz.** 2000. Morfología y estructura de las formaciones coralinas del archipiélago de San Bernardo, Caribe colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, **24**(91): 219-230.
- McCook, L.J., I.R. Price & D.W. Klumpp.** 1997. Macroalgae on the GBR: Causes or consequences, indicators or models of reef degradation? *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.*, **2**: 1851-1856.
- Mejía, L.S. & J. Garzón-Ferreira.** 2000. Estructura de comunidades de peces arrecifales en cuatro atolones del Archipiélago de San Andrés y Providencia (Caribe sur occidental). *Rev. Biol. Trop.*, **48**(4): 883-896.
- Mora, O.** 1994. Análisis de la pesquería del Caracol Pala (*Strombus gigas* L.) en Colombia. 137-144 pp. En: R.S. Appeldoorn y B. Rodríguez (eds.). Queen Conch Biology, fisheries and mariculture. Fundación Científica Los Roques, Caracas, Venezuela.
- Müller-Karger F. E., C. R. McClain, T. R. Fisher, W. E. Esaias & R. Varela.** 1989. Pigment distribution in the Caribbean Sea: observations from space. *Prog. Oceanogr.*, **23**: 23-64.
- Roberts, C. M.** 1997. Connectivity and management of Caribbean coral reefs. *Science*, **278**: 1454-1457.
- Sánchez, J.A.** 1995. Benthic communities and geomorphology of the Tesoro island coral reef, Colombian Caribbean. *An. Inst. Invest. Mar. Punta Betín*, **24**: 55-77.
- _____. 1999. Black coral-octocoral distribution patterns on a deep-water reef, Imelda bank, Caribbean Sea, Colombia. *Bull. Mar. Sci.*, **65**(1): 215-225.

- _____, **S. Zea & J.M. Díaz**. 1997. Gorgonian communities of two contrasting environments from oceanic Caribbean atolls. *Bull. Mar. Sci.*, **61** (2): 61-72.
- _____, **J.M. Díaz & S. Zea**. 1998. Octocoral and black coral distribution patterns on the barrier reef-complex of Providencia island, Southwestern Caribbean. *Carib. J. Sci.*, **34** (3-4): 250-264.
- _____, **E.M. Alvarado, M.F. Gil, O. Arenas, H. Charry & R.P. Garcia**. 1999. Synchronous mass spawning of *Montastraea annularis* (Ellis & Solander) and *M. faveolata* (Ellis & Solander) (Faviidae: Scleractinia) at Rosario islands, Caribbean coast of Colombia. *Bull. Mar. Sci.*, **65** (3): 873-879.
- Shulman, M.J. & D.R. Robertson**. 1996. Changes in the coral reefs of San Blas, Caribbean Panama: 1983 to 1990. *Coral Reefs*, **15**: 231-236.
- Solano, O.D.** 1994. Corales, formaciones arrecifales y blanqueamiento de 1987 en Bahía Portete (Guajira, Colombia). *An. Inst. Invest. Mar. Punta Betín*, **23**: 149-163.
- Valderrama, D.F. & S. Zea**. 2003. Esquemas de distribución de esponjas arrecifales (Porifera) del noroccidente del golfo de Urabá, Caribe sur, Colombia. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, **32**: 37-56.
- Vernette, G.** 1986. Le plate-forme continentale Caraïbe du Colombie. Importance du diapirisme argileux sur le morphologie, et la sedimentation. Thèse doctorale. Mem. del Inst. Geol. Bassin d'Aquitaine, **20**: 1-387.
- _____. 1989. Impact du diapirisme argileux sur les recifs de la plate-forme colombienne des Caraïbes. *Bull. Inst. Geol. Bassin. d'Aquitaine, Bordeaux*, **45**: 97-105.
- Wells, S.** 1988. *Coral Reefs of the World. Volume 1: Atlantic and eastern Pacific. UNEP Regional Seas Directories and Bibliographies.* IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, U.K./UNEP, Nairobi, Kenya.
- Zea, S.** 1993. Cover of sponges and other sessile organisms in rocky and coral reef habitats of Santa Marta, Colombian Caribbean Sea. *Carib. J. Sci.*, **29**: 75-88.
- _____. 2001. Patterns of sponge (Porifera, Demospongiae) distribution in remote, oceanic reef complexes of the southwestern Caribbean. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, **25** (97): 579-592.
- _____, **J. Geister, J. Garzón-Ferreira & J.M. Díaz**. 1998. Biotic changes in the reef complex of San Andrés Island (Southwestern Caribbean Sea, Colombia) occurring over nearly three decades. *Atoll Res. Bull.*, 456: 1-30.

Recibido el 4 de abril de 2003.

Aceptado para su publicación el 22 de octubre de 2003.

CALORTROPÍA, AUTOORGANIZACIÓN Y EVOLUCIÓN

por

Daniel Barragán¹ & Alfredo Gómez²

Resumen

Barragán, Daniel & Gómez, Alfredo: Calortropía, autoorganización y evolución. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **28** (108): 349–361, 2004. ISSN 0370-3908.

Para el estudio de los niveles de disipación de materia y energía (*producción global de calortropía*) que acompañan la aparición de estructuras espacio-temporales estacionarias (*autoorganización*) hemos desarrollado una teoría termodinámica de los procesos irreversibles. Las estructuras emergen de un arreglo bidimensional de reactores químicos acoplados, que se encuentran en un estado estacionario oscilatorio homogéneo, después de haber propagado un estímulo químico. Estas estructuras permanecen en el tiempo y en el espacio a expensas de una continua disipación de materia y energía (*estructuras disipativas*). En el marco de la teoría termodinámica de los procesos irreversibles se investigan los niveles de disipación que acompañan la aparición de las estructuras a medida que el sistema evoluciona en función de parámetros dinámicos (*bifurcación*), de acople (*difusión*) y de la magnitud de la perturbación. La teoría termodinámica, los modelos químicos y los resultados obtenidos son generales, y es así como encuentran aplicación directa en cualquier área de las ciencias naturales; destacamos la estrecha conexión con el comportamiento observado en algunos sistemas biológicos.

Palabras clave: Calortropía, termodinámica de procesos irreversibles, evolución.

Abstract

IA irreversible thermodynamics theory is proposed to study the global calortropy production levels accompanying with stationary patterns. The phenomena of stationary

¹Laboratorio de Calorimetría y Dinámica Química No-Lineal. Departamento de Química, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. dabarraganra@unal.edu.co

²Profesor Honorario de la Universidad Nacional de Colombia.

patterns is reached after a wave propagation through a two-dimensional array of coupled cells in an oscillatory homogeneous state, and they are an example of dissipative structures in terms of a continuous energy-matter dissipation by the system. In this paper we report on a numerical study of the dissipation levels accompanying the patterns in terms of a control parameter, namely: bifurcation parameter, rate of mass exchange and size of a external perturbation.

Key words: Calortropy, Entropy, Irreversible thermodynamics, Evolution.

1. Introducción

La termodinámica de los procesos irreversibles es una teoría de los procesos macroscópicos de la materia que no hace referencia a constitución molecular alguna. Dado que los procesos son irreversibles ellos suceden a una velocidad finita de manera homogénea o no homogénea en una determinada región del espacio. Con este enfoque los estados de la materia se describen utilizando un relativo pequeño número de variables de estado que caracterizan la materia como un medio continuo. Tales variables de estado pueden evolucionar espacio-temporalmente, sujetas a determinadas condiciones iniciales y de frontera. La actual filosofía natural de la evolución de los procesos macroscópicos acepta que tales procesos evolutivos deben estar completamente gobernados por las leyes de la termodinámica. Es así como, es objetivo de la termodinámica de los procesos macroscópicos irreversibles formular una teoría consistente con las leyes de la termodinámica que nos permita explorar y entender tales procesos evolutivos.

Clausius [12] dedujo el concepto de entropía a partir de una representación matemática de la segunda ley relacionada con procesos reversibles entre estados de equilibrio, mientras que para estados de no-equilibrio la termodinámica clásica postula una desigualdad en conexión con el concepto de entropía. Clausius descubrió que hay dos tipos de calor involucrados en los procesos térmicos: el *calor compensado* y el *calor no compensado*. El *calor compensado* es el calor intercambiado entre el sistema y los alrededores y el *calor no compensado* es un calor inherente a la ocurrencia de procesos irreversibles. Así Clausius define un *proceso termodinámico reversible* como aquel en el que sólo existe un tipo de calor, y es el que el sistema intercambia con los alrededores.

En la termodinámica generalizada [4] se demuestra que si los procesos termodinámicos involucrados en un

sistema son irreversibles, la segunda ley de la termodinámica de Clausius y Kelvin se puede representar matemáticamente en términos de Calortropía³; calor compensado y calor no compensado que se combinan en una forma diferencial exacta en un apropiado espacio de las variables macroscópicas, permitiendo postular una teoría de los procesos irreversibles, termodinámica consistente, y que reposa sobre la base del concepto de calortropía como una generalización de la entropía de Clausius [5]. Como punto de partida contamos con una teoría termodinámica generalizada⁴ de los procesos irreversibles para el estudio de procesos macroscópicos que tienen lugar en sistemas de tamaño finito [3].

En este trabajo presentamos una extensión de la teoría de la termodinámica generalizada y que ya habíamos desarrollado para el estudio de redes neuronales de reactores químicos [1] y arreglos unidimensionales de reactores acoplados [2].

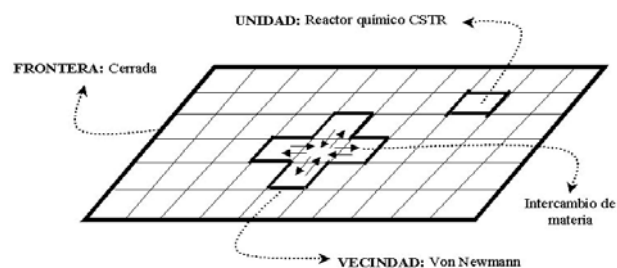


Figura 1. Esquema del sistema bidimensional para el estudio de la generación de patrones estacionarios.

Los sistemas estudiados son ensamblajes discretos de tamaño finito, donde las unidades corresponden a reactores químicos abiertos (CSTR's) en los que se llevan a cabo reacciones químicas oscilantes (véase la Figura 1). Las unidades del ensamblaje interactúan por intercambio de materia a través de la frontera a una velocidad definida. Como resultado de la aplicación de la teoría

³Según Eu Calortropía significa *evolución del calor*. Eu prefirió no utilizar el concepto de *entropía del no-equilibrio*, por ser un término que usualmente utilizan otras versiones de teorías termodinámicas de procesos irreversibles.

⁴La teoría de Eu es aplicable para procesos irreversibles que suceden en situaciones identificables como cerca o lejos del equilibrio (linealidad o no-linealidad para la relación entre fuerzas y flujos).

se obtienen los niveles globales de disipación de materia y energía (*estructuras disipativas*) que acompañan la generación de formas estacionarias bidimensionales (*autoorganización*) a medida que el sistema evoluciona en el espacio de los parámetros de control (bifurcación, velocidad de intercambio de materia y estímulo externo). Nuestro estudio se restringe a una limitada combinación de factores que conducen a la aparición de estructuras: vecindad de von Neumann, frontera cerrada, intercambio de materia simétrico entre vecinos, estímulo externo para una sola especie química y en una sola unidad. Las otras posibilidades que constituyen un amplio y posterior trabajo son: vecindad de Moore, vecindad hexagonal, frontera abierta o circular, velocidades asimétricas de intercambio de materia, estímulos en varias especies químicas, estímulos aplicados en varias unidades y distribución aleatoria de magnitudes de estímulos.

La metodología anteriormente descrita para el modelamiento dinámico de sistemas discretos bidimensionales es la misma que se utiliza para el estudio y comprensión del funcionamiento de algunos sistemas biológicos; por ejemplo tejidos neuronales, cardíacos, musculares, entre otros.

2. Segunda ley de la termodinámica

Del teorema de Carnot⁵ y de considerar una serie de ciclos de Carnot infinitesimales⁶ se llega a la expresión:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0. \quad (1)$$

Aquí es importante hacer notar que la desigualdad en la expresión anterior surge como consecuencia de considerar la irreversibilidad en uno de los ciclos. Clausius llamó al término δQ como calor compensado, haciendo referencia a que es el calor que el sistema intercambia con los alrededores durante el proceso, y además interpretó que la desigualdad muestra que existe una cantidad asociada a la naturaleza irreversible del proceso, que es positiva, que disminuye el trabajo disponible y que se desvanece cuando el proceso es reversible. Clausius denominó esta cantidad como *calor no-compensado*⁷ (\mathbf{N}):

$$\mathbf{N} = - \oint \frac{\delta Q}{T}. \quad (2)$$

Clausius analizó los procesos para los cuales $\mathbf{N} = 0$, es decir procesos reversibles, más específicamente procesos cíclicos cuasi-estáticos para los cuales $\mathbf{N} = 0$. Para este tipo de procesos la ecuación 1 satisface la igualdad

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0, \quad (3)$$

la ecuación anterior implica, enfatizamos, para procesos reversibles, la existencia de una función de estado a la que Clausius llamó **entropía** (S_{eq}):

$$dS_{eq} = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} \quad (4)$$

satisfaciendo que dS_{eq} es una diferencial exacta en el espacio termodinámico característico de los procesos reversibles:

$$\oint dS_{eq} = 0. \quad (5)$$

En las ecuaciones anteriores hemos empleado los subíndices *eq* y *rev* para destacar el carácter *reversible* del proceso y los estados de *equilibrio* del sistema.

Combinando la ecuación 4 con la primera ley de la termodinámica obtenemos la ecuación de Gibbs la cual es la base de la termodinámica clásica o de los estados de equilibrio:

$$dS_{eq} = T^{-1}(dE - \delta W). \quad (6)$$

3. Calotropía para procesos irreversibles

Si reescribimos la ecuación 2 de la siguiente manera:

$$\mathbf{N} + \oint \frac{\delta Q}{T} = 0, \quad (7)$$

observamos que esta es válida para un proceso irreversible, por consiguiente ninguno de los dos términos que la componen hacen referencia a cantidades exactas. Resulta natural pensar que \mathbf{N} es una cantidad que se obtiene al evaluar el proceso cíclico completo, así escribimos:

$$\mathbf{N} = \oint \delta \mathbf{N} \quad (8)$$

y

$$\oint \left(\delta \mathbf{N} + \frac{\delta Q}{T} \right) = 0. \quad (9)$$

⁵El teorema de Carnot, se puede escribir de la siguiente manera: $W_{rev} \geq W$. Ecuación que podemos interpretar diciendo que durante la operación de un ciclo de Carnot irreversible existe una cantidad de trabajo que no se encuentra disponible (W') y que es semidefinida positiva, de modo que: $W_{rev} = W + W'$

⁶Un ciclo de Carnot infinitesimal es un ciclo que opera entre dos depósitos térmicos con diferencias infinitesimales de temperatura entre sí. La palabra infinitesimal no hace referencia al tamaño físico de la máquina térmica sino a las diferencias en temperatura.

⁷El *calor no-compensado* es una cantidad matemática y físicamente diferente del calor compensado, y no puede derivarse a partir de éste. El proceso no-compensado es intrínseco al proceso natural y no puede derivarse de cantidades de procesos reversibles.

La expresión anterior hace que el trabajo de Clausius adquiera una forma nunca antes vista, la cual muestra que sobre todo el espacio termodinámico existe una cantidad que se conserva (Ψ) [4]. Esta cantidad da lugar a una diferencial exacta que proviene de la suma de dos diferenciales inexactas, al igual que en la primera ley de la termodinámica, donde la *energía interna* es una cantidad que se conserva sobre el ciclo, dando lugar a una diferencial exacta que proviene de la suma de dos diferenciales inexactas, las de calor y trabajo. Byung Chan Eu denomina a esta cantidad como *calortropía*, cuya diferencial se define como:

$$d\Psi = \delta\mathbf{N} + \frac{\delta Q}{T}, \quad (10)$$

satisfaciendo

$$\oint d\Psi = 0. \quad (11)$$

Notemos que la diferencial 10 y la integral cíclica 11 permanecen válidas ya sea que los procesos termodinámicos sean reversibles o irreversibles. La función Ψ es una variable fundamental de la termodinámica la cual es claramente diferente de la función S_{eq} definida por Clausius. En esencia, podríamos resumir que la función Ψ en la termodinámica generalizada, es una extensión de la función S_{eq} de Clausius para estados de no-equilibrio.

Con los resultados anteriores, se postula como una nueva ecuación fundamental en la teoría termodinámica la siguiente expresión extendida de Gibbs:

$$\begin{aligned} dE &= \delta Q - \delta W \\ d\Psi &= \frac{\delta Q}{T} + \delta\mathbf{N} \\ T(d\Psi - \delta\mathbf{N}) &= dE + \delta W \\ d\Psi &= T^{-1}(dE + \delta W) + \delta\mathbf{N} \end{aligned} \quad (12)$$

Las expresiones anteriores nos dicen que la teoría *termodinámica generalizada de los procesos irreversibles* está centrada en el concepto de *calortropía*, y que un significado preciso de este término depende de la claridad con la que se entiendan los conceptos de *calor compensado* y *calor no-compensado*. Esto último es el objetivo de las aplicaciones realizadas en el marco de la presente investigación.

La teoría *termodinámica lineal de los procesos irreversibles* desarrollada por de Donder [7], Meixner [8], Prigogine [9], de Groot y Mazur [11], y muchos otros

bajo la hipótesis del equilibrio local, asume la validez de una relación local de la ecuación de Gibbs 6, para lo cual se postula que se satisface una ecuación de balance local. La hipótesis central en esta teoría es que la función S_{eq} de Clausius permanece válida aún si los procesos que tienen lugar en el sistema son irreversibles. Dado que la función S_{eq} es definida para estados de equilibrio y procesos reversibles, parece entonces natural considerar que la ecuación de Gibbs 6 es inadecuada para el estudio de procesos irreversibles; por esto en la termodinámica generalizada [4, 5, 6] se lleva a cabo un cuidadoso análisis de la segunda ley de la termodinámica para poder expresarla en una forma adecuada al estudio de procesos irreversibles. La diferencial de la función calortropía, $d\Psi$, evaluada en forma local, también da lugar a una ecuación de balance local para la densidad de calortropía, donde la densidad local de $\delta\mathbf{N}/dt$ aparece como una cantidad semidefinida positiva, la cual desvanece cuando el sistema alcanza el estado de equilibrio termodinámico. Así nosotros concluimos que el término $\delta\mathbf{N}/dt$ debe ser semidefinido positivo para que los procesos irreversibles objeto del estudio sean consistentes con la segunda ley de la termodinámica. Este término será llamado *producción de calortropía*.

4. Termodinámica de los procesos irreversibles para un sistema bidimensional de unidades acopladas.

El formalismo termodinámico desarrollado para procesos irreversibles [1, 2, 3] se extiende para ser aplicado a un sistema compuesto de subsistemas finitos (p.ej., celdas o unidades) que interactúan entre sí intercambiando materia y energía.

B. C. Eu por conveniencia en el actual desarrollo de una teoría termodinámica generalizada recomienda⁸ expresar el término de calor no compensado de la siguiente manera:

$$\delta N = T^{-1} \delta \Xi \quad (13)$$

de modo que la cantidad $\delta\Xi$ quede expresada en términos de variables termodinámicas globales. Así la ecuación extendida de Gibbs 12 se reescribe de la siguiente manera:

$$\frac{d\Psi}{dt} = T^{-1} \left(\frac{\delta Q}{dt} + \frac{\delta \Xi}{dt} \right) \quad (14)$$

La expresión anterior se puede escribir en términos de las velocidades de cambio de las variables macroscópicas que siguen ecuaciones evolutivas en el marco de la teoría

⁸Comunicación personal.

termodinámica de los procesos irreversibles, siendo la integral de la diferencial de calortropía, en el espacio de las variables macroscópicas, una superficie sobre la cual evoluciona el estado macroscópico del sistema. Para el presente sistema los procesos termodinámicos irreversibles evolucionan sobre la superficie de calortropía en función de las concentraciones de las especies químicas, la temperatura y la presión. La superficie de calortropía puede entenderse como una realización matemática de las leyes de la termodinámica, de modo que los procesos que allí se describen serán consistentes con estas leyes, demandando que la producción de calortropía sea semi-definida positiva. Entonces resulta de interés práctico entender cuales serán las consecuencias de los procesos en la producción de calortropía en el sistema global, lo cual también indicará una medida de la disipación de materia y energía; particularmente veremos las consecuencias de la materia transformándose de una forma útil a una menos útil, a medida que los procesos químicos ocurren llevando a la generación de nuevas estructuras en el sistema.

Para calcular la producción de calortropía asumiremos que las soluciones de las especies químicas que reaccionan son termodinámicamente ideales.

La producción de calortropía para el sistema bidimensional (plano) $(d\Xi/dt)_{plano}$ donde los únicos procesos irreversibles que ocurren en cada una de las unidades son las reacciones químicas, se obtiene mediante la siguiente expresión: [1, 4]

$$(d\Xi/dt)_{plano} = -VT^{-1} \sum_{s=1}^{\nu+w} \sum_{l=1}^m A_l^{(s)} R_l^{(s)} \quad (15)$$

donde V es el volumen, T es la temperatura, $A_l^{(s)}$ son las afinidades de las reacciones, $R_l^{(s)}$ son las velocidades de reacción. En la anterior expresión la contribución de cada una de las unidades s a la producción de calortropía se suma sobre el total de unidades en el sistema bidimensional v . El subíndice l es para las m reacciones que suceden en cada una de las unidades.

Como los únicos procesos irreversibles presentes en cada una de las unidades son las reacciones químicas, la expresión presentada para la producción de calortropía es idéntica a la expresión para la producción de entropía que aparece en la teoría termodinámica lineal de los procesos irreversibles deducida bajo la hipótesis del equilibrio local, pero como la producción de calortropía en la teoría termodinámica generalizada es estrictamente

hablando, un concepto diferente al de producción de entropía y que es válido en el amplio espectro (todo tipo de procesos irreversibles y para cualquier condición de cerca o lejos al estado de equilibrio) de los procesos irreversibles, presentaremos todos los resultados en el marco de la teoría termodinámica generalizada.

Para cada una de las unidades del sistema bidimensional que posee las mismas reacciones (reacción de Belousov-Zhabotinskii [13]), podemos generalizar la siguiente notación: la velocidad de reacción $R_l^{(s)}$ de la reacción l en una unidad (subsistema) se puede expresar en términos de las velocidades directas Λ_l^+ y contrarias Λ_l^- :

$$R_l^{(s)} = \Lambda_l^+ - \Lambda_l^-, \quad (16)$$

siguiendo la ley de acción de masas. Además, si denotamos con $x_{a,s}$ las concentraciones de exceso de las especies a en cada unidad, las cuales están en el mismo estado termodinámico inicial cuando no hay intercambio de materia y energía entre las unidades, y si además asumimos que los potenciales químicos son los correspondientes a soluciones ideales, entonces para las especies a estos se pueden expresar como

$$\hat{\mu}_a^{(s)} = \hat{\mu}_a^{0(s)} + k_B T \ln x_{a,s} \quad (17)$$

donde $\hat{\mu}_a^{0(s)}$ es el potencial químico correspondiente al estado homogéneo (p. ej., el estado estándar) con referencia a la especie a a través del sistema. En otras palabras, lo que estamos diciendo es que las unidades (subsistemas) se encuentran en estado de equilibrio con respecto a las especies a en tales condiciones. En tal estado

$$\hat{\mu}_a^{0(s-1)} = \hat{\mu}_a^{0(s)} = \hat{\mu}_a^{0(s+1)} \quad \text{para todo } s. \quad (18)$$

Así, la producción de calortropía para el sistema bidimensional (plano) compuesto de un número finito de unidades (subsistemas) se escribe de la siguiente manera:

$$(d\Xi/dt)_{plano} = V\mathcal{R} \sum_{s=1}^{\nu+w} \left[\sum_{l=1}^m (\Lambda_l^+ - \Lambda_l^-) \ln \left(\frac{\Lambda_l^+}{\Lambda_l^-} \right) \right]_s \quad (19)$$

donde \mathcal{R} representa la constante universal de los gases.

Como las unidades del sistema están acopladas por intercambio de materia entre ellas, también hay contribución de este proceso irreversible a la producción global de calortropía 14. Esta contribución global debido al flujo de materia en las fronteras de las unidades se

obtiene mediante la siguiente expresión [1, 3]

$$\left(\frac{\delta Q_c}{dt}\right)_{plano} = -T^{-1} \sum_{s=1}^{\nu+w} \sum_{a=1}^r \widehat{\mu}_a^{(s)} \frac{d_e M_a^{(s)}}{dt} \quad (20)$$

donde $M_a^{(s)}$ hace referencia a la masa de las especies químicas en la unidad s y el símbolo d_e/dt lo utilizamos para representar derivadas de tiempo por transferencia por velocidad de cambio; por ejemplo en $M_a^{(s)}$, que surge del intercambio de materia entre la celda s y sus vecinos (p. ej., vecindad en cruz de von Neumann)⁹. Ya que por el principio de conservación de la masa en el sistema se tiene que:

$$\sum_{s=1}^{\nu+w} \sum_{a=1}^r \widehat{\mu}_a^{0(s)} \frac{d_e M_a^{(s)}}{dt} = 0, \quad (21)$$

la velocidad de cambio de calortropía asociada al intercambio de materia de la especie a entre unidades con sus alrededores se obtiene de la siguiente expresión:

$$\left(\frac{\delta Q_c}{dt}\right)_{plano} = -\mathcal{R} \sum_{p=1}^w \sum_{s=1}^{\nu} [W]_s \quad (22)$$

$$W = \sum_{a=1}^r \beta(x_{a,s-1,p} + x_{a,s+1,p} + x_{a,s,p-1} + x_{a,s,p+1} - 4x_{a,s,p}) \ln x_{a,s,p}$$

En la expresión anterior los subíndices p y s se utilizan para denotar el recorrido matricial a través del sistema bidimensional. La ecuación anterior aplica para una unidad con vecinos en cruz.

Finalmente, la velocidad global de cambio de calortropía en el sistema bidimensional se obtiene de la siguiente fórmula

$$\left(\frac{d\Psi}{dt}\right)_{plano} = \sigma_{net} + \phi_{net} \quad (23)$$

Los términos a la derecha de la expresión anterior abrevian para

$$\phi_{net} = -\mathcal{R} \sum_{p=1}^w \sum_{s=1}^{\nu} [W]_s \quad (24)$$

$$W = \sum_{a=1}^r \beta(x_{a,s-1,p} + x_{a,s+1,p} + x_{a,s,p-1} + x_{a,s,p+1} - 4x_{a,s,p}) \ln x_{a,s,p}$$

$$\sigma_{net} = V\mathcal{R} \sum_{s=1}^{\nu+w} \left[\sum_{l=1}^m (\Lambda_l^+ - \Lambda_l^-) \ln \left(\frac{\Lambda_l^+}{\Lambda_l^-} \right) \right]_s \quad (25)$$

Hacemos notar que, σ_{net} es la integral de volumen de las producción de calortropía en las unidades sobre el sistema bidimensional, mientras que $(d\Psi/dt)_{plano}$ es la integral de volumen de la ecuación de balance de calortropía sobre el sistema bidimensional.

Para el caso de oscilaciones químicas en la concentración de las especies, resulta conveniente definir el valor medio de la función σ_{net} por promedio de tiempo para oscilaciones con período τ_p

$$\sigma_{osc} = \frac{1}{\tau_p} \int_0^{\tau_p} d\tau \sigma_{net}(\tau). \quad (26)$$

Para cerrar esta sección queremos hacer notar la diferencia que existe en trabajar con un sistema unitario y un sistema de tamaño finito compuesto por varias unidades. Para una celda unitaria la función σ_{net} hace referencia a la producción de calortropía debida únicamente a los procesos irreversibles que suceden en su interior, mientras que la función ϕ_{net} significa el flujo de calortropía por interacción entre sistema y alrededores. Para un sistema de tamaño finito (unidades acopladas intercambiando materia y energía), la producción de calortropía tiene contribuciones de los procesos irreversibles que suceden al interior del sistema y de los que suceden por interacciones con los vecinos. Esta es la principal diferencia en el tratamiento termodinámico de sistemas de tamaño finito.

5. La reacción química oscilante de Belousov-Zhabotinskii: Modelamiento matemático utilizando el esquema conocido como el oregonador

⁹Notemos que Q_c en esta expresión no implica calor, sino que $(\delta Q_c/dt)_{plano}$ denota la velocidad de cambio de calortropía que proviene del intercambio de materia entre unidades.

El sistema de reacciones químicas que utilizamos en este trabajo corresponde a la reacción de Belousov-Zhabotinskii (BZ), la cual se esquematiza con el modelo matemático conocido como el Oregonador [13], el cual se basa en el mecanismo de reacción química propuesto por Field-Körös-Noyes (FKN) [14] para explicar el comportamiento oscilatorio observado en la reacción BZ. Los valores de las constantes cinéticas se tomaron del artículo de Gyorgyi et al. [15]. El modelo del Oregonador (véase abajo reacciones CR1-CR6 y Tabla) describe la oxidación del ion Ce^{3+} por los iones bromato en medio de ácido sulfúrico y la bromación oxidativa del ácido malónico. El sistema de reacciones, cuando se lleva a cabo en un CSTR exhibe histéresis entre dos estados estacionarios y así biestabilidad y oscilaciones en un intervalo de valores para el parámetro de bifurcación f . En nuestra versión adimensional del modelo matemático el comportamiento oscilatorio emerge para valores del parámetro de bifurcación entre 0.4769 y 2.1166, véase la Figura 2. Si el valor de f es menor que 0.4769 emerge un estado estacionario estable caracterizado por altas concentraciones del ion Ce^{4+} (estado oxidado), mientras que si el valor de f es mayor que 2.1166 emerge un estado estacionario caracterizado por bajas concentraciones del ion Ce^{4+} (estado reducido).

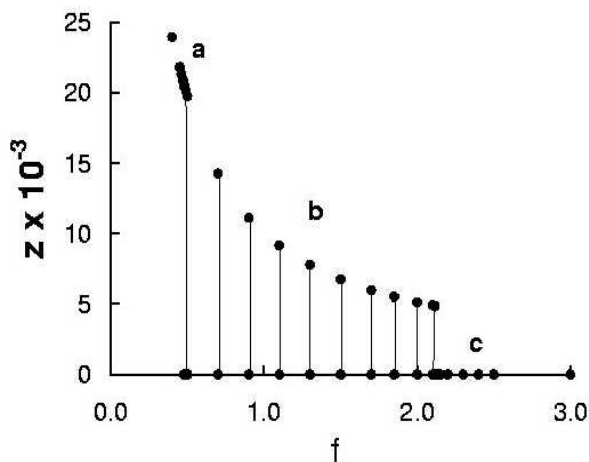
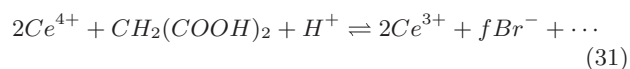
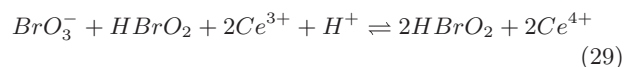
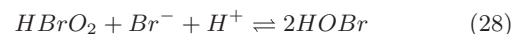
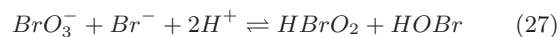


Figura 2. Diagrama de bifurcación para el Oregonador. Los puntos del conjunto *a* representan la rama de estados estacionarios de alta concentración en la especie z (Ce^{4+}) (estado oxidado), los puntos del conjunto *b* representan los estados en la región de comportamiento oscilatorio ($0.4769 \leq f \leq 2.1166$), las líneas indican la amplitud de la oscilación, los puntos en el conjunto *c* representan la rama de estados estacionarios de baja concentración en la especie z (Ce^{4+}) (estado reducido).

Las reacciones químicas del mecanismo FKN que correspondientes al modelo del Oregonador son las siguientes:



La evolución temporal de cada una de las especies en una unidad aislada del sistema bidimensional se describe con la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dx_i^{(s)}}{dt} = k_{fi}(x_i^{(s-1)} + x_i^{(s+1)} - 2x_i^{(s)}) + R_i^{(s)} \quad (32)$$

$(i = 1, 2, 3, s = 1, 2, \dots, N)$

asumiendo un intercambio uniforme de materia a través de las fronteras, es decir que las velocidades k_{fi} son independientes de los límites de la unidad. Es posible hacer que la velocidad de intercambio dependa de los límites de la unidad pero por simplicidad en el manejo del problema no consideraremos en este trabajo esta opción. Además, también por simplicidad tendremos en cuenta que sólo una especie química se intercambia a través de la frontera de la unidad, $k_{f3} \neq 0$ para x_3 .

Estas ecuaciones evolutivas se resuelven numéricamente hasta lograr que todo el sistema bidimensional alcance un estado oscilatorio uniforme después de cierto tiempo τ_0 . Las condiciones iniciales son las siguientes:

$$x_s(0) = 0, \quad y_s(0) = 0, \quad z_s(0) = 0 \quad (33)$$

$s = 1, 2, \dots, N = v + w.$

Entonces al instante de tiempo $\tau = \tau_0$ una unidad s_0 (generalmente decidimos trabajar con la celda del centro del plano) recibe un estímulo externo (a modo de perturbación en la concentración) en la concentración de la especie x_3 (Ce^{3+}) mediante una función de paso con una amplitud ε_0 . Las concentraciones a τ_0 entonces se pueden resumir como sigue:

$$x_s(\tau_0) = x_{\tau_0}, \quad y_s(\tau_0) = y_{\tau_0}, \quad (34)$$

$$z_s(\tau_0) = z_{\tau_0} + \varepsilon_0 \delta(\tau - \tau_0) \delta_{ss_0}.$$

El estímulo recibido por s_0 da inicio a una onda que se propaga a través del plano.

6. Resultados

El sistema bidimensional trabajado es de 31×31 unidades, es decir con 961 unidades acopladas que representan un total de 2883 ecuaciones diferenciales ordinarias rígidas no-lineales acopladas. Las ecuaciones 23 y 32 dan lugar al sistema de ecuaciones de trabajo (S-EDO). El sistema S-EDO se resolvió numéricamente utilizando la subrutina LSODE [16] basada en el método de Gear [17] para ecuaciones diferenciales ordinarias rígidas. Para el trabajo numérico usamos una matriz jacobiana estimada numéricamente y una tolerancia de 10^{-3} asegurándonos de no generar datos ficticios. Los requerimientos en tiempo computacional varían según los parámetros que se modifiquen, pero generalmente todos los cálculos requieren de 4 a 10 horas en procesadores de 1.0GHz en equipos PC.

Los patrones estacionarios que se generan después de que el estímulo se ha propagado a través del sistema, se estudiaron en función de tres variaciones: 1) modificando la amplitud del estímulo externo, 2) incrementado la velocidad de intercambio de materia de una unidad con sus vecinos, 3) modificando el parámetro de bifurcación a través de la región oscilatoria para la situación en la que el estímulo lo recibe la unidad ubicada en la posición de la mitad y 4) la variación anterior para la situación en que tres estímulos se aplican simultáneamente en las unidades ubicadas en las posiciones inicial, media y final.

6.1. Autoorganización: Patrones estacionarios en función de la amplitud del estímulo.

Se ensambló un sistema bidimensional de 31×31 unidades acopladas por vecindad de von Neumann, véase la Figura 1. La frontera del plano es cerrada. En cada una de las unidades tiene lugar la reacción de Belousov-Zhabotinskii, representada por el modelo del Oregonador, cuyo correspondiente diagrama de bifurcaciones se muestra en la Figura 2. El sistema bidimensional de Oregonadores acoplados evoluciona de acuerdo a las ecuaciones evolutivas 32 desde un estado inicial correspondiente a un estado oscilatorio sostenido que se ubica en la región b del diagrama de bifurcación ($f = 0.48$).

Cuando el tiempo reducido durante la evolución alcanza un valor de $\tau_0 = 1466$ el sistema se perturba en la celda de la mitad con un estímulo de determinada amplitud. El tiempo al cual se aplica el estímulo se escogió como el correspondiente al punto más bajo del comportamiento oscilatorio¹⁰. El estímulo entonces se propaga a través del medio produciendo durante su recorrido la *muerte de la fase oscilatoria (death phase)* y dejando la unidad en un determinado estado estacionario. El número de estados estacionarios que puede alcanzar cada unidad, como producto de la intrincada interacción de las reacciones químicas con los procesos de transporte de materia, depende del valor de la fase oscilatoria al momento de recibir la onda que se propaga. Cuando el estímulo se ha propagado a través de todo el sistema, éste queda en un estado estacionario heterogéneo altamente complejo que en su conjunto denominamos como *patrón estacionario* (escogimos representar en el patrón únicamente los estados estacionarios correspondientes a la especie química que recibe el estímulo, Ce^{4+}). Este *patrón estacionario* se mantiene en el tiempo y espacio a expensas de la continua transformación y transporte de materia. La Figura 3 muestra los *patrones estacionarios* que emergen dependiendo de la amplitud del estímulo externo aplicado¹¹. Por observación cualitativa de las formas podríamos decir que los patrones 3.A y 3.B son similares entre sí, mientras que los 3.C-3.F lo son entre ellos. La similitud a la que nos referimos se basa en que parece que al aumentar la amplitud del estímulo lo que observamos es una ampliación del interior del patrón.

En la Figura 4 mostramos los niveles de producción global de calortropía (σ_{net}) inherentes a las reacciones químicas en las unidades y los niveles de flujo global de calortropía¹² (ϕ_{net}) producto del intercambio de materia entre unidades. La primera información valiosa que muestra esta figura se relaciona con el hecho de que mientras los *patrones estacionarios* se generan mediante un incremento sistemático de la amplitud del estímulo, los niveles de producción de calortropía no siguen un comportamiento suave; esto muestra la compleja relación entre estas dos cantidades.

¹⁰Nosotros encontramos que la amplitud del estímulo necesaria para generar una onda que se propague a través del medio depende de la fase de la oscilación. Así, cuando la fase es cero (punto más bajo del comportamiento oscilatorio), $\phi = 0$, se requiere que la amplitud del estímulo sea pequeña. A medida que la fase aumenta, aumenta significativamente la amplitud del estímulo necesario para generar la propagación de la onda, hasta que para ciertos valores ningún estímulo es capaz de generar una propagación.

¹¹El código de colores que escogimos para representar el valor de concentración que le corresponde a cada estado estacionario va desde el azul intenso para el valor más pequeño, hasta el rojo para el valor más alto. Los otros colores corresponden a valores intermedios entre estos dos colores. Además para resolver la definición y diferencias entre valores muy próximos se utilizó un algoritmo para gráficos denominado interpolación bilineal, el cual asigna la intensidad del color dependiendo de los vecinos de las esquinas.

¹²Estrictamente hablando son contribuciones a la producción global de entropía debida a los procesos de transporte de materia entre unidades.

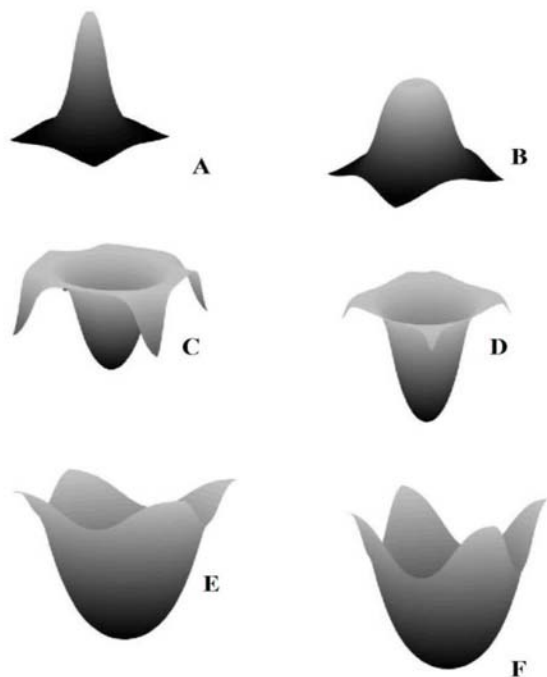


Figura 3. Autoorganización. Las coordenadas espaciales de las figuras corresponden a: coordenada Z a la magnitud de la variable z (Ca^{4+}) y coordenadas X - Y a la longitud del plano bidimensional (Esto aplica para las figuras 5, 7, 9). La secuencia de figuras ilustra los *Patrones Estacionarios* que emergen de un espacio simétrico caracterizado por un estado oscilatorio homogéneo dado por el parámetro de bifurcación $f = 0,48$. Todas las celdas están intercambiando materia a una velocidad constante de $\beta = 22,5$, con su vecindad de von Neumann. La ruptura de la simetría espacial sucede cuando al tiempo 1466 (variable reducida y adimensional) se aplica instantáneamente en la celda de la mitad un estímulo que genera una onda que se propaga a través del medio. La secuencia de imágenes corresponden a patrones generados por estímulos de diferente amplitud. **A)** $\varepsilon_0 = 5$, **B)** $\varepsilon_0 = 10$, **C)** $\varepsilon_0 = 50$, **D)** $\varepsilon_0 = 100$, **E)** $\varepsilon_0 = 500$, **F)** $\varepsilon_0 = 1000$.

La Figura 4 muestra dos tendencias, aumento y disminución de los niveles de producción global de calortropía; la transición poco suave de un comportamiento al otro coincide con los cambios observados de los patrones 3A - 3B a los patrones 3C - 3F. Al analizar las implicaciones sobre la autoorganización y la evolución, se observa que para diferentes puntos en la escala evolutiva dada por el parámetro de amplitud de la perturbación, se pueden encontrar diferentes estructuras autoorganizadas que emergen presentando el mismo nivel de disipación, pero siempre a cada una de ellas está asociado un único nivel de disipación. Otra información

valiosa está relacionada con las magnitudes de producción global de calortropía; en este tipo de estructuras estamos mostrando que los niveles de producción de calortropía son comparables en magnitud a los niveles de flujo global de calortropía, situación muy diferente a la que se da en los sistemas de reacción-difusión en medios continuos [18] [19], haciendo de esto una característica termodinámica de estas estructuras estacionarias.

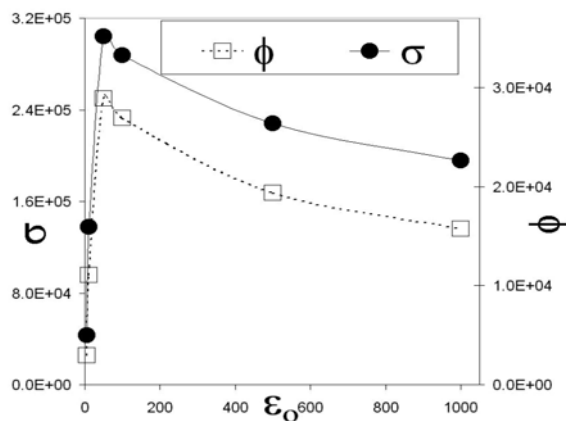


Figura 4. Calortropía. La figura muestra los niveles de producción de calortropía para los sistemas bidimensionales de la Fig. 3, a medida que se modifica la amplitud del estímulo aplicado (perturbación ε_0) a la celda ubicada en posición de la mitad. La producción global de calortropía debida a los procesos químicos se calculó utilizando la siguiente expresión: $\sigma^* = \sigma_{net}/\mathcal{R}$. Mientras que para calcular la contribución del intercambio de materia a la producción global de calortropía se utilizó la siguiente expresión: $\phi^* = \phi_{net}/\mathcal{R}$. Ver ecuaciones 23.

6.2. Evolución en función de la velocidad de intercambio de materia. El sistema bidimensional presentado en la sección anterior se estudia ahora para el caso en el cual al sistema en estado global oscilatorio homogéneo ($f = 0.48$) se le aplica una perturbación de amplitud $\varepsilon = 500$ en la celda de la mitad cuando el tiempo reducido es de $\tau_0 = 1466$. La Figura 5 muestra el cambio de la estructura en función del incremento de la velocidad de transferencia de materia de los patrones estacionarios que emergen para un estímulo específico. Cualitativamente no se observan diferencias notorias sino un cambio paulatino en la forma de las estructuras. En la Figura 6 observamos los niveles de producción y flujo global de calortropía asociados a cada estructura; de esta figura notamos nuevamente que las magnitudes son comparables entre los niveles de producción y flujo global de calortropía. Es interesante observar que para

este estudio en particular la producción global de calortropía aumenta de manera continua al incrementar la magnitud de la velocidad de transferencia de masa entre unidades. Caso contrario sucede con los niveles de flujo global de calortropía en los que inicialmente hay un aumento y luego una disminución. Surge como conclusión valiosa de esta sección el que a cada patrón le corresponde un definido nivel de producción global de calortropía, lo que no se puede afirmar para el caso del flujo global de calortropía, donde diferentes patrones pueden llegar a tener niveles similares o iguales en esta cantidad termodinámica.

Estos resultados muestran que para este caso existe una relación directa entre la velocidad de producción global de calortropía y el parámetro evolutivo velocidad de intercambio de materia, mientras que, la relación entre el flujo global de calortropía y este parámetro es compleja. En cuanto a la autoorganización y la evolución queremos destacar que en esta escala evolutiva podemos encontrar diferentes estructuras con igual nivel de flujo global de calortropía.

6.3. Evolución en función del parámetro dinámico de bifurcación

El sistema bidimensional de Oregonadores acoplados se estudia para el caso en el cual los patrones emergen a partir de una perturbación de amplitud $\varepsilon = 1$ aplicada en la celda de la mitad cuando el tiempo reducido es igual a $\tau_0 = 1380$ y la velocidad de transferencia de materia entre unidades es de $\beta = 22.5$. La Figura 7 muestra la evolución del patrón generado a medida que se incrementa el parámetro de bifurcación. Es interesante observar que la estructura que evoluciona se encuentra en el centro del *patrón estacionario*, mientras que en su entorno no se observan cambios apreciables. En la Figura 8 observamos el cambio de la producción y flujo global de calortropía. En este caso apreciamos que las magnitudes son comparables aunque menores para el caso del flujo global de calortropía.

También se observa que ambas cantidades termodinámicas se comportan similarmente y con una relación compleja respecto al parámetro de bifurcación.

La Figura 9 muestra los patrones que emergen cuando se aplican de manera simultánea perturbaciones en tres unidades diferentes, la inicial, la de la mitad y la final. Aquí claramente se aprecia que las estructuras que emergen son mas ricas en formas. En la Figura 10 apreciamos los niveles de producción y flujo global de calortropía.

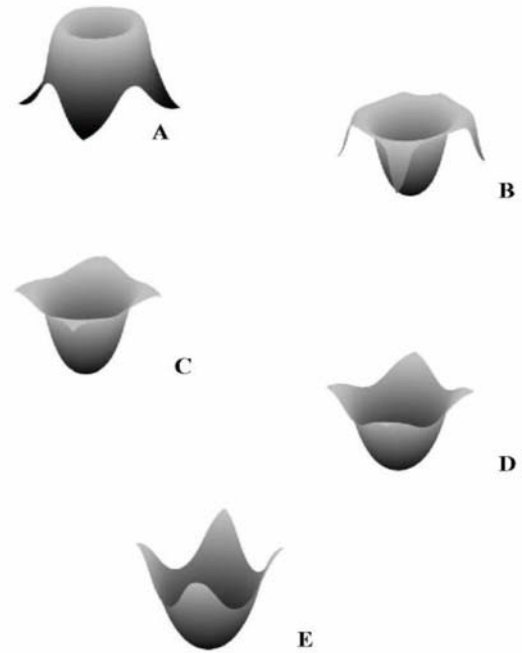


Figura 5. Evolución en función del intercambio de materia. La secuencia de imágenes corresponde a la evolución de *Patrones Estacionarios* en función de la velocidad de intercambio de materia β . Las condiciones bajo las cuales se produjo la ruptura de la simetría espacial son las siguientes: Parámetro de bifurcación $f = 0.48$, Estímulo aplicado al tiempo 1466 con amplitud $\varepsilon_0 = 500$. **A)** $\beta = 5$, **B)** $\beta = 10$, **C)** $\beta = 15$, **D)** $\beta = 22.5$, **E)** $\beta = 40$.

Aquí lo más notorio es el sustancial incremento en la magnitud de producción global de calortropía respecto a la del flujo global de calortropía. Es evidente que para el caso en el que los patrones evolucionan en función del parámetro dinámico de bifurcación se presenta una relación bastante compleja con las cantidades termodinámicas en estudio. En lo referente a la autoorganización y la evolución, nuevamente observamos que a cada estructura autoorganizada le corresponde un específico nivel de disipación, mientras que es posible encontrar diferentes estructuras con un mismo nivel de disipación.

6.4. Discusión final y conclusiones. En este trabajo presentamos una extensión de las investigaciones que hemos desarrollado en el estudio termodinámico de sistemas que exhiben algún tipo de comportamiento complejo [1] [2]. Para esto presentamos una teoría termodinámica de los procesos irreversibles, que nos permite

explorar como se dan los niveles de disipación de materia y energía asociados a estados complejos o autoorganizados. De particular interés resultó trabajar con ensambles discretos que llevan a la formación de estructuras o patrones estacionarios, los cuales resultan ser de relevancia en muchas investigaciones con sistemas biológicos. El tema de la autoorganización, estados de no-equilibrio, orden a través de las fluctuaciones y estructuras disipativas, ha sido ampliamente tratado por Prigogine y colaboradores de la llamada Escuela de Bruselas [10], en el marco de la teoría termodinámica lineal de los procesos irreversibles que se basa en la hipótesis del equilibrio local y de relaciones lineales entre fuerzas y flujos, pero en el caso de las reacciones químicas las ecuaciones constitutivas son no lineales por la ley de acción de masas.

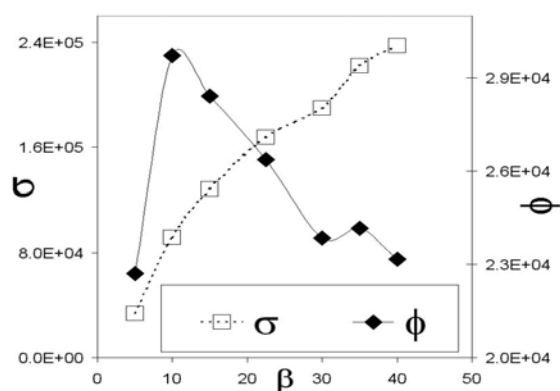


Figura 6. Calortropía. La figura muestra los niveles de producción de calortropía para los sistemas bidimensionales de la Fig. 5, a medida que se modifica la velocidad de intercambio de materia (β). La producción global de calortropía debida a los procesos químicos se calculó utilizando la siguiente expresión: $\sigma^* = \sigma_{net}/\mathcal{R}$. Mientras que para calcular la contribución del intercambio de materia a la producción global de calortropía se utilizó la siguiente expresión: $\phi^* = \phi_{net}/\mathcal{R}$. Ver ecuaciones 23.

En un trabajo previo en esta dirección B. C. Eu y M. Alghoul [18] analizaron las producciones globales de calortropía, bajo una hipótesis de relación lineal entre fuerzas y flujos, que acompañan la evolución temporal de patrones y cambios de formas, y mostraron que para estas condiciones siempre se viola el criterio evolutivo de la termodinámica lineal de los procesos irreversibles, *teorema de la mínima producción de entropía*. Ahora, con la teoría termodinámica generalizada, se elimina toda aproximación e idealización, con lo cual esperamos aportar a la mejor comprensión de una posible conexión

entre la termodinámica y la formación de patrones y su evolución.

Los resultados de esta investigación arrojan las siguientes conclusiones:

1. A partir de estados oscilatorios globalmente homogéneos se pueden obtener *patrones espaciales estacionarios*, los cuales son típicas *estructuras de no-equilibrio*.
2. La forma de los patrones estacionarios depende del parámetro de bifurcación que gobierna la dinámica no-lineal, de la velocidad de transferencia de masa, de la magnitud del estímulo y del número de unidades que lo reciban.
3. Para las estructuras estacionarias formadas, los niveles de producción y flujo global de calortropía son comparables, a diferencia de los sistemas de reacción-difusión en medios continuos. Esto muestra el “costo energético” que tiene que pagar el sistema por mantener dichas estructuras.
4. La relación entre producción y flujo global de calortropía con el parámetro de bifurcación y la magnitud del estímulo resulta compleja, a diferencia de la clara tendencia que se aprecia entre producción global de calortropía y velocidad de transferencia de masa. Esto parece ser por la forma en la que el parámetro β aparece en las ecuaciones evolutivas; de todos modos se requiere un análisis matemático posterior de esta situación.
5. Todos los resultados son consistentes con la segunda ley de la termodinámica en el sentido en que las cantidades obtenidas para producción y flujo global de calortropía son positivas, como esta ley lo demanda.
6. Finalmente hemos dado evidencias de respuesta para la pregunta abierta desde hace tiempo entre la comunidad científica respecto a la posible conexión entre la termodinámica y este tipo de estructuras. Lo primero claramente demostrado es que su evolución esta gobernada por la segunda ley de la termodinámica, como se concluyó anteriormente aunque nuestros resultados muestran que la segunda ley de la termodinámica no tiene un control definido sobre la aparición de las formas y su evolución, evolución entendida en el amplio sentido termodinámico y fisicoquímico.

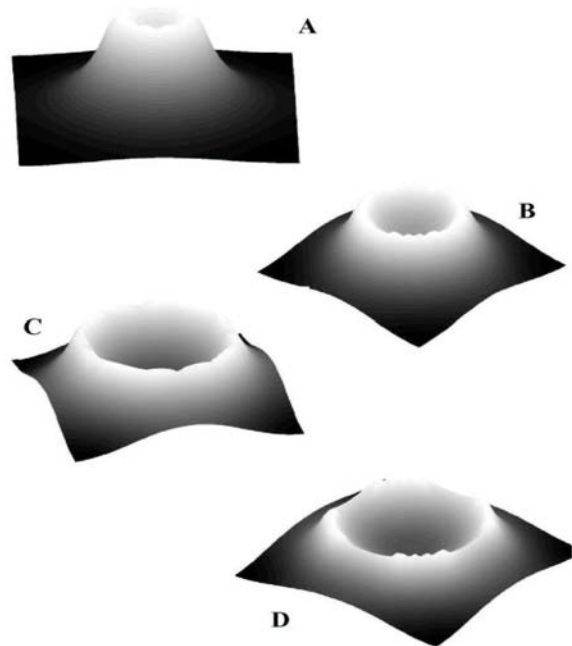


Figura 7. Evolución en función del parámetro de bifurcación. Bajo determinadas condiciones físicas se rompe la simetría espacial para dar lugar a un *Patron Estacionario*: velocidad de intercambio de materia $\beta = 22.5$, amplitud del estímulo $Pert(\epsilon_0) = 1.0$ aplicado al tiempo 1380 en la celda ubicada en la posición de la mitad. La secuencia de imágenes muestra como evolucina el patrón a medida que la dinámica del sistema se barre a lo largo del parámetro de bifurcación para valores en la region oscilatoria (véase la fig. 2). **A)** $f = 1.0$, **B)** $f = 1.2$, **C)** $f = 1.4$, **D)** $f = 1.6$, **E)** $f = 1.8$, **F)** $f = 2.11$

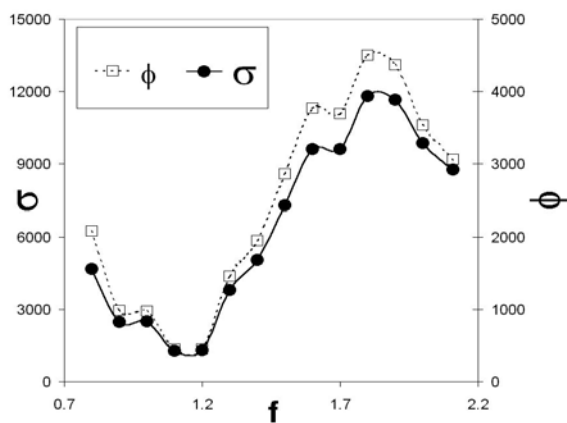


Figura 8. Calortropía. La figura muestra los niveles de producción de calortropía para los sistemas bidimensionales de la Fig.

7, a medida que se modifica que el sistema evoluciona en función del parámetro de bifurcación (f). La producción global de calortropía debida a los procesos químicos se calculó utilizando la siguiente expresión: $\sigma^* = \sigma_{net}/\mathcal{R}$. Mientras que para calcular la contribución del intercambio de materia a la producción global de calortropía se utilizó la siguiente expresión: $\phi^* = \phi_{net}/\mathcal{R}$. Ver ecuaciones 23.

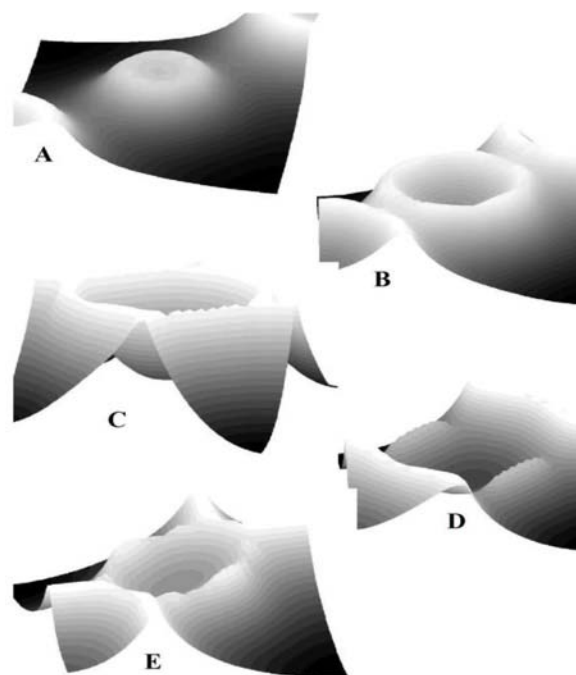


Figura 9. Evolución en función del parámetro de bifurcación. Bajo determinadas condiciones físicas se rompe la simetría espacial para dar lugar a un *Patron Estacionario*: velocidad de intercambio de materia $\beta = 30$, amplitud del estímulo $\epsilon_0 = 10.0$ aplicado al tiempo 1380 de manera simultánea en tres celdas ubicadas en la posiciones inicial, mitad y final. La secuencia de imágenes muestra como evolucina el patrón a medida que la dinámica del sistema se barre a lo largo del parámetro de bifurcación para valores en la region oscilatoria (véase la Fig. 2). **A)** $f = 0.8$, **B)** $f = 1.0$, **C)** $f = 1.5$, **D)** $f = 2.0$.

Agradecimientos

Este trabajo se inició durante las visitas que D.B ha realizado al grupo de investigación del profesor B. C. Eu en el Chemistry Department, McGill University. Las visitas a McGill University contaron con el apoyo parcial de la DIB-UN sede Bogotá dentro de su programa *Apoyo a estudios doctorales en el exterior*, año 2000. Agradecemos a M. E. Ossa las discusiones mantenidas sobre las

posibles implicaciones en sistemas biológicos y su valiosa colaboración en el proceso de edición de este documento.

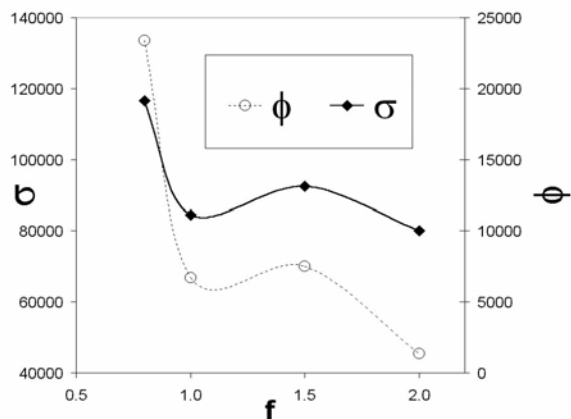


Figura 10. La figura muestra los niveles de producción de calortropía para los sistemas bidimensionales de la Fig. 9, a medida que el sistema evoluciona en función del parámetro de bifurcación (f). La producción global de calortropía debida a los procesos químicos se calculó utilizando la siguiente expresión: $\sigma^* = \sigma_{net}/\mathcal{R}$. Mientras que para calcular la contribución del intercambio de materia a la producción global de calortropía se utilizó la siguiente expresión: $\phi^* = \phi_{net}/\mathcal{R}$. Ver ecuaciones 23.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Barragan, D., Eu, B. C., J. Phys. Chem. B, 2001, **105**, 7104.

- [2] Barragán, D., Eu, B.C., J. Phys. Chem. A, 2002, **106**(6), 988.
- [3] Eu, B. C., J. Phys. Chem., 1999, **103**, 8583.
- [4] Eu, B. C., *Kinetic Theory and Irreversible Thermodynamics*, Wiley, New York, 1992.
- [5] Eu, B. C., Phys. Rev. E, 1995, **51**, 768.
- [6] Eu, B. C., *Nonequilibrium Statistical Mechanics*, Kluwer, Dordrecht, 1998.
- [7] De Donder, Th., *L’Affinité*, Gauthier-Villars: Paris, 1928.
- [8] Meixner, J. & Reik, H. G., *Thermodynamik der irreversiblen Prozesse in Handbuch der Physik*, S. Flügge, ed., Springer: Berlin, 1959, Vol. 3.
- [9] Prigogine, I., *Thermodynamics of Irreversible Processes*, Interscience: New York, 1967, third ed.
- [10] Prigogine, I., Nicolis, G., *Self-Organization in Nonequilibrium Systems*, Wiley-Interscience, New York, 1977.
- [11] de Groot, S. R. & Mazur, P., *Nonequilibrium Thermodynamics*, North-Holland, Amsterdam, 1962.
- [12] Clausius, R., Ann. Phys. (Leipzig) 1865, **125**, 355.
- [13] R. J. Field, R. M. Noyes, J. Chem. Phys., 1974, **60**, 1877.
- [14] R. J. Field, E. Köros, R. M. Noyes, J. Am. Chem. Soc., 1972, **94**, 8649.
- [15] Georgyi, L., Turanyi, T., Field, R. J., J. Phys. Chem. 1990, **94**, 7162.
- [16] Hindmarsh, A. C., *Livermore Solver for Ordinary Differential Equations*, Technical Report No. UCID-3001, Lawrence Laboratory, Livermore, CA, 1972.
- [17] Gear, C. W., *Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1971.
- [18] Al-Ghoul, M., Eu, B. C., Physica D, 1996, **90**, 119.
- [19] Al-Ghoul, M., Eu, B. C., Physica D, 1996, **97**, 531.

Recibido el 23 de enero de 2004

Aceptado para su publicación el 29 de marzo de 2004

EL PRINCIPIO DE MAUPERTUIS. UN ENSAYO PARA UNA ACADEMIA

por

William A. Ponce¹

Resumen

William A. Ponce: El principio de Maupertuis. Un ensayo para una Academia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **xx** (xx): xxx–xxx, 2003. ISSN 0370-3908.

El físico y matemático francés **Pierre Louis de Maupertuis** enunció, en 1744 ante la academia de ciencias de París y dos años más tarde ante la Academia de Ciencias de Prusia, uno de los principios más fundamentales de las ciencias naturales: el principio de mínima acción. En este ensayo hacemos un recuento histórico de este principio desde sus orígenes en la escuela de Mileto, hasta sus más recientes aplicaciones en la Química y en la Mecánica Cuántica.

Palabras clave: Mínima acción, mecánica cuántica.

Abstract

The French physicist and mathematician **Pierre Louis de Maupertuis** enunciated, in 1744 at the Paris Academy of Sciences and two years later at the Prussian Academy of Sciences, a scientific dictum that was destined to gain greatest prominence in natural sciences: the famous principle of least action. In this essay we present an historical review of this principle from its beginning at the Milesian School, until its most recent applications in Chemistry and Quantum Mechanics.

Key words: Minimal action, Quantum Mechanics

1. Enunciado del Principio

En el año de 1744 el físico y matemático francés **Pierre Louis Moreau de Maupertuis** (Saint Malo, 1698-Basilea, 1759) presentó, ante los miembros de la Academia de Ciencias de París y dos años más tarde ante los

miembros de la Academia de Ciencias de Prusia, el principio de la mínima cantidad de acción. En el más estricto sentido Platónico y Pitagórico y dentro del espíritu de las teorías de **Leibniz**, enunció que “*la Nature, dans la production de ses effects, agit toujours par les moyens*

¹Instituto de Física, Universidad de Antioquia, A.A. 1226. Medellín, Colombia. e-mail: wponce@fisica.udea.edu.co

le plus simples” [9], simplicidad que induce la naturaleza a que actúe de tal manera que, una cierta cantidad que el llamó acción, tome valores mínimos. En sus propias palabras: “*Lorsqu’il arrive quelque changement dans la Nature, la quantité d’action, nécessaire pour ce changement, est la plus petite qu’il soit possible*” [9]. Igualmente Maupertuis postuló que la acción debe ser función de la masa, la velocidad y la distancia.

Formulado de la manera anterior, el principio de Maupertuis tiene más un carácter metafísico que físico, sin embargo contiene el sustrato de uno de los principios más fundamentales de las ciencias naturales, como veremos en el resto de este estudio.

2. Los Antecedentes.

El filósofo **Herón** de la escuela neoplatónica de Alejandría, fué el primero en formular por allá por el año 125 a.c., y de manera matemática, un principio de mínima acción aplicado a la luz y a su reflexión especular. En su tratado de los espejos planos y curvos llamado “La Catóptrica” (atribuido antiguamente a Tolomeo), **Herón** mostró, haciendo uso de la geometría, que cuando un rayo de luz es reflejado por un espejo, la trayectoria que este sigue del objeto al ojo del observador, es más corta que cualquier otra trayectoria posible. De aquí concluyó que la luz se mueve de un lugar a otro en línea recta y que en la reflexión, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Es asombroso que este principio aún esté vigente y aparezca en los textos de óptica sin hacer siquiera mención a su origen.

Hoy podemos mirar el razonamiento de **Herón** como la consecuencia y el desarrollo lógicos de las doctrinas pitagóricas, las cuales tienen sus raíces en análisis hechos por la **Escuela de Mileto** allá por los años 600-520 a.c. (Tales, Anaximandro, Anaxímenes y Aristides). Estos Fisiologistas Iónicos postularon la existencia de un sustrato único del cual se derivaban todas las sustancias que componían el cosmos.

Por su parte **Pitágoras** (c. 530 a.c.) y los pitagóricos (Platón y Aristóteles) consideraron que los números eran las entidades fundamentales que gobernaban el universo. En especial la tetralogía de la decena expresada por la igualdad $1+2+3+4=10$ les permitía alcanzar la perfección implícita en el contexto del número 10. Así pues, **Pitágoras** utilizando los números enteros obtiene las leyes fundamentales de la acústica, las que junto con la geometría le permite formular la armonía de las esferas, en donde los cuerpos celestes, perfectamente esféricos, giran en órbitas simétricas produciendo una

armonía de belleza trascendental a la cual el ser humano ha crecido sordo.

La tetralogía de la decena llevó también a los pitagóricos a formular la astronomía. Según esa ciencia, a las estrellas fijas en el cielo se le sumaban los 10 planetas: siete esferas pesadas moviéndose en círculos (figuras geométricas perfectas) a las cuales se les sumaba la tierra y dos cuerpos celestes más, no visibles llamados Hetsia y Contratierra.

De esta manera los primeros físicos: **Arquímedes, Herón y Tolomeo**, basaron sus descubrimientos en principios de simplicidad, uniformidad y orden, los que conllevan implícito el principio de perfección y de economía de la naturaleza en su evolución.

Muchas de estas ideas de los pitagóricos fueron retomadas por los escolásticos en la edad media y no es de extrañarnos que uno de los defensores más acérrimos que ha tenido en todos los tiempos el postulado de simplicidad haya sido el clérigo **William de Ockham** (c. 1300-1347) quien afirmaba categóricamente la inutilidad de emplear varios principios cuando se tenía que con uno era suficiente. Claro, todo esto en el marco de la Teología y de la Ontología, las ciencias fundamentales de la edad media.

De esta manera llegamos al siglo XVII y encontramos la primera formulación de un principio de mínima acción por el matemático francés **Pierre de Fermat**, (Beaumont de Lomagne, 1601-Castres, 1665) quien afirmaba que sin importar a que clase de reflexión o de refracción estaba sometido un rayo de luz, este viajaba de un lugar a otro de tal manera que el tiempo empleado en hacerlo era mínimo (el razonamiento de **Herón** se refería solo al caso particular de la reflexión especular). Vale la pena anotar que tanto **Herón** como **Fermat** llegaron a sus conclusiones de una manera intuitiva y no como resultados de observaciones experimentales.

Un análisis matemático preliminar de este principio lo hizo **Fermat** utilizando la óptica geométrica a cuyo desarrollo contribuyó ese autor grandemente. Sin embargo la demostración completa del principio le corresponde hacerla el astrónomo y matemático holandés **Cristian Huygens** (La Haya, 1629- íd. 1695) quien deduce, basado en la teoría ondulatoria de la luz, que el índice de refracción entre dos medios es igual al cociente de las velocidades de la luz en cada uno de ellos [6].

3. Formulación matemática.

El principio de mínima acción fué publicado por

primera vez como un teorema dinámico exacto en 1744 (el mismo año en que Maupertuis lo enunció en París) por el matemático suizo **Leonhard Euler** (Basilea, 1707-San Petersburgo 1783), quien se limitó al caso de una partícula puntual mecánica, moviéndose en una curva de un plano. Su afirmación consistía en que cuando una partícula se movía entre dos puntos fijos, lo hacía de tal manera que la cantidad $\int vds$ era mínima[2], donde v era la velocidad de la partícula y ds el elemento infinitesimal de línea. Asumiendo que la masa m de la partícula es una constante se puede escribir

$$\begin{aligned}
 S &= m \int vds = \int mvds \\
 &= \int pds = \int \sqrt{2m(E - V)}ds,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

donde p es el momentum lineal y E y V son las energías total y potencial respectivamente del sistema físico.

De esta manera **Euler** enunció como teorema matemático lo que para **Maupertuis** era solo una afirmación categórica.

El siguiente desarrollo le corresponde hacerlo al astrónomo francés de origen italiano **Joseph-Louis, conde de Lagrange** (Turin, 1736-París, 1813) quien en 1760 postula la existencia de una función $L(q, \dot{q}; t)$, donde q es una coordenada generalizada y \dot{q} es la derivada temporal de esa coordenada. Esto permitía escribir las ecuaciones de movimiento del sistema físico (ecuaciones de Newton) en la forma:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = 0,
 \tag{2}$$

conocida hoy en día como la ecuación de Euler-Lagrange. El concepto fundamental introducido aquí por **Lagrange** es el de coordenada generalizada[7], el cual trasciende el concepto de coordenadas cartesianas manejado por **Sir Isaac Newton**.

En este punto todas las ideas fundamentales estaban ya planteadas, sin embargo faltaba el desarrollo matemático más importante en este campo el cual le correspondió hacerlo un siglo después al matemático irlandés **Sir William Rowan Hamilton** (Dublin, 1805-Dunsink, 1865), quien obtuvo los siguientes resultados[4]:

- $L(q, \dot{q}; t) = E_K - V$, con E_K la energía cinética del sistema.
- Utilizando la anterior definición de L y la Ec.(2), fué solo un asunto de algebra probar la conservación de la energía.

- Definió la acción S como la constante $S = \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}; t)dt$.
- Mostró que al variar la coordenada generalizada en una cantidad δq y exigir que bajo esta variación la acción S permaneciera estacionaria ($\delta S = 0$), obtenía la ecuación de Euler-Lagrange (Ec. (2)), siempre y cuando se satisficieren las condiciones de frontera $\delta q(t_1) = \delta q(t_2) = 0$.
- Definió el momentum canónico conjugado a la variable q_r como $p_r = \partial L / \partial \dot{q}_r$ y redujo las n ecuaciones diferenciales de segundo orden para las n coordenadas generalizadas, a $2n$ ecuaciones diferenciales de primer orden.

El principio de mínima acción adquiere de esta manera su formulación matemática definitiva, teniendo la capacidad de reproducir las ecuaciones de movimiento de la mecánica clásica y sus leyes de conservación. El movimiento de un sistema mecánico está pues completamente determinado por el principio de mínima acción: resolviendo las ecuaciones del movimiento que se deducen de este principio, se puede hallar la forma de la trayectoria, así como la posición sobre la trayectoria en función del tiempo.

Aunque el cuadro estaba completo, aún faltaba un desarrollo más, el cual le correspondió hacerlo al matemático alemán **Karl Gustav Jacob Jacobi** (Postdam, 1804-Berlín, 1851) quien mostró que la evolución temporal de la acción S estaba dada por una ecuación diferencial de primer orden llamada la ecuación de Hamilton-Jacobi, la cual es

$$\frac{\partial S}{\partial t} + H(q_r, p_r = \partial S / \partial q_r, t) = \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla_q S)^2}{2m} + V = 0,
 \tag{3}$$

y que la diferencial total de la acción como función de las coordenadas y del tiempo se puede expresar como

$$dS = \sum_r p_r dq_r - H dt,
 \tag{4}$$

donde H es la función principal de Hamilton o Hamiltoniana la cual está definida via una transformación de Legendre como $H = \sum_r q_r p_r - L$. Nótese la similitud que presenta la ecuación (3) de Hamilton-Jacobi con la ecuación de Schrödinger de la Mecánica Cuántica, similitud que vamos a elaborar más adelante.

Finalmente anotemos que bajo la suposición que la Lagrangiana (y por tanto la Hamiltoniana) de un sistema mecánico no dependen explícitamente del tiempo, $H(p_r, q_r) = E$ es la energía total del sistema, una constante, en cuyo caso la acción de Hamilton-Jacobi se reduce a la acción de Euler en la Ec.(1), llamada la acción reducida en la literatura moderna.

4. Aplicaciones en la física clásica

4.1. Formulación relativista. Que la energía cinética se exprese como $m\dot{q}^2/2$ es solo una aproximación para el caso en que $\dot{q} \ll c$, con c la velocidad de la luz en el vacío (una constante universal). El utilizar esta expresión para la energía cinética conduce a expresiones incompatibles con la teoría de la relatividad especial.

Una fórmula para la energía cinética compatible con la relatividad especial sería:

$$E_{KR} = m_0 c^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right), \quad (5)$$

la cual, con m_0 la masa en reposo de la partícula, corresponde a la expresión relativista de la energía cinética. De esta manera una Lagrangiana covariante se debe escribir como $L = E_{KR} - V$ quedando el Hamiltoniano invariante.

4.2. Aplicación a la electrodinámica. La ecuación de movimiento de una partícula cargada en un campo electromagnético está dada por la fuerza de Lorentz la cual podemos escribir como:

$$\dot{\mathbf{P}}' = e[\mathbf{E} + \frac{1}{c}(\dot{\mathbf{r}} \times \mathbf{H})] = e[-\nabla\phi - \frac{d\mathbf{A}}{cdt} + \sum_s \frac{\dot{x}_s}{c} \nabla A_s], \quad (6)$$

donde \mathbf{E} y \mathbf{H} son el campo eléctrico y magnético respectivamente, \mathbf{P}' es la variable canónica conjugada a \mathbf{r} y e es la carga eléctrica de la partícula. En el lado derecho de la Ec.(6) se ha expresado la fuerza de Lorentz en función de los potenciales escalar ϕ y vectorial \mathbf{A} , los cuales están relacionados con \mathbf{E} y \mathbf{H} por las ecuaciones $\mathbf{E} = -\nabla\phi - \partial\mathbf{A}/\partial(ct)$ y $\mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A}$.

Para obtener la Ec.(6) como una consecuencia de las ecuaciones de Euler-Lagrange necesitamos definir un Lagrangiano de la forma:

$$L = E_{KR} - e\phi + \frac{e}{c} \mathbf{A} \cdot \dot{\mathbf{r}}, \quad (7)$$

con E_{KR} dado en la Ec.(5). Este Lagrangiano nos permite calcular el momentum canónico conjugado a la variable \mathbf{r} como $\mathbf{P}' = \mathbf{p} + \frac{e}{c} \mathbf{A}$; [$\mathbf{p} = m\dot{\mathbf{r}}(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$]. Un álgebra sencilla nos permite entonces hallar la fuerza de Lorentz (6) utilizando el Lagrangiano L en (7) via las ecuaciones de Euler-Lagrange, para $q_a = (x, y, z)$ en coordenadas cartesianas.

4.3. Otras Aplicaciones. El principio de mínima acción se ha aplicado en casi todas las áreas de la física clásica. Sin entrar en detalles, mencionemos solo que el

principio se ha aplicado de manera exitosa en la teoría de la elasticidad, en hidrodinámica, en astrofísica, en relatividad general y en la termodinámica.

5. Generalizaciones matemáticas

Varias generalizaciones matemáticas al principio de mínima acción son posibles. Veamos enseguida dos de ellas.

5.1. Caso de varias variables. Para generalizar el problema consideremos el caso de una función de n variables independientes t_1, t_2, \dots, t_n y l variables dependientes q_1, q_2, \dots, q_ℓ y partamos de la función

$$f(t_1, t_2, \dots, t_n, \partial q_1/\partial t_j, \partial q_2/\partial t_j, \dots, \partial q_l/\partial t_j,) \equiv f(t_i, \partial q_a/\partial t_j),$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n; a = 1, 2, \dots, \ell.$$

Nuestra intención es hallar funciones $q_1 = q_1(t_i)$, $q_2 = q_2(t_i)$, \dots , $q_\ell = q_\ell(t_i)$ para las cuales

$$\int dt_1 dt_2 \dots dt_n f(t_i, \partial q_a/\partial t_j)$$

es estacionaria con respecto a pequeñas variaciones $\delta q_1, \delta q_2, \dots, \delta q_\ell$ de las variables dependientes. La integral debe ser tomada sobre una región fija de las variables independientes y los valores de las variables dependientes en la frontera de esa región se consideran fijos. Las ℓ ecuaciones de Lagrange para este problema están dadas por

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial t_i} \left(\frac{\partial f}{\partial (\partial q_a/\partial t_i)} \right) - \frac{\partial f}{\partial q_a} = 0, \quad (8)$$

que constituyen un conjunto de ℓ ecuaciones lineales para $a = 1, 2, \dots, \ell$.

5.2. Caso de variables continuas. Supóngase que en lugar de tener un conjunto finito (o infinito contable) de variables discretas q_a , $a = 1, 2, 3, \dots$ lo que tenemos es una función $\phi(x)$ que depende de una variable real y continua x . Además supongamos que existe una densidad funcional $F(\phi, \dot{\phi}, \partial\phi/\partial x; t)$, la cual nos permite definir la integral $I = \int dx dt F(\phi, \dot{\phi}, \partial\phi/\partial x; t)$ que es estacionaria ($\delta I = 0$) bajo la transformación $\phi \rightarrow \phi' = \phi + \delta\phi$.

La aplicación directa del cálculo de variaciones desarrollado en los numerales anteriores nos permite llegar ahora a la siguiente ecuación de Euler-Lagrange, la cual se aplica cuando los grados de libertad son continuos:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial F}{\partial \dot{\phi}} + \frac{d}{dx} \frac{\partial F}{\partial \partial\phi/\partial x} - \frac{\partial F}{\partial \phi} = 0. \quad (9)$$

Lo anterior es la manera de aplicar el principio de mínima acción para lo que llamamos un campo $\phi(x)$ el cual depende de una sola variable x . El análisis anterior se puede generalizar a una función de tres (o mas) variables $\phi(x, y, z)$, obteniéndose una ecuación similar a la ecuación (9) en la que el término central toma la forma $\nabla \cdot [\partial F / \partial (\nabla \phi)]$.

6. Aplicaciones en la física moderna

6.1. Usos en mecánica cuántica antigua. La vieja teoría cuántica tiene sus orígenes en el modelo que ideó **Max Planck** para explicar la radiación del cuerpo negro, la explicación del efecto fotoeléctrico hecha por **Albert Einstein** y en el modelo atómico de **Niels Bohr**. En las tres explicaciones se parte de la hipótesis que la radiación electromagnética está cuantizada y que es un múltiplo de $h\nu$, donde ν es la frecuencia de la radiación y h es una constante universal llamada la constante de Planck.

Esta cuantización de la radiación electromagnética se puede derivar del principio de **A. Sommerfeld**[11] y **W. Wilson**[12] quienes postulan que la acción S asociada con la emisión de esa radiación no solo es estacionaria (una constante) si no que es un múltiplo de h . Es decir:

$$S = \oint pdq = nh, \tag{10}$$

con $n = 1, 2, 3, \dots$ un número entero. De esta manera nuestra conocida integral de acción entra en la teoría cuántica.

6.2. Usos en mecánica cuántica moderna. Para empezar supongamos que se tiene un sistema físico cuya acción está dada por

$$S = -i\hbar \ln \psi(x, y, z; t) \tag{11}$$

en donde $\hbar = h/2\pi$ es constante. La ecuación de Hamilton-Jacobi para esta acción toma entonces la forma:

$$-i\hbar \psi \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{\hbar^2}{2m} \nabla \psi \cdot \nabla \psi + V\psi^2 = G(\psi, \dot{\psi}, \nabla \psi, t) = 0. \tag{12}$$

Esta ecuación que se aplica cuando la acción S es real, debe modificarse cuando la acción (y la función ψ) es una función compleja. Proponemos entonces considerar

la siguiente ecuación para el caso de una función compleja ψ de variables reales x, y, z :

$$-i\hbar \psi^* \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{\hbar^2}{2m} \nabla \psi^* \cdot \nabla \psi + V\psi^* \psi = G(\psi, \psi^*, \dot{\psi}, \dot{\psi}^*, \nabla \psi, \nabla \psi^*; t) = 0. \tag{13}$$

Si pedimos ahora que

$$\int dV dt G'(\psi, \psi^*, \dot{\psi}, \dot{\psi}^*, \nabla \psi, \nabla \psi^*; t) = 0$$

(sea estacionaria), con $G' = G + a \frac{\hbar^2}{2m} \nabla \cdot (\psi \nabla \psi^* - \psi^* \nabla \psi)$, $dV = dx dy dz$ y variamos de manera independiente ψ y ψ^* , entonces la aplicación de la ecuación (9) para ψ^* y $a = 1$ nos produce la ecuación:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V\psi, \tag{14}$$

la cual es la ecuación de Schrödinger para un sistema físico descrito por la función de onda

$$\psi = e^{(iS/\hbar)}. \tag{15}$$

Este resultado sorprendente no es más que la equivalencia que se da entre la ecuación de Hamilton-Jacobi y la ecuación de Schrödinger en un mundo controlado por un principio general de mínima acción. De esta manera hemos derivado la ecuación de Schrödinger bajo la hipótesis que la acción de todo sistema físico está dada por una función compleja de la forma que aparece en la ecuación (11).

7. Desarrollos contemporáneos

De la función de onda en la Ec.(15) podemos derivar toda la mecánica cuántica. Veamos:

7.1. Aproximación semiclásica. Si en la función de onda $\psi(x) = \exp[iS(x)/\hbar]$ se toma $S = S_{clas} = \int \sqrt{2m(E - V)} dx$, se obtiene la llamada aproximación WKB de la mecánica cuántica o también llamada aproximación semiclásica, la cual es de gran utilidad cuando se trabaja con sistemas físicos de números cuánticos muy grandes. Un estudio completo y pedagógico de esta aproximación y algunas de sus aplicaciones se puede encontrar en el capítulo VII del libro de “Mecánica Cuántica. Teoría no Relativista” de **L. D. Landau** y **E. M. Lifshitz** [8].

7.2. Derivación de la integral de trayectoria. Hoy creemos que el modelo matemático más correcto y que nos permite describir de manera adecuada el micromundo, es el conocido en la literatura científica como “la integral de trayectoria”. En esta sección haremos una

derivación de esa técnica haciendo uso de los resultados anteriores.

Si en la evolución de un sistema físico unidimensional desde el punto $x_I(t_I)$ hasta el punto $x_{II}(t_{II})$ postulamos que todas las trayectorias matemáticas son posibles e igualmente probables, entonces la función de onda asociada a una cualquiera de esas trayectorias estará dada por $\psi(x) = \exp[iS_{tr}(x)/\hbar]$ donde $S_{tr} = \int_{t_I}^{t_{II}} L(x, \dot{x}; t) dt$ es la acción asociada con esa trayectoria (nótese que en general $\delta S_{tr} \neq 0$ ya que la acción que es mínima es una sola, la cual es S_{clas} , la acción de la trayectoria del sistema clásico).

De conformidad al principio de superposición de la mecánica cuántica (véase el Capítulo I de la Ref. [8]) tenemos que para un tiempo arbitrario t_r tal que $t_I < t_r < t_{II}$, un estado cualquiera del sistema físico podemos escribirlo como $|\rangle = \int dx_r \psi(x_r, t_r) |x_r\rangle$, donde $\psi(x_r, t_r)$ es la función de onda del sistema físico en el tiempo t_r y $|x_r\rangle$ representa un estado físico en la posición x_r en cualquier instante de tiempo (llamado en la literatura un estado estacionario).

Dividiendo ahora el intervalo de tiempo entre t_I y t_{II} en un número entero n de intervalos iguales $[\Delta t = (t_{II} - t_I)/n]$, entonces

$$|x_{r+\Delta t}\rangle \approx \int dx_r \psi(x_{r+\Delta t}) |x_r\rangle = \int dx_r \exp\left(\frac{i}{\hbar} \int_{t_r}^{t_r+\Delta t} L dt\right) |x_r\rangle, \quad (16)$$

en donde la aproximación se convierte en una igualdad para el caso en que $n \rightarrow \infty$.

Iterando dos veces la ecuación anterior podemos escribir

$$|x_{(r+2\Delta t)}\rangle \approx \int dx_r \int dx_{(r+\Delta t)} \psi(x_{r+\Delta t}) \psi(x_{\Delta t+2\Delta t}) |x_r\rangle \quad (17) \\ = \int dx_{(r+\Delta t)} dx_r \exp\left(\frac{i}{\hbar} \int_{t_r}^{t_r+2\Delta t} L dt\right) |x_r\rangle.$$

Iterando un número infinito de veces obtenemos que la amplitud de transición entre el estado $|x_I(t_I)\rangle$ y el estado $|x_{II}(t_{II})\rangle$ está dada por la integral múltiple (infinitas trayectorias cada una subdividida en infinitos infinitesimales):

$$\langle x_{II} | x_I \rangle = \frac{1}{N} \int \int \dots \int \exp\left[\frac{i}{\hbar} \int_{t_I}^{t_{II}} L dt\right] \delta x_r(t) \quad (18)$$

donde $\delta x_r(t) = dx_1 dx_2 dx_3 \dots$ un número infinito de infinitesimales sobre los que tenemos que integrar. El factor $1/N$ es un factor combinatorio que se obtiene por normalización.

La integral que aparece en la ecuación (18) es una integral de un número infinito no contable de variables y es conocida en la literatura matemática como la medida de Winner (generalización de la llamada medida de Lebesgue) y supone técnicas matemáticas de análisis funcional que están fuera de este ensayo, pero que son bastante bien conocidas en la literatura científica.

Esta técnica de integrales de trayectoria, introducida por primera vez en la mecánica cuántica por **P.A.M. Dirac**[1], desarrollada en su trabajo de tesis doctoral por **Richard P. Feynman**[3] y elaborada posteriormente por **J. Schwinger**[10], es la manera correcta de trabajar la mecánica cuántica de cualquier sistema físico.

La forma de calcular la integral en la ec.(18) y de derivar de ella toda la mecánica cuántica se encuentra desarrollada de una manera didáctica y elegante en el libro de **R. P. Feynman** y **A. R. Hibbs** publicado en 1965[3].

7.3. Aplicaciones a la termodinámica y a la química. Han sido varios los intentos de derivar algunos principio termodinámicos de un principio variacional. **Helmholtz** por ejemplo presentó ante la academia de ciencias de Berlín una derivación de la segunda ley de la termodinámica de un principio variacional, a través de una analogía mecánica[5]. Igualmente mostró que para procesos reversibles, la función de Lagrange es equivalente a la energía libre de Helmholtz.

Más recientes han sido las aplicaciones en la química, en donde al considerar las reacciones químicas como el movimiento de un punto a lo largo de un espacio matemático de reacción unidimensional η , es posible identificar, para procesos no reversibles y acelerados, la energía libre de Gibbs G como la función de Lagrange[12]. En este caso G es función de η , su velocidad $v = d\eta/dt$, de su aceleración $\dot{v} = d^2\eta/dt^2$ y del tiempo t . Lo anterior nos conduce a definir un momento químico como $p_{ch} = \partial G / \partial v$.

8. Conclusiones

Para terminar este ensayo quiero resaltar la belleza extrema e inspiradora que constituye el hecho que, todas las leyes fundamentales de la física clásica puedan

entenderse en términos de una construcción matemática llamada la acción. Las ecuaciones de movimiento y las leyes de conservación son aquellas que se derivan de minimizar dicha acción.

Igualmente y como se mostró en la sección anterior, es posible, aunque con una matemática un poco más sofisticada, derivar los principios fundamentales de la Mecánica Cuántica, en donde la ecuación de Schrödinger aparece como una consecuencia de aplicarle la condición de Euler-Lagrange a la ecuación de Hamilton-Jacobi para una acción específica, la cual juega un papel fundamental en la derivación de la integral de trayectoria.

Es importante resaltar que la equivalencia mostrada en el texto principal entre la ecuación de Schrödinger y la ecuación de Hamilton-Jacobi es, hasta donde este autor conoce, inédita en la literatura científica. De ser así, entonces la derivación de la Integral de trayectoria como se hace en la sección 7.2, tiene también un grado alto de originalidad.

Referencias

- [1] **Dirac P. A. M.**, “*The principles of Quantum Mechanics*”, (Oxford U. Press, Oxford, England, First Edition, 1947)
- [2] **Euler L.**, “*Methodus inveniendi lineas curvas maximi minime proprietate gaudentes, additamentum II*” (Opera omnia, Editor C. Carathéodory, París, 1952), series I, vol. 24, pp. LII-LV, 298-308.
- [3] **Feynman R. P. and Hibbs A. R.**, “*Quantum Mechanics and Path Integrals*” (McGraw Hill B.C., New York, First Edition, 1965).
- [4] **Hamilton W. R.**, “*On a general method in dynamics*”, Trans. Roy. Soc., (1834), 247; “*Second essay on a general method in dynamics*”, *ibid.*, (1835), 35.
- [5] **Helmholtz H.**, “*Zur Geschichte des Princips der kleinsten Action*”, (Sitzungsber d. Akad. d. Wiss. z. Berlin), Crelle Journal, **100**, (1887), 225.
- [6] **Huygens C.**, *Treatise on Light*, traducido al inglés por S. P. Thompson, pp. 42-45 (1922).
- [7] **Lagrange J. L.**, “*Application de la méthode exposée dans le mémoire précédent à la solution de différents problèmes de dynamique*” (Miscellanea Taurinesia, 1760-61), Oeuvres, tome I.
- [8] **Landau L. D. and Lifshitz E. M.**, “*Quantum Mechanics, Non-Relativistic Theory*” (Addison-Wesley P. C., New York, Second Edition, 1965), PP. 158-187.
- [9] **Maupertuis L.**, “*Accord de différents lois de la nature*”, obras completas, en 4 tomos (1768). Essai de cosmologie, tomo I. Recherche des lois du mouvement, tomo IV.
- [10] **Schwinger J.**, *Phys. Rev.* **82**, (1951), 914.
- [11] **Sommerfeld A.**, *Ann. der Phys.*, **51**,(1916), 1.
- [12] **Wilson W.**, *Phil. Mag.*, **29**,(1915), 795.
- [12] **Yourgrau W., and Raw C. J. G.**, *Nature*, **181** (1958), 480.

Recibido el 18 de noviembre de 2003

Aceptado para su publicación el 18 de febrero de 2004

EL MÉTODO MONTE CARLO COMO HERRAMIENTA PARA EVALUAR POROSIDAD EN CARBONES ACTIVADOS

por

Juan F. Orrego*, Jhon J. Fernández** & Fanor Mondragón***

Resumen

Orrego, J.F., J.J. Fernández & F. Mondragón: El método Monte Carlo como herramienta para evaluar porosidad en carbones activados. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **28** (108): 371-384, 2004. ISSN: 0370-3908.

Se construyó un algoritmo Monte Carlo (MC) para obtener isothermas simuladas de la adsorción de nitrógeno sobre carbones activados, usando un modelo de poro tipo grieta cuyas paredes son láminas de carbono tipo grafito. Se evaluó el efecto de algunas variables como la densidad del material y el número de láminas de carbono. Las isothermas simuladas se utilizaron para obtener la distribución de tamaño de poro de algunos carbones activados preparados, los resultados fueron similares a los obtenidos usando un programa comercial basado en teoría de funcionales de densidad (DFT).

Palabras clave: Carbones activados, porosidad, distribución de tamaño de poro, simulación Monte Carlo.

Abstract

A Monte Carlo algorithm was developed in order to simulate nitrogen adsorption isotherms on active carbons. The pore was modeled by a slit-shaped cavity formed by graphitic carbon layers. The density of solid and the number of layers were optimized. The pore size distribution was obtained using the simulated isotherms of some active carbons obtained in the laboratory. The results were compared with those of a commercial software using density functional theory.

Key words: Active carbons, porosity, pore size distribution, Monte Carlo simulation.

* Grupo: Química de Recursos Energéticos y Medio Ambiente. Instituto de Química, Universidad de Antioquia, A.A. 1226 Medellín, Colombia. *jfom04@matematicas.udea.edu.co

** jfernand@catios.udea.edu.co

*** fmondra@quimbaya.udea.edu.co

Introducción

Los carbones activados son materiales con alta área superficial interna y de gran uso a nivel de laboratorio e industrial. Algunas técnicas de caracterización de los carbones activados involucran la adsorción física de gases como N_2 o CO_2 a 77 y 273 K respectivamente (Gregg *et al.*, 1982). El término adsorción fue aparentemente introducido por Kayser (Basal *et al.*, 1988) en 1881 para connotar la condensación de gases sobre superficies libres. En particular la adsorción física ahora es definida como el enriquecimiento de uno o más componentes en una capa interfacial. El fenómeno de la adsorción involucra la naturaleza del adsorbente (sólido poroso), del adsorbato (gas utilizado), la temperatura y la presión del sistema.

El problema existente con los sólidos y en particular con su superficie es que no es posible conocer de manera absoluta sus características. En cambio, cuando se utilizan modelos se tiene una aproximación al conocimiento de las propiedades de superficie y de esta manera se puede analizar en condiciones controladas cada una de las variables que afectan el comportamiento del sistema. Con la combinación de los datos simulados y experimentales, se puede encontrar la relación que existe entre el comportamiento de la fase adsorbida (adsorción física) con las características superficiales de los sólidos. Si bien este proceso implica un buen número de simulaciones y su posterior integración, el tiempo de cálculo es muy poco comparado con el tiempo equivalente de laboratorio lo que implica reducción de costos económicos y ambientales.

Los métodos de simulación mas utilizados en la actualidad para el estudio de los procesos de adsorción son Monte Carlo (MC), la técnica de dinámica molecular (DM) y la teoría de funcionales de densidad (DFT) (Frenkel *et al.*, 2002; Gubbins *et al.*, 1996; Ravikovitch *et al.*, 2000). Los métodos de dinámica molecular se basan en la resolución de problemas de N-partículas de la mecánica clásica, en función del tiempo, mientras que el método Monte Carlo se basa en la integración de las ecuaciones de la mecánica estadística, mediante el cálculo de las propiedades de interés para un número grande de puntos del espacio considerando las fases aleatoriamente seleccionadas y el correcto promedio de la propiedad. Los cálculos utilizando teoría de funcionales de densidad se basan en la termodinámica de la interacción entre moléculas de adsorbato y adsorbente utilizando las ecuaciones de la mecánica estadística y evaluando la densidad de partículas a medida que se cambia la distancia a la superficie con la que están interactuando.

Existen dos aproximaciones basadas en el uso de las ecuaciones de la mecánica estadística correspondiente al conjunto canónico y gran canónico. En el conjunto canónico se mantienen constantes la temperatura, el volumen y el número de partículas; mientras en el gran canónico se mantienen constantes el potencial químico, la temperatura y el volumen. Las simulaciones en el conjunto gran canónico permiten obtener isothermas de adsorción y en el conjunto canónico la determinación precisa del calor de adsorción, configuración de la fase adsorbida, parámetros de orden y orientaciones del adsorbato con respecto a la superficie. En general se utilizan los dos formalismos con el fin de obtener la mayor cantidad de información posible.

La simulación molecular utilizando el método Monte Carlo es una poderosa herramienta para el entendimiento de la adsorción de un fluido sobre un material altamente microporoso, tal como lo son los carbones activados. Este trabajo comprende la elaboración de un algoritmo que describa la adsorción de un gas sobre un poro idealizado de un carbón activado mediante el método Monte Carlo, en el conjunto gran canónico (GCMC), que dé información básica de la adsorción y características de la porosidad del sólido sometido a una adsorción experimental. Las isothermas simuladas se utilizaron para calcular la distribución de tamaño de poro (DTP) de dos carbones activados preparados, cuyos perfiles fueron comparados con los calculados a través de un "software" comercial que trabaja con DFT (Webb *et al.*, 1996).

Estrategia computacional

Modelo ideal de porosidad en un carbón activado

Dado que las simulaciones consisten en el estudio de un conjunto de moléculas que interactúan entre sí y con un sólido, siempre se requiere la descripción de dicho sólido con un modelo apropiado. El problema surge cuando el material real, cuyas propiedades desean simularse no presenta una estructura definida. Tal es el caso de los materiales carbonosos como los carbones activados; en éste caso la estructura de los materiales reales no es plenamente conocida y existe más de un modelo capaz de explicar para cada uno determinadas propiedades.

La mayoría de los modelos a nivel molecular de los carbones activados presentan la estructura porosa como una colección de poros tipo grieta (Ravikovitch *et al.*, 2000) con paredes lisas formadas entre láminas planas infinitas de grafito (Bottani 1996; Gubbins *et al.*, 1996), o entre planos perfectos de varias capas de grafito infinitas (McEnaney *et al.*, 1998). Considerando la estructura

de capas del grafito, el supuesto de poro tipo grieta es razonable, sin embargo, este modelo es una representación idealizada de la macroestructura desordenada de muchos de los adsorbentes carbonosos.

Estudios de microscopía electrónica y difracción de electrones muestran que partes de la microestructura de los adsorbentes carbonosos consisten de pequeños apilamientos de dos o tres capas planas de grafito en una orientación aproximadamente paralela, con espacios entre las capas, Δ , un poco más grandes que aquellos encontrados en un simple cristal de grafito ($\Delta = 0.3354$ nm). Los anchos de las capas planas del material carbonoso varían de 2–10 nm y ellas no son infinitas como implica el modelo de poro del material carbonoso. La densidad del material carbonoso, ρ_c , puede ser tomada en el rango de 1.9–2.1 g/cm³, pues su estructura desordenada le confiere una densidad menor que la densidad de un cristal perfecto de grafito, $\rho_c = 2.27$ g/cm³ (Bansal *et al.*, 1988; McEnaney *et al.*, 1998).

La Figura 1 muestra el esquema del modelo de poro tipo grieta del material carbonoso. En este modelo el número de capas, n , puede variar de 1 a infinito, aunque de los estudios de difracción se obtiene que el rango $1 \leq n < 5$, es el más importante. El espacio entre capas Δ , puede variar en el rango $0.3354 \leq \Delta \leq 0.3980$ nm. La densidad de los átomos de carbono, ρ_a , en una capa plana perfecta de grafito es $\rho_a = 38.18$ átomos/nm². El desorden en las capas planas en los materiales carbonosos puede ser representado seleccionando un valor más bajo de ρ_a .

Potenciales de interacción

En las simulaciones por computador del proceso de adsorción, normalmente se asume que el proceso puede ser derivado de un modelo de poro para el material carbonoso

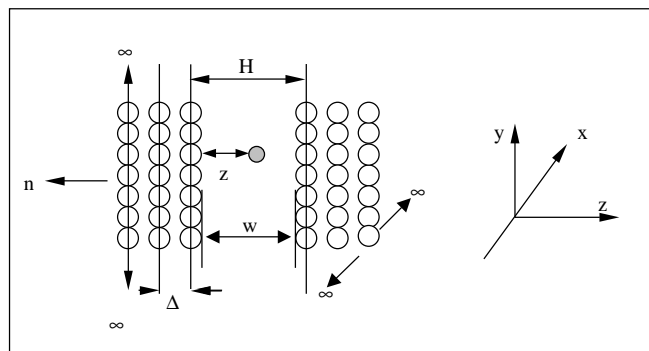


Figura 1. Modelo de poro: H es el ancho de poro, w el ancho de poro efectivo ($w = H - 3.4$ Å), donde 3.4 Å es el diámetro del átomo de carbono, Δ es el espacio entre capas, y n es el número de capas planas.

y de un potencial par intermolecular que representa la energía de interacción entre una molécula de fluido (adsorbato) en el poro y un átomo de carbono que constituye la pared del poro. La sumatoria o integración de las interacciones de las moléculas de adsorbato con todos los átomos de carbono en la pared del poro conduce a un potencial poro-fluido que puede ser usado en simulación molecular para obtener, por ejemplo, la isoterma de adsorción de un fluido en un modelo de poro con una amplitud dada.

El potencial par fluido-fluido (*ff*) que es adoptado comúnmente en simulación molecular, es un potencial (U_{ff}) Lennard-Jones (LJ) 12:6 (Bottani 1996; Cracknell *et al.*, 1993; Gubbins *et al.*, 1996; McEnaney *et al.*, 1998; Ravikovitch *et al.*, 2000; Setoyama *et al.*, 1998; Yin *et al.*, 1998). Éste potencial es útil para fluidos de moléculas neutras esféricas (gases inertes) o cuasi-esféricas (metano) donde el potencial par depende solo de la distancia r de separación entre las partículas.

$$U_{ff} = 4\epsilon_{ff} \left[\left(\frac{\sigma_{ff}}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma_{ff}}{r} \right)^6 \right] \quad (1)$$

Donde ϵ_{ff} y σ_{ff} son los parámetros del potencial. ϵ_{ff} define el mínimo del pozo de potencial y σ_{ff} es la distancia a la cual el potencial se anula; es decir, la distancia de máxima aproximación.

Los parámetros LJ para el potencial sólido-fluido (*sf*) pueden ser estimados mediante las reglas de combinación o reglas de Lorentz-Berthelot (Bottani 1996; McEnaney *et al.*, 1998), a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\epsilon_{sf} = (\epsilon_{ss} \cdot \epsilon_{ff})^{1/2}; \quad \sigma_{sf} = (\sigma_{ss} + \sigma_{ff})/2; \quad (2)$$

La expresión para σ_{sf} es exacta solo para esferas rígidas y la de ϵ_{sf} se obtiene de una interpretación simple de las fuerzas de dispersión de London; sin embargo éstas reglas no siempre arrojan valores adecuados para los parámetros LJ sólido-fluido. Se ha demostrado que se pueden presentar desviaciones muy importantes (hasta del 30%) con respecto de los valores correctos, por este motivo deben confirmarse los valores utilizados.

El potencial pared-gas, $U_{(z)pared}$, ecuación (3), como función de la distancia z a la pared del poro, se obtiene primero integrando el potencial LJ 12:6 Ecuación (1), sobre una capa plana infinita y luego sumando el potencial 10:4 integrado sobre los planos (n) en la pared del poro.

$$U_{(z)pared} = 2\pi\rho_a\epsilon_{sf}\sigma_{sf}^2 \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} \left[\frac{2}{5} \left(\frac{\sigma_{sf}}{z} \right)^{10} - \left(\frac{\sigma_{sf}}{z} \right)^4 \right] \right\}, \text{ con } z > 0 \quad (3)$$

Steele obtuvo una expresión para este potencial haciendo la integración para un número infinito de capas para la que obtuvo la siguiente aproximación (Gubbins *et al.*, 1996):

$$U_{(z)pared} = 2\pi\rho_a\varepsilon_{sf}\sigma_{sf}^2\Delta\left\{\frac{2}{5}\left(\frac{\sigma_{sf}}{z}\right)^{10} - \left(\frac{\sigma_{sf}}{z}\right)^4 - \frac{\sigma_{sf}^4}{3\Delta(0.61\Delta+z)^3}\right\}, \text{ con } z > 0 \quad (4)$$

donde Δ es la separación entre capas de grafito (= 0.335 nm), ρ_a es el número de átomos de carbono por unidad de volumen de grafito (114 nm⁻³) y z es la menor distancia de la molécula gaseosa a la superficie de la pared (tomando la superficie de la pared del carbón en el plano xy). Ecuaciones análogas se han trabajado para poros con distinta geometría tales como poros cilíndricos y esféricos. En este trabajo se utilizaron los parámetros Lennard-Jones que se encuentran en la Tabla 1 para evaluar el potencial, los cuales fueron validados y utilizados por (Ravikovitch *et al.*, 2000). Los efectos del la variación de estos parámetros sobre los perfiles de las isothermas de adsorción fueron estudiados por (Yin *et al.*, 1998), concluyéndose que el mayor impacto en los perfiles de las isothermas se da cuando se varía la densidad de átomos de carbono en la pared del poro y los parámetros Lennard-Jones.

El potencial poro-gas, $U_{(z)poro}$, ecuación (5), es simplemente la suma de los potenciales pared-gas de cada una de las paredes opuestas que componen el poro;

$$U_{(z)poro} = U_{(z)pared} + U_{(w-z)pared}, \quad 0 < z < w \quad (5)$$

Aplicación del método Monte Carlo

Muchas de las propiedades de equilibrio de un sistema involucran promedios sobre alguna función de coordenadas moleculares $A(x^N)$; donde $x^N = x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots$, representa las coordenadas de las moléculas (o partículas) 1,2,3,... i ,...; Tales promedios se pueden escribir como una integral sobre la función de distribución apropiada. En las simulaciones Monte Carlo el valor promedio se aproxima generando un gran número de configuraciones moleculares de prueba x^N , y reemplazando las integrales por sumas sobre un número infinito de configuraciones. La forma mas

confiable de hacerlo es elegir la configuración x^N aleatoriamente, de manera que se obtiene la ecuación (6).

$$\langle A \rangle = \frac{\sum_j A(j) \exp[-U(j)/k_B T]}{\sum_j \exp[-U(j)/k_B T]} \quad (6)$$

En esta ecuación las sumas se hacen sobre las distintas configuraciones j . Aunque este método podría dar la respuesta correcta si el número de configuraciones probadas es suficientemente grande, este no trabaja bien en la práctica, debido a que la inspección al azar comúnmente produce muchas configuraciones en las cuales la energía potencial intermolecular es positiva (repulsiva), así que el factor de Boltzmann es pequeño y la configuración hace una pequeña contribución al promedio. Esto es particularmente válido para sistemas densos, porque la puesta al azar de las moléculas induce la sobreposición molecular que es altamente improbable en un sistema real. Con el objeto de mejorar la eficiencia del cálculo, es necesario adoptar un sistema de inspección de algún tipo, usualmente llamado importancia del muestreo (o inspección).

Las configuraciones probadas más a menudo son aquellas que contribuyen más al promedio en la Ecuación (6). La aproximación más común usa el procedimiento de inspección Metrópolis (Díaz, 1979b; Frenkel *et al.*, 2002; Gubbins *et al.*, 1996) nombrado así en honor al pionero del trabajo en MC y descrito como sigue. Para muchas propiedades A , la integral en la Ecuación (6) será significativa cuando el factor de Boltzmann $\exp(-U/k_B T)$ sea alto. El esquema Metrópolis es tan ordenado que las configuraciones son probadas con probabilidades proporcionales al factor de Boltzmann. Para tal esquema el promedio de la Ecuación (6) puede aproximarse a:

$$\langle A \rangle = \frac{1}{n_c} \sum_{j=1}^{n_c} A(j) \quad (7)$$

donde n_c número total de configuraciones generadas y evaluadas.

El método para poner en práctica la probabilidad de la transición Metrópolis es el siguiente: una de las moléculas i se induce a un desplazamiento aleatorio Δr de su posición inicial a una nueva posición dentro de un cubo de lado L , centrado en la posición original de la molécula i ; se tiene libertad de elegir algún valor apropiado de L . Si L es muy pequeño muchas de las configuraciones probadas serán aceptadas, pero esto no podría mostrar todas las configuraciones posibles, mientras que si L es muy grande la mayoría de las configuraciones probadas serán rechazadas. En la práctica, a menudo L se ajusta de manera que cerca del 50% de los ensayos son aceptados.

Tabla 1. Parámetros de potencial utilizados para las interacciones fluido-fluido (ff) y sólido-fluido (sf).

Gas	ε_{ff}/k_B , (K)	σ_{ff} , Å	ε_{sf}/k_B , (K)	σ_{sf} , Å
N ₂ (LJ, MC)	101.5	3.615	53.22	3.494

Una vez el movimiento se ha hecho, la energía potencial intermolecular U_n se calcula junto con el cambio en el potencial, $\Delta U = U_n - U_m$. Si ΔU es negativo entonces el movimiento se acepta. Si ΔU es positivo entonces el movimiento se acepta con la probabilidad dada por la ecuación (8), se identifica la probabilidad de aceptar el movimiento por P_{mov} .

$$P_{mov} = \min[1, \exp(-\Delta U/k_B T)] \quad (8)$$

La decisión para aceptar o rechazar el movimiento en este último caso se hace asignando un número al azar ζ con $\zeta \leq \exp[-\Delta U/k_B T]$ un valor en el rango de 0 a 1. Si el movimiento se acepta; de otro modo se rechaza. Si el estado n se rechaza, entonces el antiguo estado m es de nuevo tomado como la nueva configuración de la serie.

Después de un período de espera para que los ensayos alcancen el equilibrio (comúnmente de 10^5 a 10^6 configuraciones) se lleva a cabo el promedio para obtener las propiedades sobre una serie subsiguiente de configuraciones cuya extensión esta normalmente entre $(1-10) \times 10^6$ configuraciones. El método descrito anteriormente, que se desarrolló para el ensamble canónico (N,V,T) ya esta extendido para los demás conjuntos de variables independientes mencionados anteriormente y entre los cuales esta el ensamble gran canónico (μ, V, T) y (N,P,T) o isotérmico-isobárico.

En el ensamble gran canónico (μ, V, T), como el número de moléculas no es una variable fija, ésta varía durante el transcurso de la simulación y se puede obtener información acerca del número promedio de partículas en el sistema como una función de las condiciones externas. En este ensamble además de que las partículas presentes en el sistema se pueden mover y evaluar, la probabilidad de aceptar el movimiento según la regla de aceptación de la ecuación (8), también se crean y se destruyen partículas en el sistema cuyas probabilidades de aceptación están dadas por las ecuaciones (9) y (10) respectivamente;

$$P_{crea} = \min\left[1, \frac{V}{\Lambda^3(N+1)} \exp((\mu - \Delta U)/k_B T)\right] \quad (9)$$

$$P_{dest} = \min\left[1, \frac{\Lambda^3 N}{V} \exp((- \mu - \Delta U)/k_B T)\right] \quad (10)$$

donde P_{crea} es la probabilidad de aceptar la creación, P_{dest} la probabilidad de aceptar la destrucción de una partícula, V es el volumen del sistema, N el número de partículas, μ el potencial químico y Λ es la longitud de onda de Broglie.

Condiciones de contorno periódicas

En el caso de la simulación de un fluido confinado en un pequeño poro se hace necesario utilizar condiciones de contorno periódicas con el fin de evitar los efectos que surgen de tomar una longitud de poro finita, cuyo valor de longitud en algunos casos será mucho menor comparado con uno real.

En las direcciones X y Y del modelo de poro se colocaron condiciones de contorno periódicas para trabajar en un poro de geometría infinita a lo largo de las direcciones X y Y, para un ancho de poro, H, definido en el eje Z del cubo de simulación, ver Figura 2. Las condiciones de contorno periódicas consisten en fijar un cuadro en el plano X y Y de longitud fija $L * L$ ($L = 10 \sigma_{ff}$), que esté rodeado por réplicas de él mismo por los cuatro lados del cuadro y los cuatro vértices dando origen a un toroide. Con las condiciones de contorno periódicas impuestas al sistema se debe asegurar, en el movimiento de las partículas, que cada vez que una partícula salga del cuadro de simulación esta sea reemplazada por otra del cuadro vecino, pues los cuadros vecinos también sufren el mismo tipo de movimiento de la partícula seleccionada del cuadro principal.

Corte de potenciales

La velocidad a la cual una simulación se desarrolla está determinada por el tiempo que toma en calcular el potencial intermolecular para cada configuración. En principio, el potencial de una molécula i es la suma de sus interacciones con todas las demás moléculas en el cuadro central y todas las imágenes del cuadro central. Éste cálculo

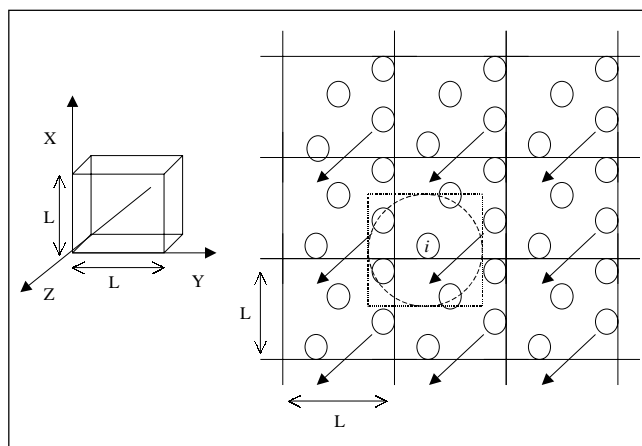


Figura 2. Condiciones de contorno periódicas y convención de los ejes de la celda de simulación. El círculo punteado denota el radio de corte para cálculo del potencial entre la molécula i dentro del cuadro central y las demás partículas.

lo consume gran cantidad de tiempo. En la práctica es común utilizar alguna distancia de corte esférica r_c e incluir solo las interacciones con las moléculas que están dentro del radio de corte r_c centrado en la molécula i ; para r mayores que este radio de corte el potencial es igual a cero.

$$\begin{aligned} U_c(12) &= u(12) & r &\leq r_c \\ U_c(12) &= 0 & r &> r_c \end{aligned} \quad (11)$$

donde $r = r_{12}$.

Configuración inicial

Para comenzar la simulación se pueden asignar posiciones a todas las moléculas dentro del sistema. En principio las propiedades en el equilibrio del sistema no deben depender del número inicial de partículas presentes en el sistema o de la disposición de ellas. En este contexto se podría empezar sin ninguna partícula en el sistema o con un número determinado de partículas.

Distribución de tamaño de poro

La distribución de tamaño de poro (DTP) se usa para describir la estructura interna de los carbones activados y otros adsorbentes porosos. Como tal, ésta caracterización asume que la compleja estructura interna del adsorbente puede ser descrita en términos de una colección equivalente de formas utilizando un modelo de poro. La aproximación entre la estructura modelo y la estructura real se basa en el seguimiento del fenómeno de adsorción, es decir una consideración que sume las diferentes isothermas locales propias del material.

Una consideración clave en la determinación del DTP es que se debe especificar una forma adecuada del modelo de poro, como también un método apropiado para calcular la adsorción localizada dentro de estos poros (Davies *et al.*, 1999a).

La DTP se puede entonces evaluar de la ecuación integral de adsorción:

$$N_{\text{exp}}(P_i) = \int_{w_{\text{min}}}^{w_{\text{max}}} \rho(w, P_i) f(w) dw \quad i = 1 \dots n \quad (12)$$

donde $N_{\text{exp}}(P_i)$ es la adsorción determinada experimentalmente a la presión P_i , $\rho(w, P_i)$ es la densidad adsorbida en un modelo de poro de ancho w_j a P_i , $f(w)$ es la distribución de tamaño de poro en función del ancho de poro y n es el número de mediciones para las distintas presiones en el análisis.

La función $f(w)$ de distribución de tamaño de poro formalmente se puede definir como:

$$f(w) = dV/dw \quad (13)$$

donde V es el volumen del poro por unidad de masa del adsorbente.

Hay varios aspectos que deben ser tomados en cuenta cuando se calcula la DTP a partir de la ecuación integral de adsorción. Dicha ecuación representa matemáticamente una integral de Fredholm de primer grado, de la cual interesa obtener $f(w)$, tal proceso de inversión de la integral no es directo y se debe recurrir a métodos de aproximación para calcular $f(w)$. La ventaja en este caso radica en que no interesa obtener la función $f(w)$ como tal sino una solución numérica de ella. Más aún, adoptar una forma analítica de la función de distribución $f(w)$ es muy peligroso, pues se está obligando a que la DTP tenga una forma restringida y no se puede excluir la posibilidad que la DTP pueda variar (Davies *et al.*, 1999b).

Incrementando la flexibilidad de la DTP también incrementa la complejidad o el número de parámetros a ajustar y desafortunadamente esta aproximación introduce nuevas dificultades. La inversión numérica actúa sobre una representación discreta de esta integral y soluciona la ecuación exactamente solo para aquellos puntos discretos.

El tamaño de poro para el cual la DTP se calcula, w_j^* , es definido como el ancho de poro promedio en cada intervalo.

$$w_j^* = w_j + \frac{\delta w_j}{2} \quad (14)$$

donde δw_j esta determinado por el intervalo, $\delta w_j = w_j - w_i$.

La integral de adsorción escrita en forma discreta toma la forma:

$$N_{\text{exp}}(P_i) \approx \sum \rho(w_j^*, P_i) f(w_j^*) \delta w_j \quad (15)$$

La ecuación (15) se puede reescribir compactamente en notación matricial, así:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A} \mathbf{W} \mathbf{f} \quad (16)$$

donde,

$$\begin{aligned} \mathbf{N} &= (N_{\text{exp}}(P_i))_{i=1 \dots n} \\ \mathbf{A} &= (\rho(w_j^*, P_i))_{i=1 \dots n, j=1 \dots m} \\ \mathbf{W} &= \text{diag}(\delta w_j)_{j=1 \dots m} \quad (17) \\ \mathbf{f} &= (f(w_j^*))_{j=1 \dots m} \end{aligned}$$

y la ecuación (16) la podemos describir como:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^* \mathbf{f}, \text{ donde: } \mathbf{A}^* = \mathbf{A} \mathbf{W} \quad (18)$$

Por lo tanto, sería como resolver una ecuación de la forma $\mathbf{A}x = \mathbf{B}$. La solución obtenida por este método arroja valores para la función altamente oscilantes y es necesario entonces adoptar algún método de regularización para suavizar la función teniendo en cuenta que las soluciones negativas a la función no tienen significado físico en la DTP de un material y por lo tanto deben abolirse.

En este trabajo se usó el método de regularización de Tikhonov (**Ravikovich et al.**, 2000) en el cual la solución se calcula minimizando la siguiente ecuación cuadrática:

$$\| \mathbf{A}^* \mathbf{f} - \mathbf{N} \|^2 + \lambda^2 \| \mathbf{L} \mathbf{f} \|^2 \rightarrow \min \quad (19)$$

donde λ es un parámetro de regularización y \mathbf{L} en este trabajo se tomó como una matriz identidad $\mathbf{L} = \mathbf{I}(\mathbf{n} \times \mathbf{n})$. Las soluciones se calcularon usando la descomposición del valor singular (SVD) de la matriz \mathbf{A}^* :

$$\mathbf{A}^* = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T = \sum_{i=1}^n \mathbf{u}_i s_i \mathbf{v}_i^T \quad (20)$$

donde $\mathbf{U} = (\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_n)$ y $\mathbf{V} = (\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n)$ son matrices ortogonales y \mathbf{S} es una matriz de valores singulares de \mathbf{A}^* ordenados de tal manera que $s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq s_n \geq 0$. La solución está dada entonces por:

$$\mathbf{f} = \sum s_i^2 / (s_i^2 + \lambda^2) \frac{\mathbf{u}_i^T \mathbf{N}}{s_i} \mathbf{v}_i \quad (21)$$

Preparación y caracterización de carbones activados

Para efectos de probar la simulación sobre carbones activados se prepararon dos muestras a partir del carbón de Amagá, mina La Gualí, según procedimiento desarrollado por (**Mondragón et al.**, 1997). El carbón original se dividió en dos porciones, una de ellas fue desmineralizada y pirolizada según procedimiento publicado por (**Silbernagel et al.**, 1991) y la otra se pirolizó y activó con CO_2 700°C y 30 minutos, con el fin de obtener dos muestras con diferentes características de porosidad. La muestra activada se denominó CA30' y la muestra desmineralizada y pirolizada se denominó CDP.

A todas las muestras se les hizo la caracterización de porosidad mediante la isoterma de adsorción de N_2 a 77 K

en un equipo Micromeritics ASAP 2010 el cual tiene un "software" para el análisis de distribución de tamaño de poro utilizando teoría de funcionales de densidad (DFT). También se realizó el análisis de área superficial por los métodos de BET (N_2 a 77 K) y Dubinin (CO_2 a 298 K).

Resultados y discusión

Aplicación y optimización del algoritmo a carbones activados

Asumiendo el modelo de poro planteado y las ecuaciones desarrolladas en la sección anterior, el algoritmo de simulación se programó en lenguaje Turbo C++, generando configuraciones de moléculas en el espacio del poro; tales que el promedio ponderado pudo tomarse sobre el conjunto de configuraciones o sobre el ensamble (número de moléculas o energía potencial). A partir la ecuación del potencial 10:4 y el potencial de Steele mostrados en las Ecuaciones (3) y (4) se calculó la energía potencial en el poro tipo grieta variando el ancho.

En la figura 3 se muestra el potencial para un ancho de poro de $H = 9 \text{ \AA}$. Los diferentes perfiles para éstas ecuaciones se calcularon en algunos casos utilizando la densidad de un grafito (2.27 g/cm^3), simbolizados por G, y en otros casos se calcularon utilizando una densidad más próxima a la

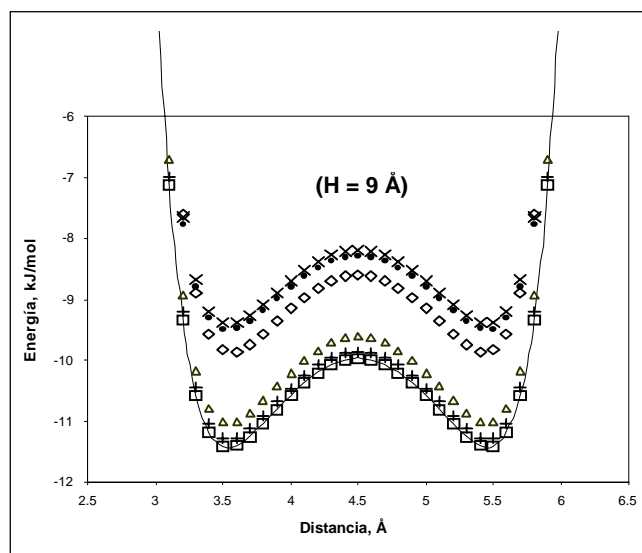


Figura 3. Energía potencial para un ancho de poro de $H = 9 \text{ \AA}$, variando el número de láminas (n) detrás de la pared del poro y a dos valores diferentes de densidad: G para grafito (2.27 g/cm^3) y C para carbón activado ($\approx 1.9 \text{ g/cm}^3$). En el cálculo del perfil de "—" se utilizó el potencial de Steele G, "□" $n=5$ y densidad 2.27 g/cm^3 ; se simboliza (5G), "+" 3G, "Δ" 2G, "◇" 1G, "x" 3C, "·" Steele C.

de un carbón activado ($\approx 1.9 \text{ g/cm}^3$), simbolizados por C (McEnaney *et al.*, 1998). El número de capas n se especifica delante del símbolo que especifica uno u otro valor de densidad; por ejemplo, si el potencial se calculó con tres capas de átomos de carbono consecutivas en cada pared y con una densidad de 1.9 g/cm^3 se simboliza 3C. En dicha figura se pueden observar dos mínimos pertenecientes a las energías cuando la distancia es la más favorable en las proximidades a la pared. De la figura 3 se puede concluir que cuando se calcula el potencial 10:4 para un número de capas $n \geq 3$ se obtiene aproximadamente el mismo resultado y por ende el mismo perfil tanto para altas como para bajas densidades. El número de capas consecutivas utilizado en la simulación fue $n = 3$, éste valor es señalado en análisis de difracción de rayos-X para carbones activados. Es muy importante tener en cuenta que un cambio en la densidad del material (2.27 a $1.9 \text{ cm}^3/\text{g}$) afecta el valor de la energía potencial considerablemente. Para obtener los perfiles de la figura 3 los demás parámetros se mantuvieron constantes con valores de $\epsilon_{sf}/k_B = 53.22 \text{ K}$, $\sigma_{sf} = 3.494 \text{ \AA}$ para las interacciones N_2 - pared y un espaciamiento entre láminas de $\Delta = 3.354 \text{ \AA}$.

En la figura 4 se observa el efecto del cambio en la densidad de átomos de carbono en las paredes del poro sobre la isoterma de adsorción de N_2 a 77 K a un ancho de poro de $H = 9 \text{ \AA}$. Es evidente la gran influencia que ejerce sobre el potencial de una partícula la disminución en la densidad de la pared, hay un consecuente desplazamiento de la isoterma a altas presiones, lo que en términos prácticos significa que el poro pierde capacidad de

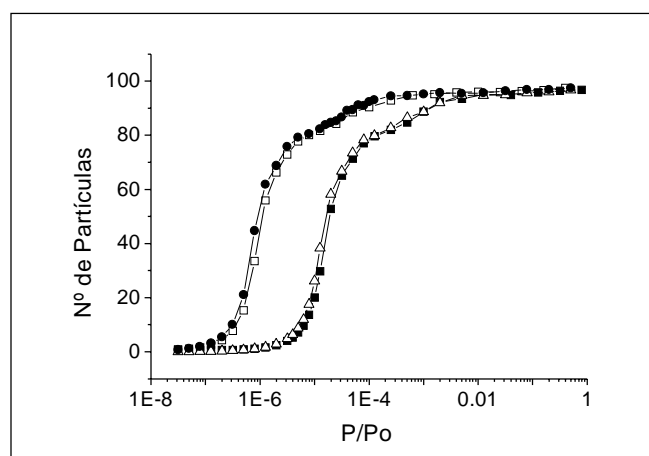


Figura 4. Isotermas de adsorción de N_2 a 77 K , $H = 9 \text{ \AA}$ cambiando la densidad de átomos de carbono en las paredes del poro ($G = 2.27 \text{ g/cm}^3$ ($0.114 \text{ átomos / \AA}^3$) y $C = 1.9 \text{ g/cm}^3$ ($0.098 \text{ átomos / \AA}^3$)), los demás parámetros son constantes; “ \square ” 3C, “ \bullet ” Steele G, “ \triangle ” Steele C, “ \blacksquare ” 3C.

interacción con la molécula gaseosa y por lo tanto se necesitará aumentar la presión para que el poro pueda contener el mismo número de moléculas en equilibrio dinámico.

Después del análisis de estas simulaciones presentadas en las figuras 3 y 4 el modelo seleccionado para el trabajo, aunque ideal pero más aproximado a los carbones activados, fue el modelo de poro tipo grieta con $n = 3$ y densidad 1.9 g/cm^3

Isotermas locales de adsorción

Se generaron en total 84 isotermas simuladas de nitrógeno a 77 K en el rango de $3.7 \leq w \leq 65 \text{ \AA}$. En el rango de $4 \leq w \leq 25 \text{ \AA}$, la frecuencia de barrido fue de 0.5 \AA y a partir de 25 \AA fue de 1 \AA ; tomando los promedios en todos los casos sobre 2×10^6 pasos MC, lo cual es suficiente según la literatura.

En las figuras 5a y 5b se muestran algunas de las isotermas obtenidas para nitrógeno a 77 K , donde se pueden observar los principales cambios en los perfiles de adsorción. En la figura 5b se presenta la zona de bajas presiones en eje logarítmico. Para las isotermas con un ancho de poro de $H = 7.1$ y 13.9 \AA ($w = 3.7$ y 10.5 \AA) se observa que son de Tipo I según la IUPAC, figura 5a (Rouquerol *et al.*, 1999). En el ancho de poro con $w = 3.7 \text{ \AA}$ solo se puede acomodar una capa de un diámetro molecular de moléculas de N_2 ; dada la cercanía de las paredes que conforman el poro y que por ende los potenciales de las paredes se superponen, dando como resultado una mayor energía de interacción entre las partículas y las paredes del poro, mostrando adsorción a presiones relativas mucho muy bajas, figura 5b. Es evidente que el perfil de las isotermas de adsorción simuladas para N_2 a 77 K cambia en función de la amplitud del poro ya que esto marca diferencias en la energía potencial a las que se someten las moléculas de N_2 .

En la figura 6 se puede observar la profundidad del pozo de potencial para un ancho de poro igual a 7.1 \AA , se nota un solo mínimo en contraste al perfil del ancho de poro, igual a 34.8 \AA , que presenta dos mínimos bien definidos cercanos a cada una de las paredes del poro modelado. La presencia de un solo mínimo depende, como se mencionó antes, fundamentalmente de la superposición de los potenciales de cada una de las paredes que para el caso del menor ancho de poro la profundidad del mínimo llega a ser el doble de la profundidad del ancho de poro mayor.

El proceso en detalle se explica en las figuras 7 y 8 donde se muestran las configuraciones que pueden tomar las partículas dentro del poro a medida que se aumenta la

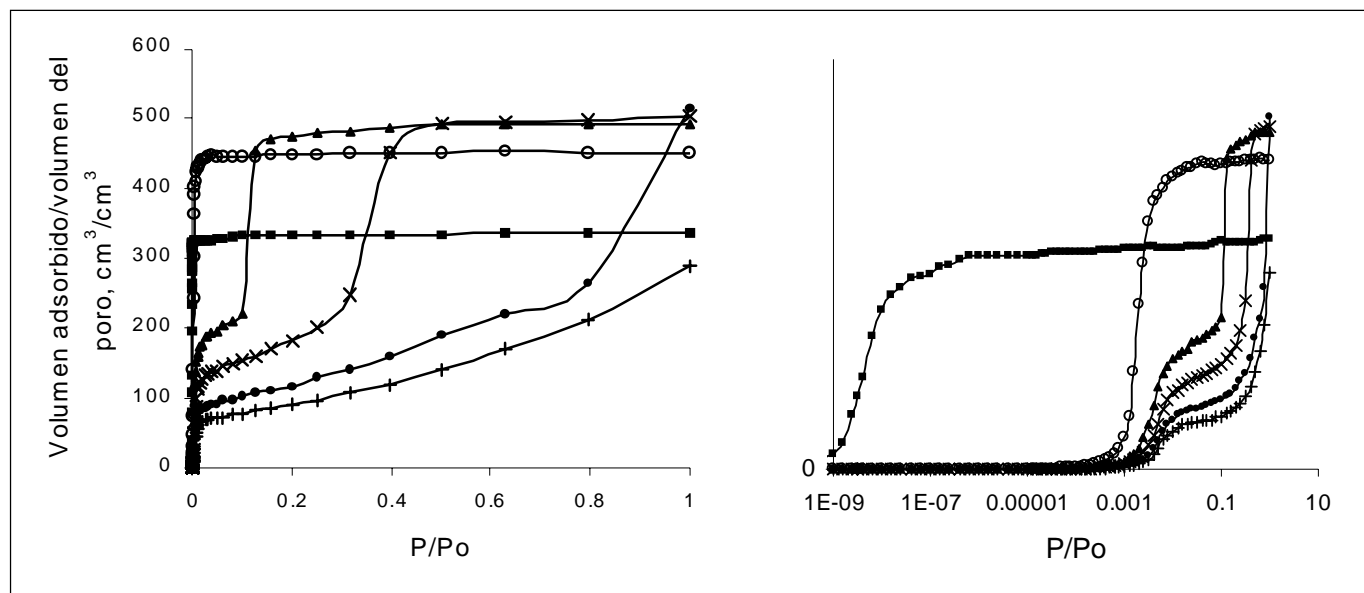


Figura 5. Algunas de las isothermas de adsorción más representativas generadas en la simulación al variar el tamaño de poro: “-■-” $w = 3.7 \text{ \AA}$, “-○-” $w = 10.5 \text{ \AA}$, “-▲-” $w = 18 \text{ \AA}$, “-x-” $w = 25 \text{ \AA}$, “-●-” $w = 38 \text{ \AA}$, “-+-” $w = 49 \text{ \AA}$.

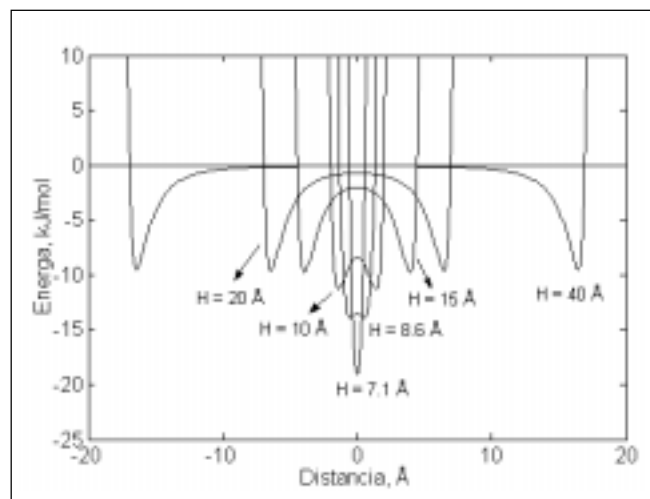


Figura 6. Perfil de la energía potencial de las partículas de N_2 dentro de un poro tipo grieta.

presión relativa en una isoterma para un ancho de poro de $w = 14.5 \text{ \AA}$. En la figura 7(a) se muestra la configuración obtenida a una presión relativa de 1.25×10^{-3} , punto mostrado en la isoterma correspondiente de la figura 8, que hace parte del promedio de las partículas dentro del poro, se observa que la mayoría de las partículas están cerca de la superficie de las paredes del poro y además que a bajas presiones hay muy pocas partículas dentro del poro. En las figuras 8(b), (c), (d) y (f) respectivamente se observa

claramente que a medida que se aumenta progresivamente la presión el llenado del poro también es progresivo; destacándose la formación de la monocapa y las sucesivas multicapas; dicho proceso en forma global es representado por la isoterma de adsorción en la figura 8.

Valoración de la energía de adsorción

En principio se obtuvieron promedios de las energías con valores muy diversos, entre valores negativos y positivos a pesar de la metodología del muestreo Metrópolis utilizada para evitar estos inconvenientes. A raíz de lo anterior se decidió analizar la frecuencia con que se estaban presentando las diferentes energías en el transcurso de la simulación para un mismo valor de ancho de poro y presión. En el recuento de éstas energías se encontraron energías positivas de gran magnitud causadas por las configuraciones aceptadas según la regla de probabilidad de Metrópolis donde hubo partículas tan próximas entre sí que sus nubes electrónicas se superponen y la energía de repulsión es muy alta, condición que en consideración del criterio de probabilidad no restringe para que sean aceptadas. La frecuencia de estas energías fue muy baja comparada con las energías atractivas, (de valor negativo), que llegaron a tener frecuencias de hasta el 45%. En la figura 9(b) se muestran las frecuencias de las energías en un ancho de poro de un diámetro molecular para N_2 , para baja y alta presión relativa. Las frecuencias para los puntos respectivos de la isoterma, figura 9(a), muestran

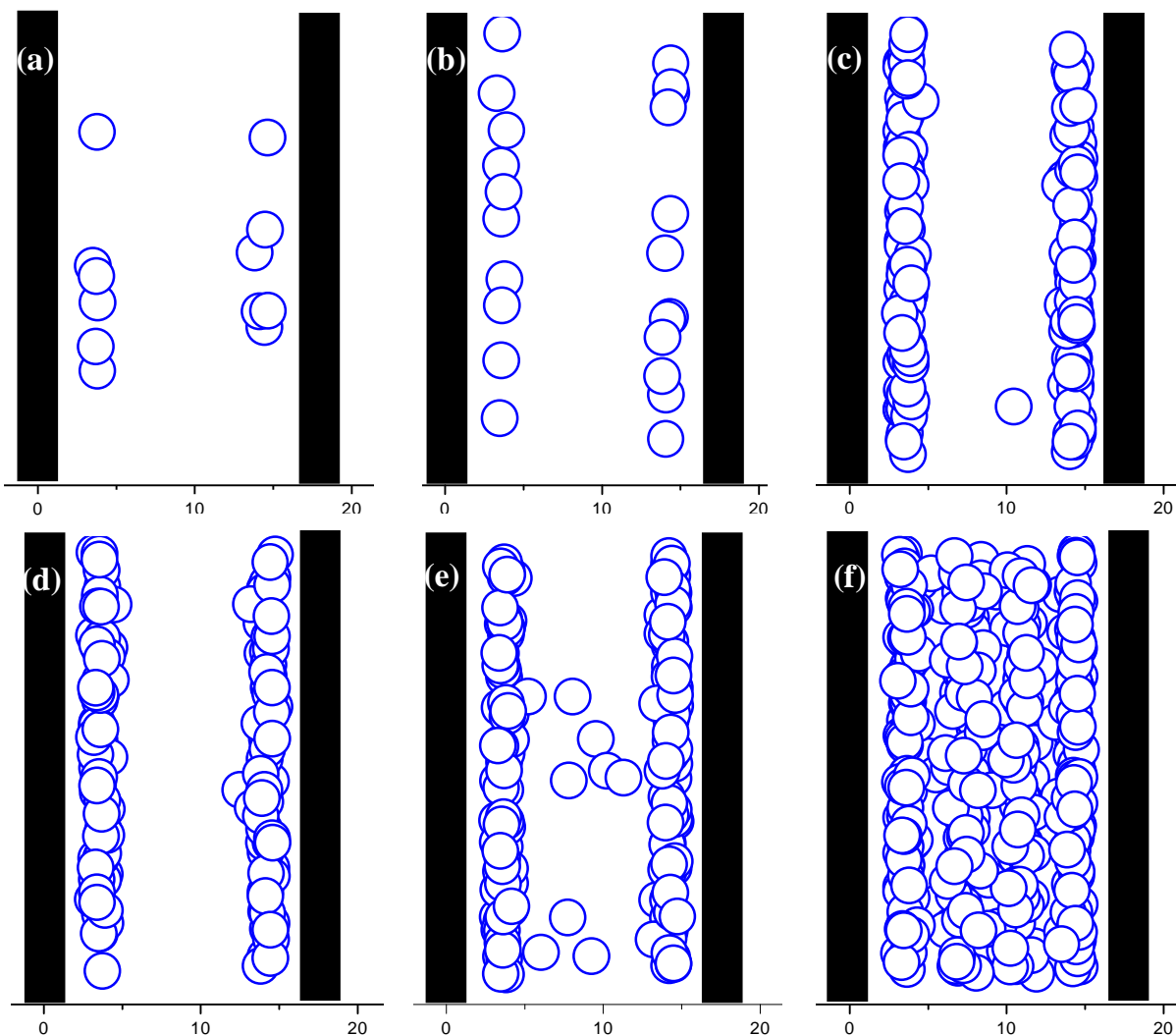


Figura 7. Configuraciones de las partículas dentro de un poro tipo grieta variando la presión del sistema, cuyos puntos se especifican en la figura 8.

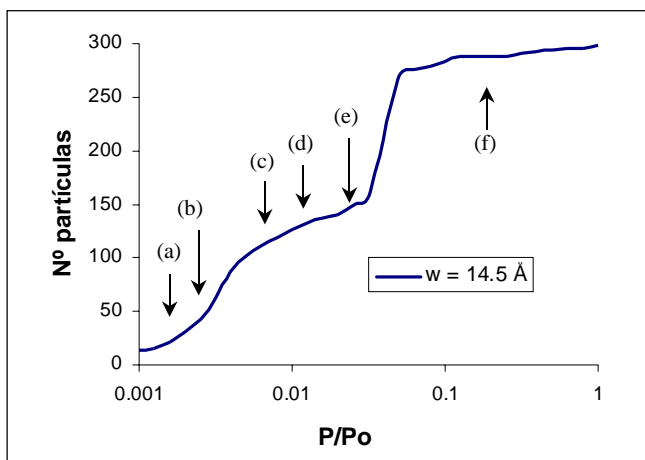


Figura 8. Isotherma de N_2 en un poro tipo grieta con $w = 14.5 \text{ \AA}$.

máximos para energías cada vez menores en la medida en que la presión relativa aumenta. Las energías mayores para presiones bajas sugieren que los probables movimientos o intercambios de partículas con el exterior son aceptados con mucha más frecuencia. Las bajas frecuencias para las energías de menor magnitud a presiones más altas sugiere, como era de esperarse, que los movimientos o intercambios con el exterior presentan menor frecuencia por la menor probabilidad que tiene una partícula de cambiar de posición dada la mayor cantidad de partículas existentes a su alrededor.

En las energías de la isoterma local con $w = 11.5 \text{ \AA}$, figura 9(c), se observa un comportamiento similar al comparar baja y alta presión relativa. En este ancho de poro se pueden acomodar hasta tres diámetros moleculares de N_2

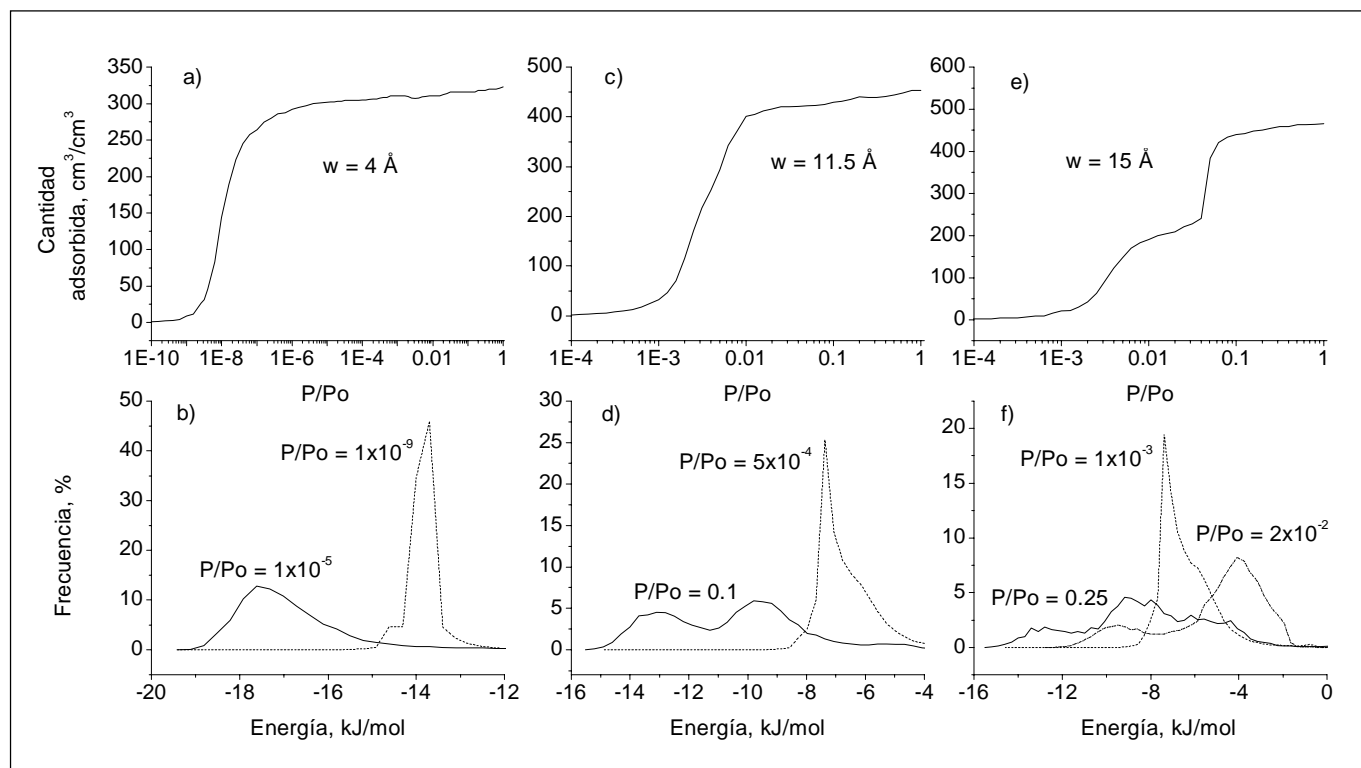


Figura 9. Gráficos de isothermas de adsorción de N_2 a 77K para distintos anchos de poro w , a), c) y e), y frecuencias de energía para distintos puntos de cada una de las isothermas locales b), d) y f). Debajo de cada isoterma se encuentra el correspondiente diagrama de frecuencias a presiones donde hay pocas moléculas en el poro y a presiones donde se forman las mesetas en las isothermas.

con el aumento gradual de la presión relativa. Considerando el perfil que tendría la energía potencial de las partículas de N_2 dentro del poro observando la figura 6, se evidencia que a éste ancho de poro todavía hay superposición de los potenciales de las paredes del poro, aunque en menor grado comparándolo con $w = 3.7 \text{ \AA}$. Los perfiles de energía, figura 9(d), presentan dos máximos, -13.4 y -9.8 kJ/mol correspondientes a la formación de la monocapa sobre las paredes del poro y la capa que quedaría en el intermedio de las paredes.

El perfil de la isoterma en la figura 9(c) no muestra un segundo quiebre, como si lo muestra la isoterma de la figura 9(e) con un ancho de poro $H = 18.4 \text{ \AA}$ ($w = 15 \text{ \AA}$) en donde se pueden acomodar hasta cuatro diámetros moleculares de N_2 . El primer quiebre entonces corresponde a la formación de la monocapa y el segundo al llenado total del poro al aumentar la presión relativa. En la figura 9(f) se observan los perfiles de las energías en los puntos de la isoterma mostrados en la figura 9(e). La característica más relevante de los perfiles de energía es la presencia de tres máximos, los cuales presentan una energía prome-

dio de -12.8 kJ/mol que corresponde a las capas más cercanas a la superficie, el de -9.2 kJ/mol que corresponde a las capas que quedan sobre las monocapas y por último la energía correspondiente a las partículas que eventualmente pueden tomar una configuración en el centro del poro.

De los resultados de las gráficas anteriores y relacionándolas con la figura 6, que representa el perfil del potencial dentro del poro, se puede verificar que la simulación permite el seguimiento del fenómeno local de adsorción en función del ancho de poro de acuerdo con la energía potencial y con las configuraciones de las partículas que están aportando al promedio de partículas dentro del poro a un valor de presión determinado.

Caracterización de los carbones activados preparados

La caracterización de los carbones activados preparados se muestra en la tabla 2. El análisis de los valores de área superficial obtenidos por los métodos usuales, (BET, Dubinin-Radushkevich y Dubinin-Astakhov), permite observar que no hay concordancia en el valor hallado; ni

Tabla 2. Áreas superficiales de las muestras preparadas

Adsorbato del análisis	Muestra	Área superficial (m ² /g)		
		Dubinin Radushkevich (±3)	Dubinin Astakhov (±2)	BET (±3)
CO ₂	CDP	702	974	
	CA30'	734	1138	
N ₂	CDP			836
	CA30'			861

siquiera asumiendo una interpretación en función del método y adsorbato utilizado. Ha sido resaltado en la literatura (Fernandez *et al.*, 2000), que éstos resultados no son consistentes con lo esperado, esto es, la adsorción con CO₂ a 273 K debería registrar mayores áreas superficiales a las evaluadas con N₂ a 77 K para carbones activados microporosos. Aquí, las áreas superficiales por DR son menores que el área BET, pero el área por DA que debería ser similar a DR muestra valores mucho mayores. Luego, la evaluación del área superficial no es un factor que objetivamente de información de la porosidad del material y se hace necesario obtener la distribución del tamaño de poro; la figura 10 muestra la DTP de los carbones activados obtenida usando el “software” comercial desarrollado por Micromeritics.

Distribución de tamaño de poro vía DFT y GCMC

En las figuras 11 y 12, se muestra la DTP obtenida por simulación Monte Carlo en comparación con la obtenida por el “software” comercial vía DFT para ambas muestras. Como se especificó anteriormente la DTP obtenida vía GCMC empieza en un valor mínimo de $w = 3.7 \text{ \AA}$, debido al diámetro molecular del N₂ ($\sigma_{N_2} = 3.64 \text{ \AA}$).

En la figura 11 se puede observar que las dos distribuciones de tamaño de poro tienen perfiles similares. Se debe considerar que el método de inversión de la integral de adsorción empleado en el “software” por DFT es el de mínimos cuadrados (Oliver *et al.*, 1992; Webb *et al.*, 1996), que es un procedimiento diferente al empleado en éste trabajo. Aunque ambos tienen la misma finalidad, obtener una solución analítica de los valores de $f(w)$ al invertir la integral, se pueden obtener diferencias en las intensidades de la función de DTP.

Una manera de evaluar la bondad de la DTP obtenida es utilizar la función de distribución obtenida, $f(w)$, para recalcular la isoterma de adsorción; ecuación (15) y compararla con la isoterma experimental original, ver figura 13. Se puede apreciar un buen ajuste de la isoterma calculada

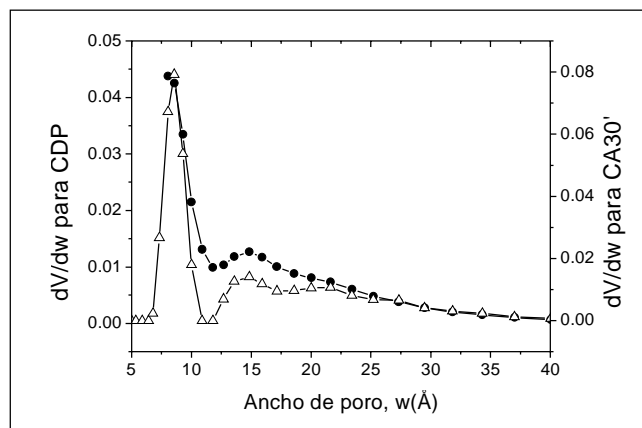


Figura 10. Distribuciones de tamaño de poro, usando DFT para las dos muestras con diferente tratamiento de activación. “-•-” CDP, “-Δ-” CA30’.

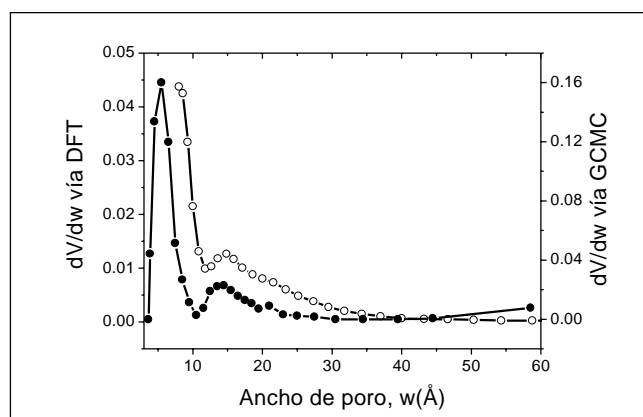


Figura 11. Distribución de tamaño de poro, muestra CDP. “-•-” vía GCMC, “-Δ-” vía DFT.

con respecto a las isotermas experimentales para la muestra CDP, con una desviación media alrededor de 7 cm³/g. Sin embargo el recuadro muestra diferencias en el rango a bajas presiones relativas; más pronunciadas donde se prueba la región de porosidad más estrecha (aproximada al tama-

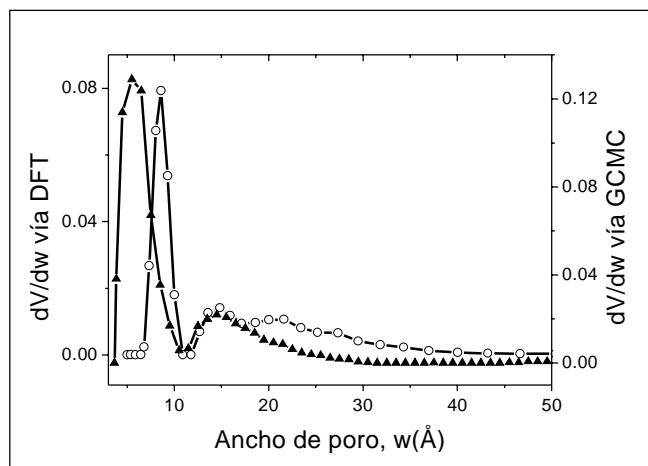


Figura 12. Distribución de tamaño de poro, muestra CA30'.
 “▲” vía GCMC, “○” vía DFT.

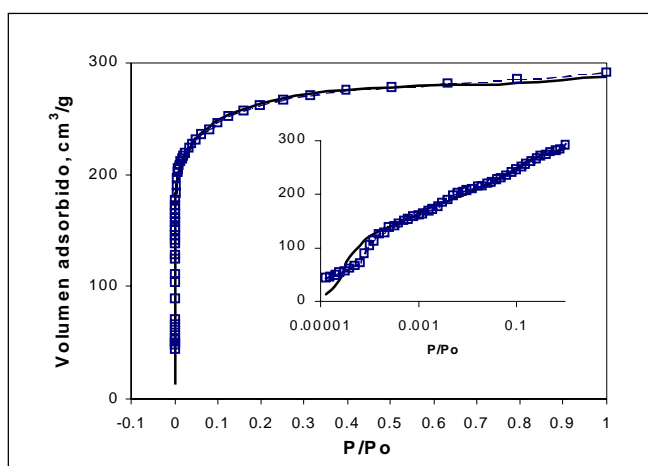


Figura 13. Comparación entre la isoterma experimental y recalculada de la Ecuación (15) para la muestra CDP: “□” Isoterma calculada, “—” Isoterma Experimental.

ño molecular). En dicha región se nota que hay restricción real para el acceso de las moléculas de N_2 en tales poros. En otras palabras, la confiabilidad de la información en la DTP es aceptable para P/P_0 mayores de 1.0×10^{-4} . Un ajuste similar de la isoterma teórica y experimental se encontró para la muestra CA30'. Hay que tener en cuenta que método supone un modelo de poro tipo grieta ideal; caracterizado por potencial superficial uniforme, lo cual no es una característica real de estos materiales, dada la irregularidad de las superficies y los potenciales superficiales causados por diferentes grupos presentes en la superficie de un carbón activado.

Conclusiones

El algoritmo desarrollado por medio de simulación GCMC permite el seguimiento a escala molecular de la adsorción de gases sobre materiales porosos, en éste caso nitrógeno en carbones activados. Se obtuvo tanto la isoterma de adsorción como la distribución de tamaño de poro, éstos resultados fueron similares a los obtenidos en la caracterización por medio de un “software” comercial basado en teoría de funcionales de densidad.

La adopción de un modelo de poro tipo grieta para carbones activados es adecuado para la estructura no homogénea de un carbón activado, según lo deducido a partir de la similitud en la comparación de las isotermas experimentales y recalculadas de la adsorción de N_2 sobre los carbones activados preparados.

El “software” desarrollado se constituye en una herramienta importante para el diseño de materiales adsorbentes, pues disminuye el trabajo experimental al hacer óptimas algunas variables. Una aplicación en la cual se trabaja actualmente es la adsorción de metano e hidrógeno en sólidos porosos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al programa “Estrategia para la sostenibilidad grupos Universidad de Antioquia 2001–2003” por el soporte dado al proyecto. Al profesor Johans Restrepo por sus valiosos comentarios para el planteamiento del algoritmo de simulación.

Bibliografía

- Bansal, R. C., Donnet, J.B. and Stoekli F., 1988. Active carbon. Marcel Dekker, New York.
- Bottani, E., 1996. Simulaciones Monte Carlo: una poderosa herramienta aplicada al estudio de la adsorción física de gases sobre sólidos. Anales de la Sociedad Científica Argentina, **226** (1): 65 - 81.
- Cracknell, R. F., Gordon P. and Gubbins K. E., 1993. Influence of pore geometry on the design of microporous materials for methane storage. Journal of Physical Chemistry, **97** (2): 494 - 499.
- Davies, G. M. & Seaton, N. A., 1999a. Development and validation of pore structure models for adsorption in activated carbons. Langmuir, **15** (19): 6263-6276.
- Davies, G. M., Seaton, N. A. & Vassiliadis V. S., 1999b. Calculation of pore size distributions of activated carbons from adsorption isotherms. Langmuir, **15** (23): 8235-8245.
- Fernández, J. J., Flórez E. & Mondragón F. 2000. Aproximación a la distribución de porosidad de un semicoque gasificado con CO_2 y H_2O . En: Memorias del V Congreso Nacional de Ciencia

- y Tecnología del Carbón. Universidad Popular del Cesar. Valledupar. pp: 499-502.
- Frenkel, D. & Smit B.**, 2002. Understanding molecular simulation: From algorithms to applications. Academic Press. San Diego.
- Gubbins, K. E. & Quirke N.**, 1996. Molecular simulation and industrial applications: Methods, examples and prospects. Gordon and Breach Science Publishers. Amsterdam.
- McEnaney B., Mays T. J. & Chen X.**, 1998. Computer simulation of adsorption processes in carbonaceous adsorbents. *Fuel*, **77** (6): 557 - 562.
- Mondragón, F., Quintero, G., Jaramillo, A. & Fernández J. J.**, 1997. The production of high surface carbons from coal using pre-swelling in solvents to disperse coking catalysts. *Journal of Materials Science*, **32** (8): 1455-1459.
- Oliver, J. P. & Conklin, W. B.** 1996. Determination of pore size distribution from density functional theoretic models of adsorption and condensation within porous solids. En: DFT plus models library: User's guide. Micromeritics Instrument Corporation. Norcross.
- Ravikovitch P. I., Vishnyakov A., Russo R. & Neimark A. V.**, 2000. Unified approach to pore size characterization of microporous carbonaceous materials from N₂, Ar, and CO₂ adsorption isotherms. *Langmuir*, **16** (5): 2311-2320.
- Rouquerol, F., Rouquerol J. & Sing K.**, 1999. Adsorption by powders & porous solids. Academic Press. London.
- Setoyama, N., Suzuki T. & Kaneko K.**, 1998. Simulation study on the relationship between a high resolution a_s-plot and the pore size distribution for activated carbon. *Carbon*, **36** (10): 1459-1467.
- Silbernagel, B. G., Gebhard L. A., Flowers II. R.A. & Larsen J. W.**, 1991. Demineralization effects on the EPR properties of Argonne Premium Coals. *Energy & Fuels*, **5** (4): 561-568.
- Webb, P. A. & Orr C.**, 1997. Analytical methods in fine particle technology. Micromeritics Instrument Corporation. Norcross.
- Yin, Y. F., McEnaney B. & Mays T. J.**, 1998. Dependence of GCEMC simulations of nitrogen adsorption on activated carbons on input parameters. *Carbon*, **36** (10): 1425-1432.

Recibido el 16 de febrero de 2004.

Aceptado para su publicación el 29 de marzo de 2004.

ESTUDIO DE LA VOCALIZACIÓN DE TRECE ESPECIES DE ANUROS DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, COLOMBIA

por

Manuel Hernando Bernal*, Diana Patricia Montealegre**
& Carlos Andrés Páez**

Resumen

Bernal, M.H., D.P. Montealegre & C.A. Páez: Estudio de la vocalización de trece especies de anuros del municipio de Ibagué, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **28** (108): 385-390, 2004. ISSN 0370-3908.

Con el objetivo de conocer algunas características de la actividad vocal y de determinar los anuros del municipio de Ibagué a través de parámetros acústicos, se realizó el presente trabajo en 11 sitios diferentes dentro del municipio, en un rango altitudinal comprendido desde los 780 m. hasta los 4.300 m. De las 35 especies de anuros encontradas en el municipio solo fue posible el registro acústico de 13 de ellas, las cuales presentan vocalizaciones que son características para cada especie y permiten su identificación taxonómica. También se observó que entre las especies existe una gran variación interespecífica e intraespecífica en la tasa de llamados, una menor variación en la duración de un llamado, notas por llamado, pulsos por nota y que la frecuencia dominante es la variable con la menor variación intraespecífica pero con gran variación interespecífica.

Palabras clave: municipio de Ibagué, anuros, vocalización, llamados, comunicación.

Abstract

With the objective of knowing some characteristics of the vocal activity and of determining the anurans of the "Municipality" of Ibagué by means of acoustic parameters, we carried out the present work in 11 different places inside the municipality, in a range altitudinal from the 780 m. until the 4.300 m. Of the 35 species of frogs and toads found, it was possible to study only 13 of them. In this work it was found that each one of the 13 species presents a vocalization that is characteristic and that it allows their taxonomic identification. Also, it was observed that among the species it exists a great interspecific and intraspecific variation in the rate of calls, a smaller variation in the duration of a call, notes for call, pulses for note, and that the dominant frequency is the variable with the smallest intraspecific variation but with great interspecific variation.

Key words: "Municipality" of Ibagué, anurans, vocalization, calls, communication.

* Profesor Departamento de Biología. Grupo de Investigaciones en Zoología, Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia. Apartado Aéreo 546. Correo electrónico: mhbernal@ut.edu.co.

** Biólogos de la Universidad del Tolima. Grupo de Investigaciones en Zoología, U.T. Correo electrónico: dmontealegre@hotmail.com

Introducción

Los anuros, las ranas y los sapos, son un grupo de animales bastante llamativos por su vocalización, sus cantos o llamados, los cuales realizan la mayoría de las especies durante las horas de la noche. Estos cantos son muy diversos y varían de especie a especie y aún dentro de una misma especie se pueden encontrar diferentes tipos de llamados usados en diferentes situaciones (Gerhardt, 1994). El canto más familiar en los anuros es el denominado llamado de advertencia, el cual es considerado como un llamado con función de apareamiento o de territorialidad (Pough *et al.*, 1998). Por ejemplo, en la rana de Puerto Rico *Eleutherodactylus coqui* se ha encontrado que el llamado de advertencia tiene 2 notas, co-qui, donde los machos solo responden a la primera nota (co), mientras que las hembras son atraídas por la segunda nota (qui) (Naris & Capranica, 1978). En general, se considera que los machos son quienes vocalizan y que las hembras los escogen para aparearse (Pough & Heiser, 1996; Pough *et al.*, 1998). En esta elección, se ha encontrado que ellas son atraídas principalmente por llamados más complejos y que implican un mayor costo para el macho (Duellman & Trueb, 1986; Ryand, 1985). Este costo de la vocalización se puede interpretar en dos sentidos: primero, en la alta inversión energética que tiene la producción de los llamados; y segundo, en el riesgo de predación en el que incurre el macho que está llamando por hacerse más conspicuo (Taigen & Wells, 1985; Klump & Gerhardt, 1987; Ryan, 1985).

Aparte del llamado de advertencia, los anuros tienen otros tipos de llamados. Por ejemplo, el llamado de liberación, el cual es producido por machos o por hembras no dispuestas a aparearse cuando son amplexadas por otros machos (Pough *et al.*, 1998). El llamado de defensa, que es producido por ciertos anuros cuando se encuentran con un predador, aunque no hay evidencia que este tipo de llamado funcione en una comunicación intraespecífica (Pough *et al.*, 1998); y finalmente, se conoce un llamado suave emitido de manera excepcional por las hembras de la especie *Rana virgatipes* al cual responden los machos (Given, 1993).

Con respecto a las características de la vocalización en las ranas y sapos, estas pueden consistir en simples silbidos, trinos, notas repetidas múltiples veces en sucesión, o diferentes tipos de notas, las cuales son combinadas para formar llamados complejos (Pough *et al.*, 1998). Aparte de estas variaciones en la forma como cantan los anuros, también hay diferencias en los parámetros que constituyen las vocalizaciones, tales como la frecuencia dominante, la duración de los llamados y la tasa de llamados (Pough *et al.*, 1998). No todas estas características son igualmente importantes para la comunicación

intraespecífica, pero invariablemente se ha encontrado que las hembras prefieren los llamados de su propia especie (Gerhardt, 1998). Este hecho y el de que cada especie presente unos cantos característicos hace que el estudio de la vocalización en estos animales sea importante desde el punto de vista taxonómico, ya que puede ayudar en la determinación y clasificación de especies similares en apariencia; también, ayuda a identificar el sexo de un animal. Por lo anterior, este trabajo pretende caracterizar los llamados de las especies de anuros registradas en el municipio de Ibagué y reconocer algunos aspectos de su vocalización, en lo que respecta a la frecuencia dominante, duración de las llamadas, notas por llamado y pulsos por nota.

Materiales y Métodos

Para el desarrollo del estudio se seleccionaron cuatro zonas de muestreo dentro del municipio de Ibagué, correspondientes a diferentes niveles altitudinales, desde los 780 m. hasta los 4.300 m., los cuales permitieron cubrir una gran variedad de hábitats con diferentes condiciones ambientales. Las zonas de muestreo fueron visitadas entre los meses de febrero y julio del año 2.000, en época de cuarto menguante y luna nueva, y sitios alternos fueron visitados ocasionalmente durante el estudio. A continuación se relacionan las zonas de muestreo y los sitios alternos: Zona 1: sitio principal: Laguna El Toro (780 m.s.n.m. Km 10 vía Ibagué-Bogotá); sitios alternos: El Totumo (1.015 m.s.n.m. Km 6 vía Ibagué-Rovira) y Límite con Alvarado (900 m.s.n.m). Zona 2: sitio principal: Juntas 1.600 m.s.n.m. vía al Nevado del Tolima; sitios alternos: Casco urbano 1.250 m.s.n.m y Toche 1.900 m.s.n.m. Noroccidente de Ibagué. Zona 3: sitio principal: El Silencio (2.600 m.s.n.m vía al Nevado del Tolima); sitio alterno: El Almorzadero (2.750 m.s.n.m. vía al Nevado del Tolima). Zona 4: Páramo Nevado del Tolima, sitio principal: La Cueva (3.600 m.s.n.m.); sitios alternos: Lajas (3.485 m.s.n.m) y Campamento (4.300 m.s.n.m. vía al Nevado del Tolima).

Las jornadas de trabajo incluyeron visitas de dos días y una noche, durante las cuales se hicieron recorridos a lo largo de los sitios de estudio entre las 17 y 21 horas del primer día y las 6:00-9:00 horas del segundo día. Ocasionalmente se hicieron visitas diurnas para registrar el canto y la actividad vocal de algunas especies de anuros. Durante los recorridos se realizaron estaciones para la grabación de los cantos de varios animales por cada especie encontrada. La grabación se llevó a cabo mediante un micrófono Sony FV5, conectado a una grabadora Sony TCM 459 V. Los cantos fueron analizados usando "software Syrinx" a una frecuencia de muestreo de 44.1 KHz y una resolución de 16 "bits". Se analizaron 3 cantos por

individuo y el número de animales por especie varió entre 5 y 10. Las características de las vocalizaciones estudiadas fueron: frecuencia dominante (equivalente a la frecuencia con mayor energía), la duración de los llamados, el número de notas por llamado y el número de pulsos por nota (Crocroff & Ryan, 1995; Bernal & Guzmán, 1999). Para la determinación del número de llamados por minuto, se contó el número de llamados emitidos por un animal focal durante 10 minutos. Después de realizadas las grabaciones, los animales fueron capturados para su identificación taxonómica y para la medición de su masa corporal, con un dinamómetro OHAUS con precisión 1 g.; y la longitud rostro cloaca (LRC), con un calibrador SCHERR-TUMICO con precisión de 0,1 mm.; no todos los animales a los que se les grabó el canto pudieron ser capturados, ni tampoco fue posible la grabación de los cantos de todas las especies de anuros del municipio. Los animales a los que se les grabaron sus cantos y que no fueron reconocidos taxonómicamente se llevaron al Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional donde fueron determinados por el profesor John D. Lynch.

Resultados

De las 35 especies de anuros registrados para el municipio de Ibagué (Bernal *et al.*, 2000), sólo 18 fueron observadas vocalizando; y de estas, sólo en 13 fue posible su análisis acústico. En cada una de estas especies se presenta

un canto muy característico que permite diferenciarlas de las demás, aunque algunas especies presentan una ligera semejanza en la forma como se escucha su canto, así:

Trinos: *Bufo marinus*, *Centrolene buckleyi*.

Silbidos: *Leptodactylus fuscus* y *Leptodactylus fragilis*.

Goteo: *Eleutherodactylus permixtus*, *Colostethus bocagei*.

Llamados pulsados: *Hyla crepitans*, *Hyla larinopygion*, *Scinax ruber*

Llamados compuestos: *Physalaemus pustulosus*, *Eleutherodactylus piceus*.

En cuanto a características acústicas de la vocalización, en la Tabla 1 se resumen los datos obtenidos del análisis de sonidos. A partir de esta tabla se puede apreciar que existe una amplia variedad en la composición estructural de la vocalización en los anuros, encontrándose que en algunas especies se presentan series de llamados con una sola nota, la cual puede ser repetida múltiples veces durante la noche, por un animal; por ejemplo en *Leptodactylus fragilis*, *Leptodactylus fuscus*, *Hyla larinopygion* y *Scinax ruber*, y el llamado unítono de *Eleutherodactylus permixtus*, *Hyla microcephala*, *Hyla crepitans*, y *Physalaemus pustulosus*; y series de llamados de 2 notas, como en *Colostethus bocagei*. También hay especies, que además de presentar series de llamados

Tabla 1. Resumen del análisis de sonidos de las especies de anuros del municipio de Ibagué. L.C.: Longitud corporal promedio. F.D.: Promedio de la Frecuencia Dominante.

Especie	L.C. (m.m.)	F.D. (KHz)	Rango de duración de un llamado en ms. Promedio y (desviación estándar)	Notas por llamado	Pulsos por llamado	Rango de llamados en 10 minutos
<i>Hyla microcephala</i>	24.1	2.16	105-776 329(217)	1-5	1-2	6-400
<i>Hyla crepitans</i>	53.4	0.35	212-312 61(36)	1-2	3-11	5- 408
<i>Scinax ruber</i>	33.2	0.70	171-372 19(34)	1	5-7	5-330
<i>Hyla larinopygion</i>	57.0	1.66	250-300 26(21)	1-34	5-7	6-12
<i>Physalaemus pustulosus</i>	31.0	0.35	270-335 30(22)	1-4	-	97-208
<i>Leptodactylus fuscus</i>	52.1	0.56	136-220 16(20)	1	-	119-234
<i>Leptodactylus fragilis</i>	33.7	0.94	111-192 16(35)	1	-	15-712
<i>Eleutherodactylus piceus</i>	23.5	1.24	122-590 281(187)	8-15	-	3-50
<i>Eleutherodactylus permixtus</i>	29.6	2.40	238-950 202(312)	1-5	-	10-205
<i>Eleutherodactylus taeniatus</i>	19.7	1.80	355-394 372(16)	4-6		20-200
<i>Bufo marinus</i>	98.7	0.46	121-368 241(77)	1	24-26	6-20
<i>Centrolene buckleyi</i>	30.2	2.50	251-382 326(55)	1	19-20	6-83
<i>Colostethus bocagei</i>	17.3	3.80	112-138 128(8)	2	-	980-1140

unítonos, presentan llamados integrados por varias notas, como en *Eleutherodactylus permixtus*, *Hyla microcephala* y *Physalaemus pustulosus*; y especies, cuyos llamados constan de varias notas, como en *Eleutherodactylus piceus* y *Eleutherodactylus taeniatus*. En *Physalaemus pustulosus* y *Eleutherodactylus piceus*, de manera característica, se presentan cantos compuestos; es decir, cantos en los que algunas de sus notas suenan como si estas correspondieran a otro tipo de llamado (Fig. 1). Finalmente, entre estos cantos se presentan llamados con notas pulsadas (Fig. 1) y los casos más típicos se encuentran en los Hylidos del municipio de Ibagué: *Hyla crepitans*, *Hyla larinopygion*, *Hyla microcephala* y *Scinax ruber* (Fig. 1), y el llamado en trinos en *Bufo marinus* y *Centrolene buckleyi* (Fig. 1).

Con respecto a la tasa de emisión de llamados hay una gran variación intra e interespecífica. Así, se encuentran animales que realizan pocos llamados en 10 minutos (Tabla 1), mientras que otros, aún en la misma especie, presentan una alta tasa de llamados, esto último principalmente en las especies con series de llamados de 1 ó 2 notas. Por su parte, la frecuencia dominante fue la variable estudiada con la menor variación intraespecífica, pero interespecíficamente se relacionó de manera inversa y significativa con la longitud corporal (Fig. 2).

Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos, cada especie tiene un llamado típico que la caracteriza e identifica de las demás. Esto corrobora la importancia de los cantos como mecanismo de aislamiento que evita el entrecruzamiento entre especies distintas, al ser este el principal medio que utilizan las hembras para seleccionar el macho con el que han de aparearse (Pough *et al.*, 1998; Zug, 1993).

Entre los anuros se presentan llamados de diferentes formas, desde llamados simples que suenan como gotas de agua al golpear el suelo (goteo), hasta llamados con múltiples notas y pulsos (Pough *et al.*, 1998). El que los Hylidos del municipio de Ibagué compartan un llamado con presencia de pulsos, podría estar de acuerdo con su cercanía filogenética, reflejada en las estructuras y la forma que utilizan para la producción del sonido; por ejemplo, para los sonidos pulsados por el movimiento de los músculos faríngeos que abren y cierran la laringe y permiten el paso del aire a las cuerdas vocales haciendo que estas vibren (Bradbury & Vehrencamp, 1998). También esta semejanza acústica se presenta en *Leptodactylus fuscus* y *Leptodactylus fragilis*, aunque en estos animales el sonido suena como un silbido y es más agudo en el

segundo de los casos. Sin embargo, para corroborar esta relación entre la semejanza en los cantos de especies diferentes y su cercanía filogenética, se hace necesario el análisis de más individuos dentro de un mismo taxón junto con otro tipo de pruebas morfológicas y moleculares.

En los cantos de las ranas y los sapos analizados se presenta gran variación intra e interespecífica, principalmente en lo que respecta a la tasa de llamados y duración de un llamado. Estos resultados reflejan que la tasa de emisión de llamados puede ser afectada por varios factores, como el entorno social del animal, así, cuando está vocalizando solo, principalmente al inicio de la noche, el número de cantos es muy bajo, mientras que al formarse el coro, la tasa de emisión de los cantos se incrementa notablemente; esto para hacerse más fácil de localizar en el coro (Schwartz, 1987), como para demostrar su territorialidad (Schwartz, 1989; Stewart & Rand, 1991).

También se encontró que algunos animales realizan llamados simples de 1 ó 2 notas por largos periodos de tiempo, esto podría reflejar dos cosas: primero, un estilo de canto característico para un grupo de animales como los *Colostethus*, ya que existen registros para estos animales con llamados repetitivos y de una nota (Lüddecke, 1999); y segundo, que entre un coro se establecen jerarquías que se manifiestan a través de una alta tasa de llamados. En la duración del llamado, las notas por llamado y los pulsos por nota también se presentan variaciones, aunque no tan amplias como la tasa de llamados; esto último podría ser justificado como una estrategia de los machos para evitar la sobreposición y la interferencia acústica de sus cantos (Schwartz & Well, 1985).

Entre las características vocales, la que menor variación intraespecífica presentó fue la frecuencia dominante. Esto se puede esperar, ya que la frecuencia de emisión de un sonido está en relación con la vibración de las cuerdas vocales, los cartílagos asociados y el tamaño del saco vocal (Pough *et al.*, 1998; Bradbury & Vehrencamp, 1998), los cuales no generan grandes diferencias acústicas para animales de una misma especie con un tamaño corporal semejante, aunque sí en especies diferentes. En comparaciones interespecíficas, el tamaño corporal es una variable que se relaciona inversa y significativamente con la frecuencia dominante (Bernal & Guzmán, 1999). En el presente trabajo también se pudo constatar este resultado (Fig. 2); y la posible razón a esta relación se puede atribuir a un incremento en las cuerdas vocales, los cartílagos y la caja de resonancia, que en los animales de mayor tamaño produce sonidos más graves y con una frecuencia más baja (Bradbury, 1998; Pough *et al.*, 1998).

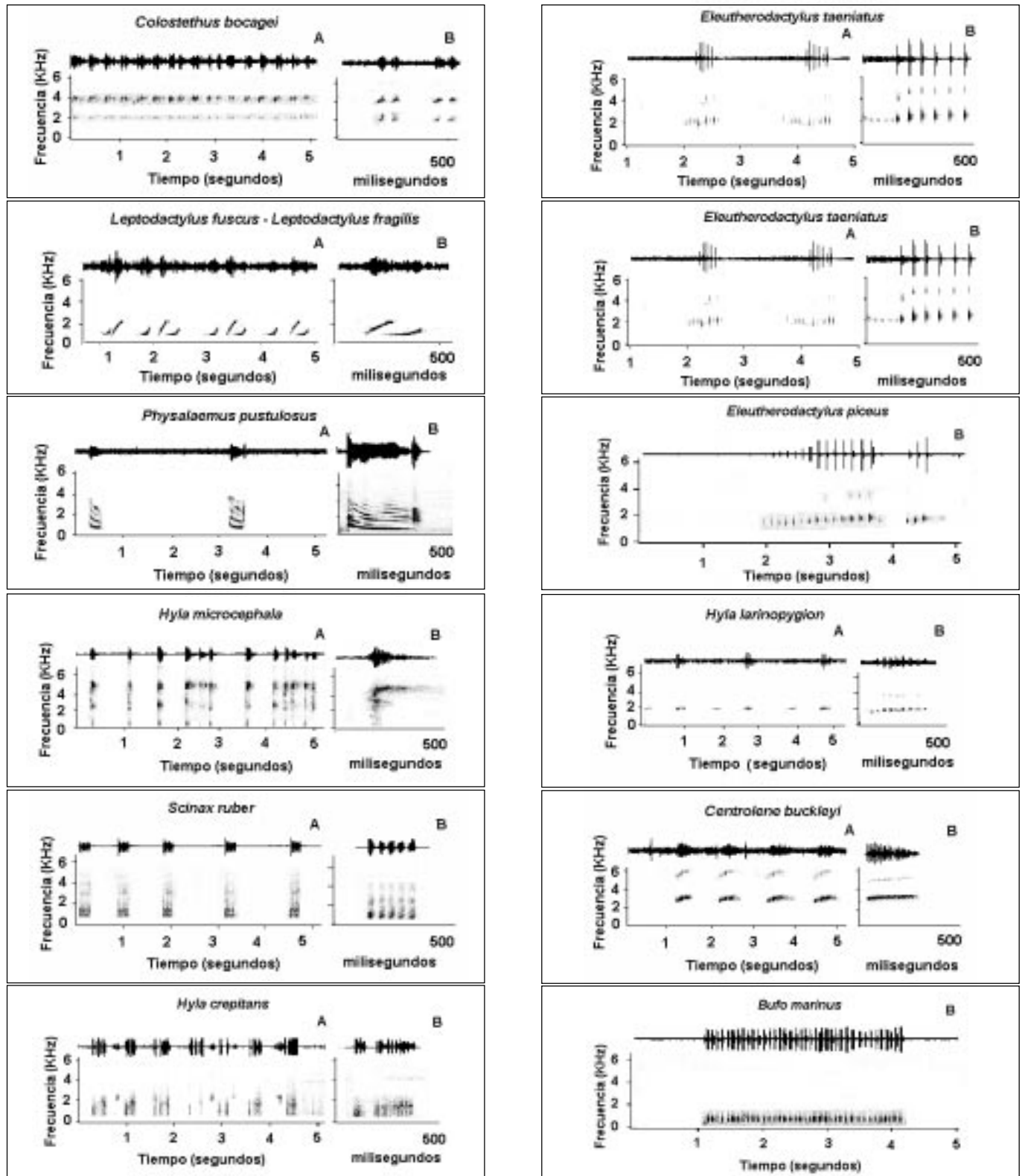


Figura 1. Características acústicas de la tasa de llamados (A) y de un llamado (B) en trece especies de anuros del municipio de Ibagué. En la parte superior de las figuras están representados los oscilogramas y en la inferior los sonogramas.

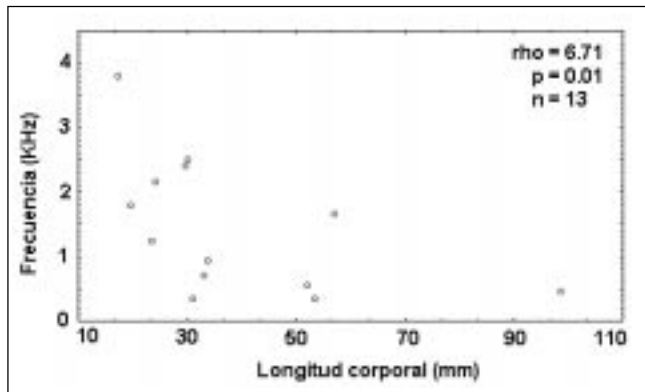


Figura 2. Relación entre la frecuencia dominante y la longitud corporal en trece especies de anuros del municipio de Ibagué.

Teniendo en cuenta que cada animal tiene unas características acústicas propias de su especie, y que responde a su entorno ambiental y social, se hace necesario seguir caracterizando el canto de los anuros con el fin que de utilizarlo como una herramienta de apoyo para los problemas de determinación y clasificación taxonómica, y para los interesados en estudiar la comunicación acústica en anuros.

Agradecimientos

De manera muy especial agradecemos al Comité Central de Investigaciones de la Universidad del Tolima por su apoyo financiero y su amplia disposición para el desarrollo del presente trabajo. También, al profesor John D. Lynch por su valiosa colaboración en la determinación de los ejemplares recolectados y a Adolfo Amézquita por su asesoría. Además, queremos resaltar el importante trabajo en campo para el desarrollo de este estudio de Jormmy M. Machado y David A. Bejarano

Por último, agradecemos a CORTOLIMA por los permisos concedidos para captura y caza científica, y al señor Nicolás Laserna y la señora Carmenza Ruiz, propietarios de la hacienda laguna “El Toro” y la finca “El Silencio”, respectivamente.

Bibliografía

- Bernal, M.H., D. A. Bejarano, J.M. Machado, D.P. Montealegre, C.A. Páez. 2000. Estudio de la Anurofauna del municipio de Ibagué. *Acta Biológica Colombiana*, **5** (2): 23-27.
- Bernal X., F. Guzmán. 1999. The advertisement Call of three *Eleutherodactylus* species (Anura: Leptodactylidae) in a Colombian Highland Community. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, **23** (suplemento especial): 261-264.
- Bradbury, J. W., S. L. Vehrencamp. 1998. Principles of Animal Communication. Sinauer Associates, Inc. Massachusetts, U. S. A.

- Cocroft, R. B., M. J. Ryand. 1995. Patterns of advertisement call evolution in toads and chorus frogs. *Animal Behaviour*, **49**: 283-303.
- Duellman, W. E., L. Trueb. 1986. Biology of amphibians. McGraw Hill. Inc. New York.
- Gerhardt, H. C. 1994. The evolution of vocalization in frogs and toads. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **25**: 293-324.
- _____, 1998. Acoustic properties used in call recognition by frogs and toads. Pgs. 455-483 in the *Evolution of Amphibian Auditory System*, Edited by B. Fritzsch, M. J. Ryan, W. Wilcanski, T. E. Hetherington, and W. Walkowiak. John Wiley and sons. New York. N.Y.
- Given, M. F. 1993. Males responses to female vocalizations in the carpenter frog, *Rana virgatipes*. *Animal Behaviour*, **46**: 1139-1149.
- Klum, G. M., H. C. Gerhard. 1987. Use of non arbitrary acoustic criteria in mate choice by female gray tree frogs. *Nature*, **286**: 288.
- Lüddecke, H. 1999. Behavioural Aspects of the Reproductive Biology of the Andean Frog *Colostethus Palmatus*. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, **23** (suplemento especial): 303-316.
- Naris, P. M., R. R. Capranica. 1978. Communicative significance of the two-note call of the treefrog *Eleutherodactylus Coqui*. *Journal of Comparative Physiology*, **127**: 1-9.
- Pough, F. H., J. B. Heiser, W. N. McFarland. 1996. Vertebrate life. Fourth Edition. Prentice Hall. New Jersey.
- Pough, F.H., R. M. Andrews, J. E. Cadle, M. L. Crump, A. H. savitzky, K. D. Well. 1998. Herpetology. Prentice Hall. New Jersey.
- Rincón, F., F. Castro. 1998. Aspectos ecológicos de una comunidad de *Eleutherodactylus* (anura: Leptodactylidae) en un bosque de niebla del occidente de Colombia. *Caldasia*, **20** (2): 193-202.
- Ryand, M. J. 1985. The tungara Frog. A study in sexual selection and communication. The University of Chicago Press, Chicago.
- Schwartz, J. J. 1987. The function of call alternation in anuran amphibians: a test of three hypotheses. *Evolution*, **41**: 461-471.
- _____, 1989. Graded aggressive calls of the spring peeper, *Pseudacris crucifer*. *Herpetológica*, **45**: 172-181.
- Schwartz, J. J., K. D. Wells. 1985. Intra-and interspecific vocal behavior of the neotropical treefrog *Hyla microcephala*. *Copeia*, **1985**: 27-28.
- Stewart, M. M., A. S., Rand. 1991. Vocalizations and the defense of retreat sites by males and female frogs, *Eleutherodactylus coqui*. *Copeia*, **1991**: 1013-1024.
- Taigen, T. L., K. D. Wells. 1985. Energetics of vocalization by an anuran amphibian (*Hyla versicolor*). *Journal of Comparative Physiology*, **B155**: 163-170.
- Vargas, F., F. Castro. 1999. Distribución y preferencia de microhabitats en anuros (Amphibia) en bosques maduros y áreas perturbadas en Anchicayá, Pacifico Colombiano. *Caldasia*, **21**(1): 95-109.
- Zug, G.R. 1993. Herpetology. An introductory biology of amphibians and reptiles. Academic Press. San Diego, California.

Recibido el 25 de abril de 2002.

Aceptado para su publicación el 11 de febrero de 2004.

ASPECTOS REPRODUCTIVOS Y DESARROLLO LARVAL DE *HYLA PUGNAX* (ANURA: HYLIDAE) EN EL PIEDEMONTTE ANDINO DE VENEZUELA

por

Andrés Chacón-Ortiz¹, Amelia Díaz de Pascual² & Francisco Godoy³

Resumen

Chacón-Ortiz, A., A. Díaz & F. Godoy: Aspectos reproductivos y desarrollo larval de *Hyla pugnax* (Anura: Hylidae) en el Piedemonte Andino de Venezuela. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **28** (108): 391-402, 2004. ISSN: 0370-3908.

Se evalúa la actividad reproductiva de *Hyla pugnax*, y se describe su desarrollo larval, en las inmediaciones del Río Doradas, segundo desarrollo del complejo de represas Uribante-Caparo (7° 46'N; 82° 00'W), Estado Táchira, Venezuela. En el lugar se detectó la presencia de 159 nidos, algunos de forma circular, otros elípticos, colocados en su mayoría en sustratos arenosos en las márgenes de las quebradas. El área promedio de cada nido fue de 326,12 cm². Los nidos eran simples en su edificación, compuestos de una sola cámara, donde se encontraban depositados los huevos. Sin embargo, la presencia de huevos en otros sitios con condiciones húmedas sugiere que esta especie es facultativa en la construcción de sus nidos. El número máximo de nidos (46) se registró en febrero, en plena época de sequía, disminuyendo en número a lo largo del año, en correspondencia con el comienzo de las primeras lluvias, indicando que se reproduce durante la estación seca. La cantidad de huevos depositados se encuentra en un intervalo de (1783-2050) con promedio de 1896, depositados en una masa gelatinosa transparente colocada en monocapa sobre la superficie del agua. El desarrollo larval de *Hyla pugnax*, desde el huevo hasta la metamorfosis completa, dura 95 días a una temperatura de 21°C. Las larvas fueron preservadas en solución de 70% alcohol, 1% formalina y depositados en la Colección de Vertebrados de la Universidad de Los Andes (CVULA), en Venezuela. El estatus taxonómico de *Hyla pugnax* ha sido objeto de controversias. Los aportes de este trabajo permiten ratificar su entidad específica.

Palabras clave: Aspecto reproductivo, Desarrollo larval, *Hyla pugnax*, Grupo *boans*, Amphibia, Anura, Hylidae, Represa Uribante-Caparo, Río Doradas, Andes, Venezuela.

- 1 Biólogo, Profesional Asociado a la Investigación, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), Caracas, Venezuela. Correo electrónico: aecortiz@ivic.ve.
- 2 Profesor Titular, Ecología Animal, Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: adiaz@ciens.ula.ve.
- 3 Biólogo, Desarrollo Uribante-Caparo, filial de CADAFE, Táchira, Venezuela. Correo electrónico: cuencaparo @telcel.net.ve.

Abstract

The reproductive activity of *Hyla pugnax* was evaluated, as well as the description of the larval development, near of the Doradas river, Sector Las Cuevas, second development of the Uribante-Caparo Complex (7° 46'N; 82° 00'W), Táchira State, Venezuela. 159 nests were detected. Most nest were located in sandy substrates of the riverbanks. Most of them were nearly circular or elliptic, no rampart were observed. The nest average area was 326,12 cm². The nests were single chambers, and the eggs were deposited on the water surface. Free clutches were also found on wet areas. This species appear to be facultative nest-builder, depending on whether the substrate was suitable for doing so. The maximum number of nests (46) were registered during February, in dry season; they diminishing through the year with the beginning of the first rains, which indicate that this species reproduces during the dry station. The quantity of eggs deposited in each pool range from 1783 to 2050 (average of 1896). The larval development of *Hyla pugnax*, until completed metamorphosis last 95 days at a room temperature of 21°C. Then they were preserved in a 70% alcohol solution, 1% formalin and deposited in the Colección de Vertebrados of the Universidad de Los Andes (CVULA), in Venezuela. The taxonomic status of *Hyla pugnax* has been object of controversies. The contributions of this work allows to ratify the species entity.

Key words: Reproductive aspects, Larval development, *Hyla pugnax*, *boans* group, Amphibia, Anura, Hylidae, Uribante-Caparo dam, Doradas river, Andes, Venezuela.

Introducción

En contraste con la mayoría de los grupos animales, los anuros tienen una gran diversidad de modos reproductivos, siendo una estrategia muy particular la elaborada por un grupo conocido como “ranas arbóreas gladiatoras” pertenecientes al grupo *Hyla boans* [Duellman (1970); Kluge (1979), (1981); Hoogmoed (1990); La Marca (1996); Höbel (1999), (2000)], debido a la construcción de nidos excavados en las inmediaciones de ríos o quebradas y la conducta agresiva de los machos durante la reproducción. Las especies que pertenecen al grupo son: *Hyla boans* (Linnaeus), *Hyla circumdata* (Cope), *Hyla crepitans* (Wied), *Hyla faber* (Wied), *Hyla pardalis* (Spix), *Hyla pugnax* (Schmidt), *Hyla rosenbergi* (Boulenger) e *Hyla wavrini* (Parker).

En Venezuela se encuentran [La Marca (1992); Barrio (1998) y Péfaur & Rivero (2000)] cuatro especies que pertenecen a este grupo: *H. boans*, en los Andes y Amazonas; *H. crepitans*, de amplia distribución en el país; *H. pugnax* en los Andes e *Hyla wavrini* en la cuenca Amazónica.

La construcción de este tipo de nidos, fue registrada por primera vez para *H. faber* en Brasil Goeldi (1895), quien observó un grupo de machos removiendo el barro con el hocico y formando un hueco circular, mientras con las patas delanteras elaboraban las paredes a los lados de la depresión, donde se produce el amplexo y posterior depósito de los huevos. Posteriormente, Lutz (1960a); (1960b) ratifica este hecho para *H. faber* en Brasil. El mismo año

Lutz (1960c) describe un hecho similar en *H. pardalis*; posteriormente Duellman (1970) registra esta conducta en *H. boans*, y Martins & Moreira (1991) en *H. wavrini*.

Kluge (1981) hace una descripción detallada de la construcción de nidos por *H. rosenbergi* en Panamá y Colombia; los machos son territoriales y agresivos, construyen nidos para el desarrollo de los huevos; cavan pozos en la tierra y la arena en las cercanías de los cuerpos de agua donde depositan los huevos en una película gelatinosa sobre la superficie. El macho vigila el área aledaña atacando a otros machos que se acercan. Posteriormente la inundación de los pozos, por efecto de la lluvia, hace que parte de las larvas y huevos sean liberados a las quebradas; el resto puede permanecer por mayor tiempo en el nido para ser liberado en un estadio de desarrollo más avanzado, aumentando la probabilidad de sobrevivencia.

Duellman (1970) y Kluge (1981), han observado que *H. crepitans* e *H. circumdata*, en varias localidades, no construyen nidos. Sin embargo *H. boans* en Brasil, *H. crepitans* en Venezuela (Caldwell, 1992) e *H. rosenbergi* en Costa Rica (Höbel, 1999), pueden hacerlo de forma facultativa, ya que estas especies poseen gran plasticidad en el momento de la reproducción, y pueden o no construir nidos dependiendo de las condiciones ambientales. Este último autor señala que los machos no vigilan el área ni tampoco se involucran en luchas con otros machos intrusos. Este hecho puede ser explicado con base en la alta disponibilidad de sitios para la construcción de nidos.

En las inmediaciones del complejo Uribante-Caparo, se observó una gran cantidad de nidos de este tipo elaborados por *Hyla pugnax*, lo que motivó la realización de este trabajo con la finalidad de evaluar su ciclo reproductivo.

Este trabajo tuvo como objetivos 1) caracterizar la estrategia reproductiva de *Hyla pugnax* con base en observaciones de campo; 2) reproducir en detalle el desarrollo larval de la especie y 3) proveer una descripción morfológica y osteológica del adulto de la especie.

Área de estudio

El estudio se realizó en el sector Las Cuevas (Fig. 1), regiones aledañas al río Doradas, 28 Km. SSE de Pregone-ro, Estado Táchira, Venezuela (7°46'N; 72°00'W), 800

m.s.n.m., el lugar pertenece al Segundo Desarrollo del Complejo de Represas Uribante-Caparo, bajo la influencia del embalse "Leonardo Ruiz Pineda" o embalse Uribante, contenido por la represa La Honda (Sierra, 1989).

El río Doradas transcurre por suelos de distinto origen geológico, siendo los más importantes las formaciones: Grupo Iglesias, La Quinta, Aguardiente, Río Negro y Mucuchachí (Castillo, 1968 y Péfaur, 1986). Los suelos del área de estudio pertenecen a la formación La Quinta, caracterizada por su color rojo debido a la presencia de óxidos ferrosos. Constituida por capas de areniscas, lutita y conglomerados intercalados en algunos casos por caliza. Debido a esta condición los suelos se hacen inestables, produciéndose gran cantidad de sedimentos cargados

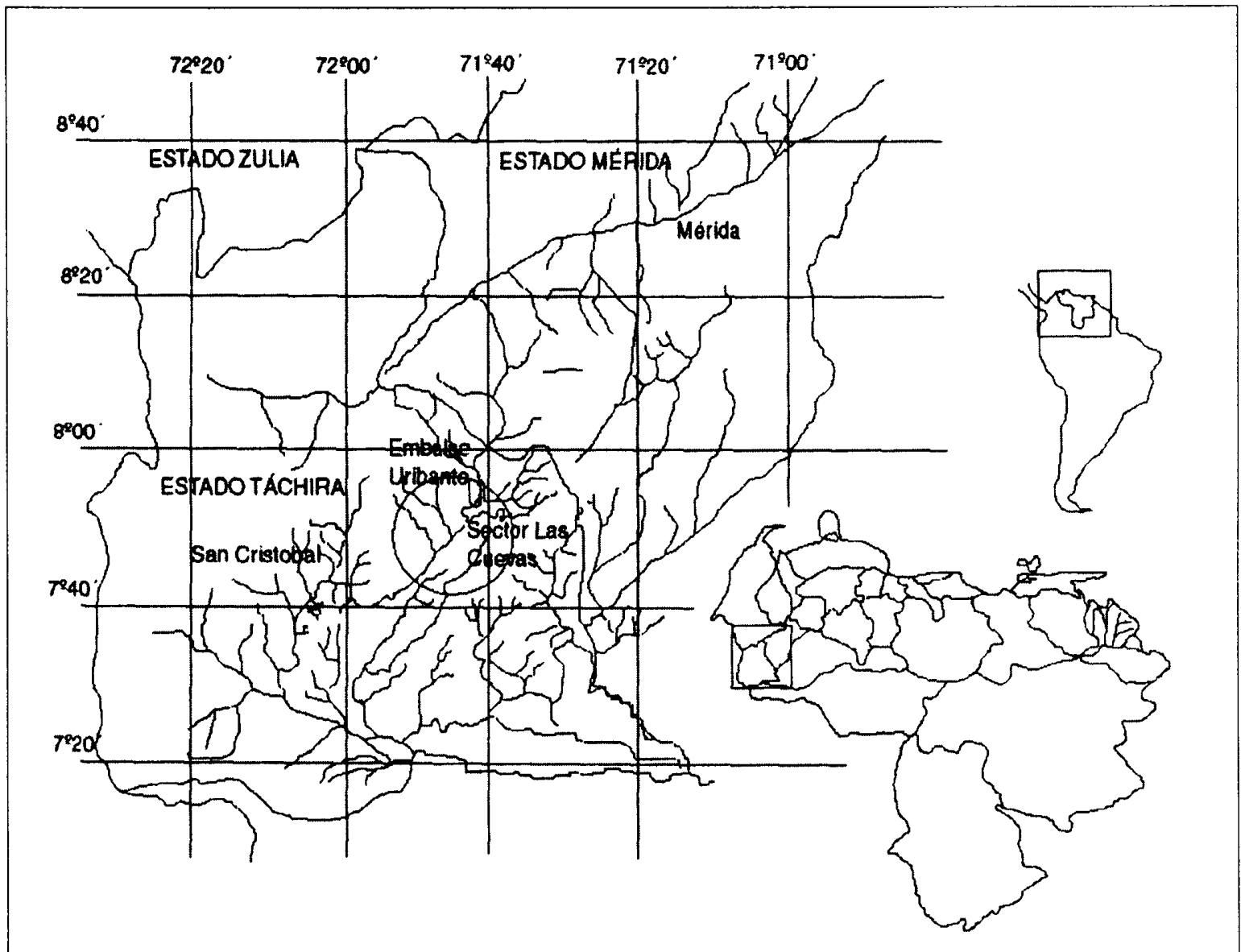


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio, Sector Las Cuevas, Represa Uribante.

de humedad (**Consortio Estudios hidroeléctricos**, 1972; 1976)

El lugar de muestreo se encuentra en el piso basal de la cordillera de los Andes, con una convergencia de varias unidades ecológicas que abarcan desde selva húmeda submontana hasta selva semicaducifolia montana. (**Ataroff & Sarmiento**, en prensa).

Por su situación geográfica y su alta heterogeneidad espacial éste complejo constituye parte del Corredor Caparo, que se encuentra situado en los Estado Barinas, Mérida, Táchira y Trujillo, teniendo un rango altitudinal que va desde 400 a 2.800 m.s.n.m., constituido por selvas naturales poco intervenidas, que son una continuación de los corredores Sierra Nevada y Pueblos del Sur (**Yerena**, 1994). La vegetación en la zona es siempre verde húmeda con una elevada riqueza florística; se destacan por su abundancia los géneros: *Ficus*, *Heliocarpus*, *Vismia*, *Miconia*, *Piper*, y *Solanum*.

Climáticamente el área se caracteriza por tener un régimen unimodal (Fig. 2), una insolación promedio anual de 2000 H/año y temperatura media diaria de aproximadamente 25°C. La humedad relativa media diaria fluctúa entre 63 y 75 % mientras la precipitación promedio anual está por encima de los 500 mm. Las lluvias se producen entre los meses de mayo y octubre, con los máximos ubicados en junio y julio cuyos valores se encuentran por encima de 500 mm. La estación seca se produce entre diciembre y marzo, encontrándose en enero y febrero valores por debajo de los 70 mm (**Péfaur**, 1986; **Sierra**, 1989).

Materiales y métodos

Los recorridos se realizaron durante el día y la noche siguiendo el camino que lleva a la presa Las Cuevas, cer-

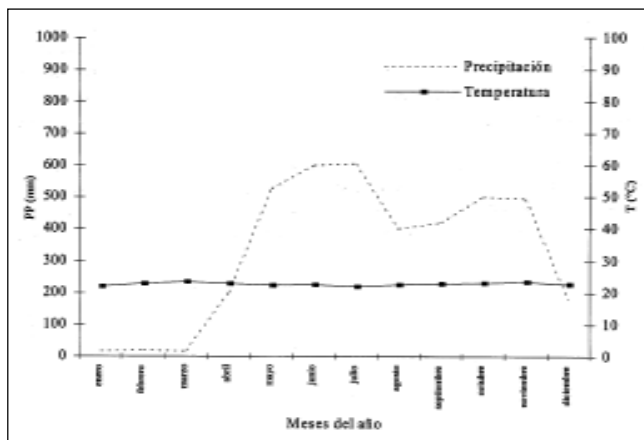


Figura 2. Variación de temperatura y precipitación del área de estudio.

ca de riachuelos, en aguas superficiales y lechos arenosos, con el fin de contabilizar número de nidos, medir su diámetro, distancia entre nidos, número de huevos / nido y observar evidencia de adultos en las zonas aledañas a los pozos. Para el estudio del desarrollo larval se procedió a recolectar, de manera aleatoria, el 20% de las nidadas con huevos recién depositados, encontrados en el mes de febrero. Se transportaron hasta el laboratorio, donde se colocaron 150 huevos, en cestas hechas de malla sintética de 1 mm de poro, con un área de 400 cm², estas fueron sumergidas en acuarios con agua, a una temperatura constante de (2°C) y luz artificial; cada recipiente se identificó con los datos del lugar y la fecha de recolección.

Diariamente se tomaron tres renacuajos de cada cesta; cada animal fue sacrificado disminuyendo su temperatura corporal y fue fijado en una cámara húmeda de formol al 7% por 48 horas, para ser colocado finalmente en una solución de alcohol isopropílico 70% y formol 1%, para su análisis posterior.

El estadio de cada ejemplar se determinó con ayuda de la tabla de **Gosner** (1960), se le asignó la edad (en horas y días) y se dibujó en detalle su morfología corporal observada bajo lupa con cámara clara marca Leica Wild M5.

Las medidas para renacuajos fueron tomadas con un calibrador (apreciación 0,05mm) y la descripción de la morfología externa se realizó siguiendo la metodología de **Altig** (1970), con ligeras modificaciones. Las medidas se abrevian de la siguiente forma: **LT**: longitud total (incluyendo la cola); **LC**: longitud cuerpo (sin incluir cola), para hacer gráficos y observaciones del crecimiento de la especie. La terminología y descripción general de la morfología interna oral de las larvas son los propuestos por **Altig** (1970), **Wassersug** (1976, 1980). Todas las medidas de los adultos desarrollados a partir de los renacuajos en laboratorio están dadas en milímetros junto con su desviación estándar, tomadas con un calibrador (apreciación 0,05mm). Las abreviaturas de las medidas utilizadas en el texto se describen de la siguiente forma: **LCC**: Longitud Cabeza-Cuerpo; **LCa**: Longitud de la Cabeza; **AC**: Ancho de la cabeza; **LF**: Longitud del Fémur; **LTi**: Longitud de la Tibia; **LP**: Longitud del Pie; **DI**: Distancia Interorbital; **AP**: Ancho del Párpado Superior; **DO**: Diámetro del Ojo (horizontal); **ON**: Distancia entre la zona anterior del Ojo y la Narina; **DT**: Diámetro del Tímpano (horizontal); **DIN**: Distancia Internarial. La fórmula para las membranas pediales sigue a **Myers & Duellman** (1982) con ligeras modificaciones. La serie de ejemplares estudiados, tanto renacuajos como adultos fue depositada en la colección de vertebrados de la Universidad de Los Andes (CVULA) bajo el número CVULA-IV-6444.

Resultados

Caracterización de los nidos. Las observaciones se realizaron entre los meses de enero y octubre del año 2001. Se registró un total de 159 nidos (Fig. 3). Estos se encontraron entre los meses de febrero y septiembre (Tabla 1), distribuidos en las márgenes de las quebradas, que circundan el lugar. Ubicados en bancos de arena, con muy poca cobertura vegetal, algunos de ellos contruidos a la sombra de plantas herbáceas que se encontraban en las orillas de las quebradas. Algunos individuos adultos fueron recolectados en las inmediaciones del nido, en amplexo, e inclusive dos machos fueron capturados dentro de los nidos. Ningún macho se observó durante el proceso de construcción del nido.

Se observaron huevos depositados en lugares muy húmedos, fuera del tipo de nidos descritos y colocados en superficies tales como: pisos de cemento de las construcciones abandonadas de la represa, pastizales donde el agua proveniente de un tanque se acumulaba sobre el pasto y en cualquier superficie que contuviera cierta cantidad de agua. Un 88,3% de los nidos (140) observados contenía huevos, la mayoría depositados recientemente, un 6% (10) contenía larvas desarrolladas y el restante 5,7% (9) fue abandonado sin haber sido utilizado o en él ya se había producido la liberación de larvas.

Los nidos son excavaciones en bancos de arena formados por quebradas durante la época de sequía. Cada nido posee una profundidad de más o menos cinco centímetros. El reborde del pozo sobresale de la superficie del banco de arena, sin rampas (Kluge, 1979; 1981; Höbel, 1999). Se observaron numerosas huellas de las patas en los alrededores del nido. Los nidos tenían forma circular

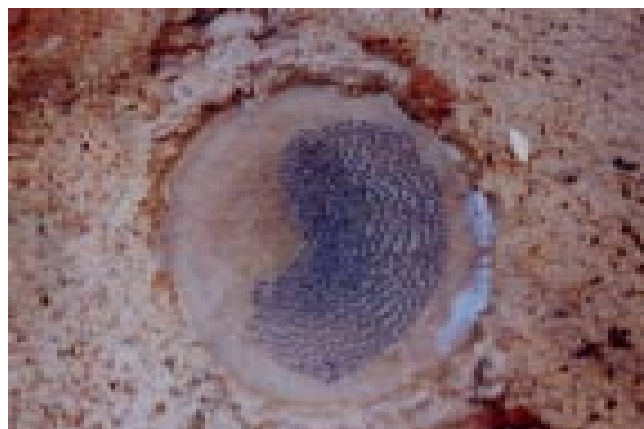


Figura 3. Características del nido de *Hyla pugnax*

o elíptica y estaban separados entre sí por una distancia promedio de 93,6 cm que varía en 87,89 cm.

Se observó una disminución del número de nidos en el transcurso del tiempo. Si se compara este resultado con los datos del promedio mensual de precipitación se observa una relación inversa entre estos valores que indica que el mayor número de nidos se encontró en la época de sequía, para disminuir drásticamente con la aparición de las lluvias (Fig. 4).

El diámetro promedio del nido no presenta variación a través del tiempo de muestreo, sus desviaciones estándar son muy pequeñas [1,06-2,53] (Tabla 1). El área promedio ocupada por cada nido, fue de 326,12 cm² con muy poca variación a lo largo del tiempo, mientras que el área total que ocupan los nidos en cada época de muestreo disminuye gradualmente debido a la desaparición de los mismos. El número de huevos promedio muestra varia-

Tabla 1. Variables medidas en los nidos durante las diferentes sesiones de muestreo, en el sector Las Cuevas de la Represa Urubante-Caparo (Se incluyen las desviaciones estándar).

Variables estudiadas	febrero	marzo	abril	mayo	julio	octubre
Nº de nidos	46	44	35	22	12	0
Diámetro promedio de los nidos (cm)	20,11 ± 2,53	19,92 ± 1,82	21,01 ± 2,33	20,46 ± 2,07	20,37 ± 1,06	0
Área promedio de los nidos (cm ²)	317,62 ± 6,42	311,65 ± 3,51	346,69 ± 4,43	328,77 ± 4,45	325,89 ± 2,13	0
Volumen promedio de los nidos (cm ³)	1238,72 ± 5,99	1371,26 ± 4,58	1664,11 ± 5,02	1643,85 ± 5,13	1466,51 ± 3,95	0
Nº huevos promedio	1918 ± 82,3	1856 ± 49,5	2010 ± 66,1	1963 ± 75,9	1736 ± 37,9	0

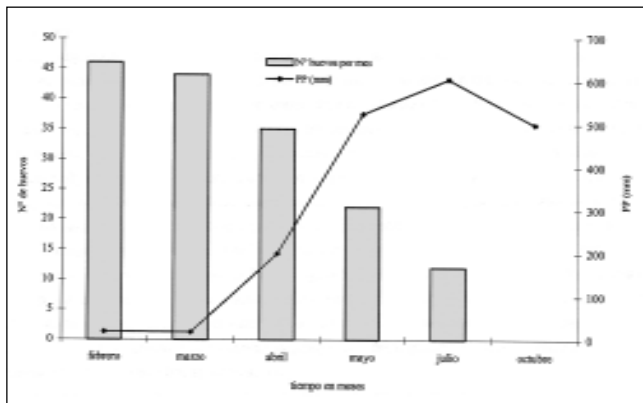


Figura 4. Variación temporal del número de nidos en relación con la precipitación.

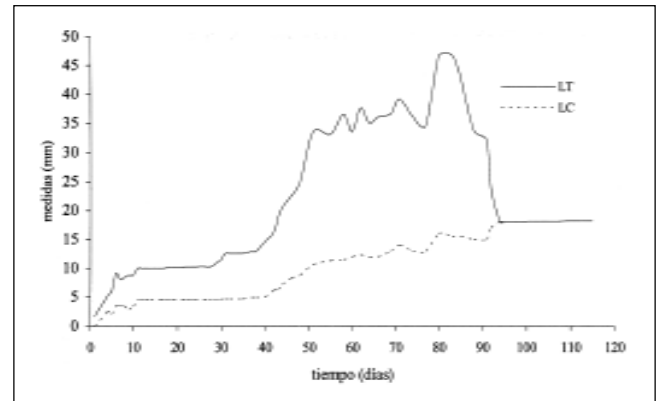


Figura 5. Crecimiento de la larva de *Hyla pugnax*, LT representa la Longitud Total y LC la Longitud del cuerpo sin incluir la cola.

ción en el tiempo (1896 ± 64.3), sus desviaciones estándar son pequeñas (Tabla 1).

Desarrollo larval de *Hyla pugnax*. El crecimiento de las larvas (LT) se puede dividir en 5 fases. Una primera fase tiende a un crecimiento exponencial, en el que el huevo se desarrolla y empieza la formación del embrión; esta fase dura 7 días aproximadamente. La segunda fase corresponde al momento en el cual se produce el desarrollo y aparición de las branquias, el embrión mantiene un crecimiento estacionario hasta que la larva cumple 40 días. La tercera fase consta de una segunda etapa de crecimiento exponencial donde los renacuajos aumentan su tamaño 4 veces aproximadamente, debido al aumento rápido del tamaño de la cola, hasta cumplir 50 días, cuando comienza la eruptopodia. En esta fase se detiene ligeramente el crecimiento, hasta el momento en que ocurre la reducción de la cola; la metamorfosis se completa a los 95 días (Fig. 5). El tamaño del cuerpo (LC) muestra un crecimiento continuo, las variaciones de la longitud total (LT) se deben a cambios en proporciones del largo de la cola.

Estadio 1. La masa de huevos, se encuentran en la superficie del agua; los huevos se unen por una gelatina transparente no diferenciada; su número oscila entre 1783 y 2050, intervalo similar al presentado para *Hyla crepitans* [entre 1000 a 2000 (Donoso-Barros & León-Ochoa, 1972)]. Los huevos son esféricos, con diámetro de longitud total (TL): $1.73 \pm 0,1$ mm, de mayor tamaño que para la especie *Hyla crepitans* (Donoso-Barros & León-Ochoa, *op. cit.*). El polo vegetativo es blanquecino, el casquete animal densamente impregnado de melanina, que le confiere un color pardo oscuro a negro; esta etapa puede durar de 12 a 15 horas (Fig. 6.A).

Estadio 15. Embrión de tamaño discretamente mayor que el huevo [longitud total (TL): $3,2 \pm 0,2$ mm], de forma alargada. En esta etapa se inicia el cierre del surco neural, las crestas neurales convergen en la línea media empezando el cierre desde la porción anterior; este estadio se alcanza en 28 a 36 horas (Fig. 6.B).

Estadio 16. Embrión de forma alargada con un tamaño aproximadamente el doble que el tamaño del huevo, [longitud total (TL): $3,2 \pm 0,1$ mm]. En esta etapa se culmina el cierre del surco neural, alcanzándose a las 40 ó 48 horas (Fig. 6.C).

Estadio 17. El embrión alcanza un tamaño tres veces más grande que el del huevo [longitud total (TL): $5,2 \pm 0,3$ mm.], es de forma oval a elíptica. En esta etapa aparece un esbozo pequeño de boca en la zona anterior, formándose a partir de 4 a 5 días en adelante (Fig. 6.D).

Estadio 18. Este estadio se alcanza a los 6 días, con embriones de longitud total (TL): $5,2 \pm 0,2$ mm, que se caracterizan por manifestar una respuesta muscular, con movimientos ligeros y esporádicos. Aparece un esbozo de la cola y una prominencia pequeña en la zona anterior, que corresponde al primordio de las branquias. En la parte anterior se observan dos ventosas, dispuestas anteroventralmente, bien desarrolladas y de forma irregular con protuberancias en forma de roseta. El botón caudal es corto y se insinúa ligeramente en el extremo posterior.

Estadio 19. Embriones de forma alargada (TL: $6,0 \pm 0,3$ mm) con movimientos musculares más regulares. El esbozo de cola crece en mayor proporción que el cuerpo. Se desarrolla la zona anterior, que corresponde con el primordio de las branquias (Fig. 6.E).

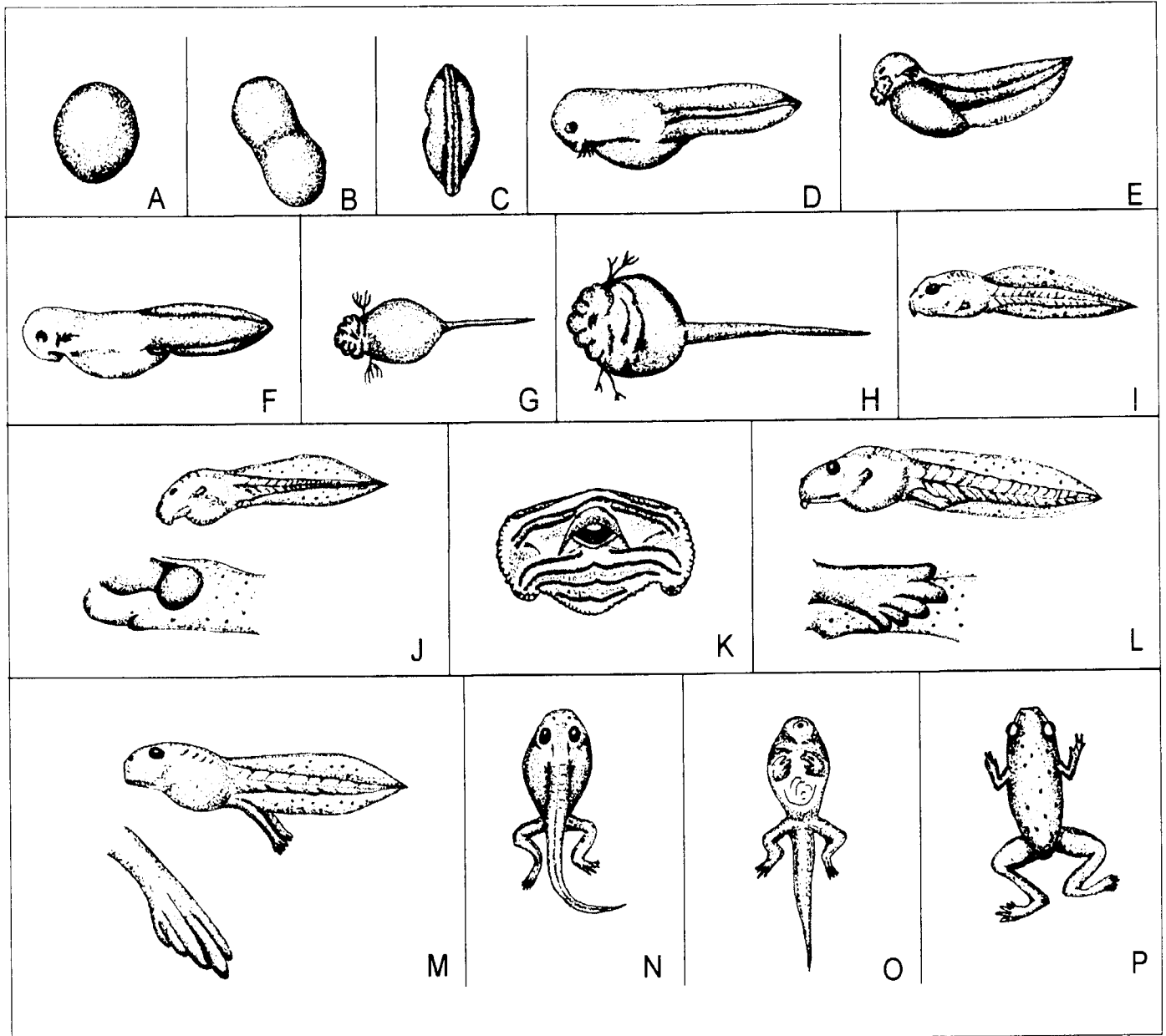


Figura 6. A. Estadio 1. B. Estadio 15. C. Estadio 16. D. Estadio 17. E. Estadio 19. F. Estadio 21. G. Estadio 22. H. Estadio 23. I. Estadio 25. J. Estadio 26. K. Detalle de la morfología oral del renacuajo de *Hyla pugnax* (estadio 26) Estadio 26. L. Estadio 35. M. Estadio 39. N. Estadio 40. O. Estadio 42. P. Estadio 45.

Estadio 20. Embriones de TL: $9,1 \pm 0,2$ mm, desarrollados a 7 días. Se caracterizan por poseer filamentos branquiales pares dispuestos a ambos lados del cuerpo. El superior se bifurca primero, mientras que el inferior es único. En esta fase aparece la boca, sin dentículos ni armazón córneo. La cola es corta y se insinúa ligeramente en el extremo posterior.

Estadio 21. Larvas de longitud total (TL) de $8,0 \pm 0,3$ mm. El filamento branquial superior se ramifica en tres ramas poco desarrolladas, mientras que el inferior es bifurcado. La boca, no posee dentículos, sólo se observa un primordio de armazón córneo (Fig. 6.F).

Estadio 22. Larvas de 9 días, con $8,5 \pm 0,4$ mm de longitud total (TL) que se caracterizan por poseer las dos primeras filas de dentículos A2 y P1; en la parte anterior se observan las ventosas. La longitud del cuerpo es $\frac{1}{2}$ la proporción del tamaño de la cola, se produce un claro desarrollo de las aletas ventrales y dorsales (Fig. 6.G).

Estadio 23. Larvas de $8,8 \pm 0,1$ mm de longitud total (TL). Los filamentos branquiales comienzan a atrofiarse, iniciando por el superior y luego por el inferior. En la parte anterior se observa un esbozo de ventosa. Se produce un claro desarrollo de las aletas ventrales y dorsales. Aparece el poro espiracular de *situs* izquierdo (Fig. 6.H).

Estadio 24. Larvas de longitud total (**TL**): $8,8 \pm 0,4$ mm; se observan las filas de los dentículos A1 y P2, y se completa la formación del armazón corneo del pico.

Estadio 25. Larva de 11 días con longitud total (**TL**) de $10,0 \pm 0,4$ mm. Cuerpo deprimido, más ancho que alto, de forma ovoide a redondo. Punta del hocico relativamente redondeada en vista dorsal. Ojos redondos, ubicados al dorso de la larva. Se inicia la reducción del pliegue opercular y comienza a observarse claramente el espiráculo en el lado izquierdo del cuerpo ubicado en la zona posterior al ojo y en posición ventro-lateral (Fig. 6.I).

El intestino aparece visible y la abertura se encuentra en la parte central del cuerpo, formando un tubo medianamente largo que se comunica con el exterior. Cola robusta y con el extremo posterior ligeramente romo. El dorso y la musculatura caudal de color marrón a negro y el vientre de color crema a blanco. El aparato oral se encuentra ubicado y dirigido hacia la parte antero-ventral del cuerpo. Aparecen las filas de dentículos P3 y P4.

Estadio 26. Renacuajos de 17 días, con longitud total de $11 \pm 0,3$ mm, y de longitud del cuerpo de $4,5 \pm 0,6$ mm; cuerpo deprimido (2 veces más ancho que alto). Ojos de forma ovoide ubicados en la parte dorsal del cuerpo y dirigidos hacia la parte lateral. Diámetro ocular, tomado en dirección horizontal, casi $\frac{1}{2}$ más pequeño que la distancia íterocular. Distancia íterocular 2 veces mayor que la distancia internarial. Narinas situadas en la región antero-dorsal del cuerpo, en la mitad de la distancia ojo-hocico. Las aberturas de las narinas relativamente grandes, circulares en vista dorsal, protuberantes con un pliegue triangular puntiagudo sobre el dorso en vista lateral. Espiráculo situado en el lado izquierdo, de forma corta, ligeramente tubular (5 veces más pequeño que el largo del cuerpo) y ubicado en la zona posterior al ojo, en posición lateral, con abertura dirigida dorso-posteriormente (Fig. 6.J).

Abertura cloacal centrada, formando un tubo medianamente largo y unido a la aleta ventral, musculatura de la cola moderadamente fuerte que alcanza el extremo posterior del cuerpo. Aleta dorsal 2 veces más alta que la aleta ventral; cola aguda y dirigida hacia arriba. Comienza la erupción, con los rudimentos posteriores redondeados. El dorso y la musculatura caudal son de color verde oliváceo con puntos negros irregulares. Vientre blanco a crema. Coloración en alcohol gris con puntos negros.

El aparato oral en posición antero-ventral $\frac{1}{2}$ más pequeño que el ancho del cuerpo. La boca (Fig. 6.K) con pliegues laterales sin protuberancias; disco oral no emargi-

nado, bordeado por una línea de papilas marginales redondeadas a ligeramente cónicas. El pico es relativamente delgado, el superior expandido distalmente, con una curvatura suave, mientras que el inferior es en forma de V marcada. La fórmula oral general de las filas de dentículos es igual a **2(2) / 4[1]** (Altig, 1970); posee dos filas de dentículos sobre el labio superior (A 1-2), la primera fila (A1) es la más externa o más alejada del pico, entera y ligeramente más pequeña que el tamaño del disco oral. La segunda fila (A2) es ligeramente más pequeña que A1 y posee una brecha en el centro. El labio inferior con cuatro filas de dentículos (P1-P4), en el que P1, fila más cercana al pico es ligeramente más corta que las filas superiores, con una brecha un poco mayor en el centro de la fila. La fila P2, es entera, de igual tamaño que P1. La P3 es entera y más corta que la P1 y P2. La P4, extremadamente corta con respecto a las filas anteriores, fórmula que difiere en gran medida con la presentada para *H. crepitans* (Donoso Barros & León-Ochoa, 1972), en la que los odontoides córneos forman un arco superior y dos medios arcos inferiores.

Estadio 27. Renacuajos de 40 días de desarrollo, con longitud total (**TL**) de $15,0 \pm 0,4$ mm y longitud del cuerpo (**LC**) de $4,7 \pm 0,5$ mm; las características externas en general idénticas al estadio anterior, con excepción de la posición de los ojos, dirigidos hacia el dorso del cuerpo; se reduce la distancia íterocular. La posición del espiráculo se desplaza al dorso. Se observan barras transversales en la zona dorso posterior de la larva. Los rudimentos de los miembros posteriores se agudizan, duplicando su tamaño.

Estadio 28. Larva de 45 días, de longitud total (**TL**) de $18,0 \pm 0,4$ mm y longitud del cuerpo (**LC**) de $4,7 \pm 0,9$ mm. Las características externas en general son idénticas al estadio anterior, con excepción de la posición de los ojos dirigidos dorsalmente, se reduce aún más la distancia íterocular. La cola alargada y ensanchada.

Estadio 29. Larva de 58 días, con longitud total (**TL**) de $36,5 \pm 0,4$ mm y longitud del cuerpo (**LC**) de $4,9 \pm 0,3$ mm. Comienza la diferenciación de dedos.

Estadio 30. Larva con longitud total (**TL**) de $36,5 \pm 0,5$ mm, y de longitud del cuerpo (**LC**) de $5,0 \pm 0,5$ mm; empieza el alargamiento del cuerpo y la cola se mantiene del mismo tamaño que el estadio anterior. Los rudimentos posteriores evidencian el primer y segundo dedo.

Estadio 35. Larva de 60 días y de longitud total (**TL**): $39,1 \pm 0,2$ mm y longitud del cuerpo (**LC**): $8,8 \pm 0,4$ mm. En las extremidades se observa la erupción de dedos poco desarrollados (Fig. 6.L).

Estadio 39. Larva de 88 días, con longitud total (TL): $46,7 \pm 0,7$ mm y longitud del cuerpo (LC) $12,6 \pm 0,6$ mm. Las extremidades posteriores muestran dedos completamente desarrollados, formación incipiente de los discos en el extremo de los dedos. Disco oral con pérdida de P4 (Fig. 6.M).

Estadio 40. Larva de 90 días, con longitud total (TL) de $33,8 \pm 0,5$ mm y longitud del cuerpo (LC) de $12,3 \pm 0,2$ mm; el cuerpo se reduce. Eruptopodia completa de las extremidades posteriores. Patas anteriores incluidas en una membrana sobre la región torácica. Pérdida de P2 y P3 en el disco oral (Fig. 6.N).

Estadio 41. Larva con longitud total (TL) de $32,0 \pm 0,9$ mm y longitud del cuerpo (LC) de $11,9 \pm 0,3$ mm. Disco oral con la pérdida de P1 y A2. Formación de los primeros dientes maxilares. Desaparición del pico. Reducción y atrofiamiento del espiráculo.

Estadio 42. Larva con longitud total (TL) de $32,0 \pm 0,4$ mm y longitud del cuerpo (LC) de $15,0 \pm 0,6$ mm. Crecimiento y elongación del cuerpo. Erupción de las patas anteriores, con los dedos completos. Pérdida de la fila de dentículos A1 y del espiráculo (Fig. 6.O).

Estadio 45. Larva de 95 días con longitud total (TL) de $18,0 \pm 0,5$ mm y longitud del cuerpo (LC) de $18,0 \pm 0,5$ mm. Reabsorción total de la cola. Pérdida del disco oral e inicio de la partición de la comisura de la boca (Fig. 6.P).

Caracterización morfológica y osteológica del adulto de *Hyla pugnax*. **Diagnosis.** Rana arbórea gladiadora, del grupo *Hyla boans* (Duellman, 1970; Kluge, 1979, 1981; Hoogmoed, 1990; La Marca, 1996; Höbel, 1999, 2000) de mediano tamaño (N:13; LCC= $54,81 \pm 7,97$), que no presenta dimorfismo sexual en cuanto al tamaño; de acuerdo con la siguiente combinación de caracteres: (1) membrana palpebral opaca, sin reticulaciones; (2) hocico bajo, truncado en vista lateral, deprimido anteroven-tralmente; (3) tímpano redondo, grande (alrededor de 70% de la longitud del ojo en vista horizontal), sin reborde cutáneo; (4) pequeña membrana entre los dedos de las manos; (5) líneas oscuras verticales sobre los flancos del cuerpo y en la superficie de los miembros traseros; (6) espinas prepolicales rudimentarias, cuyo nacimiento se origina en la zona lateral del dedo I de la mano y (7) ausencia de calcares en los talones. *Hyla pugnax* se puede diferenciar fácilmente de otras especies del grupo *boans* en Venezuela, ya que *Hyla boans*, presenta un mayor tamaño corporal [hasta 132 mm., Duellman (1970)]; membrana palpebral reticulada; manos casi totalmente palmeadas; no posee líneas oscuras verticales en la superficie posterior de los miembros traseros y presenta calcares

bien desarrollados en los talones. *Hyla wavrini* presenta un mayor tamaño corporal [hasta 113 mm., Hoogmoed (1990)]; membrana palpebral reticulada; cabeza dorsalmente cóncava; membranas entre los dedos de las manos totalmente palmeadas pero sin conectarse con los discos de las puntas de los dedos, últimas dos falanges del dedo IV libres de membrana; los machos poseen líneas oscuras o anillos en el dorso, calcares medianamente desarrollados; *Hyla crepitans* (Duellman, 1970; Kluge, 1979) posee membrana palpebral translúcida con pigmentación en la zona anterior; tímpano con reborde cutáneo posterior; narinas dirigidas hacia la región anterolateral; menor cantidad de membrana interdigital alcanzando solo la antepenúltima falange en el dedo IV del pie; en los machos, el nacimiento de la espina prepolicar se origina en la zona ventrolateral con respecto al dedo I de la mano.

Descripción. Animal de mediano tamaño. Cabeza ligeramente más ancha que larga, más estrecha que el ancho del cuerpo. Piel suave. Posee una membrana palpebral opaca; tímpano redondo de gran tamaño. Cantus rostralis no definido; hocico truncado ligeramente elongado en vista lateral; narinas ovales, dirigidas dorsolateralmente. Ojos protuberantes a los lados de la superficie dorsal de la cabeza. Dedos con ligero reborde cutáneo, presentando una pequeña membrana interdigital; punta de los dedos con discos ligeramente angulados, no redondeados excepto el primer dedo. Longitud relativa de los dedos III>IV>II>I. Presencia de espina prepolicar en machos, de forma curva poco desarrolladas, que sobresalen a los lados del primer dedo de la mano. Patas traseras de gran tamaño con longitud del muslo ($29,99 \pm 3,37$ mm) y longitud de la tibia ($30,38 \pm 3,28$ mm). Tubérculos subarticulares medianos redondos. Todos los dedos del pie con discos de forma similar a los de las manos, no redondeados. Longitud relativa de los dedos IV>V>III>II>I; poseen membrana interdigital ligeramente rugosa, con un desarrollo de tejido pedial máximo. La fórmula pedial es I2-2II2-3III(3-3)IV3-3V. Longitud promedio relativa de medidas en mm. con su respectiva desviación estándar (N:13), LCC: ($54,81 \pm 7,97$); LCa: ($20,30 \pm 0,15$); AC: ($19,45 \pm 0,10$); LF: ($33,66 \pm 0,40$); LTi: ($31,39 \pm 0,27$); LP: ($36,15 \pm 0,30$); DI: ($5,85 \pm 0,09$); AP: ($5,90 \pm 0,06$); DO: ($5,60 \pm 0,06$); ON: ($6,23 \pm 0,07$); DT: ($4,43 \pm 0,06$); DIN: ($4,17 \pm 0,08$).

Con respecto a la osteología, posee un cráneo moderadamente osificado, premaxilas pequeñas, ligeramente separadas entre si, zona anterior poco ensanchada. Maxilas anchas, robustas, redondas en la zona anterior. Nasaes delgadas, ligeramente osificados, poco prolongados en la zona anterior con respecto al margen del esfenetmoide. Esfenetmoide ancho, ligeramente cóncavo en la zona an-

terior, prolongándose entre los nasales, zona posteromedial deprimida; márgenes laterales rectos, no forman crestas. Frontoparietales elongados, más anchos en la zona posterior que la anterior, formando un triángulo, con superposición del proótico; fontanela presente. Crita parótica amplia, romboide. Prevomerianos elongados, con crestas laterales, presenta dos líneas rectas de 14 dientes vomerinos pequeños, no dispuestos en forma regular. En los machos, las patas anteriores presentan espina prepolical, separada ligeramente de la margen lateral del dedo I. Espina larga, con base ancha, poco deprimida en la parte posterior, incurvada y angulada hacia el extremo anterior. Las uniones de la diapófisis sacra con el sesamoide son abruptas. Hueso sesamoide curvo con dos protuberancias, una en dirección anterior y la otra en posterior que se superponen en la unión con el ilion.

Discusión

La estructura de los nidos estudiados es simple; se componen de una sola cámara donde se produce el amplexo a diferencia de los elaborados por *H. rosenbergi* que poseen dos cámaras; una principal donde se depositan los huevos y una rampa de donde el macho emite su canto (Kluge, 1981; Höbel, 1999).

El diámetro promedio de los nidos fue de aproximadamente 20,37 cm y ocupan un área de 326,12 cm². Este último valor es superior al señalado por Höbel (1999) para *Hyla rosenbergi*, (218 cm²). Sin embargo, esta última especie es de mayor tamaño corporal (SVL=63,1 mm), si se compara con *Hyla pugnax* que mide SVL: 54,81 mm. No es posible hacer mayores comparaciones con otras especies del mismo grupo debido a la falta de información numérica en relación con este aspecto.

En las observaciones de campo se detectaron otros sitios de ovoposición para la especie, tales como: cavidades sobre el piso de cemento donde se encontraban las instalaciones de la represa, en lugares donde se deposita el agua de lluvia. Resultados similares fueron obtenidos por Höbel (1999), quien encontró que *Hyla rosenbergi* construye solo el 29% de los sitios de ovoposición (nidos); el resto está constituido por depresiones producidas por las patas del ganado vacuno, por las pisadas o marcas de las botas dejadas en la superficie, por lo que se considera que esta especie es facultativa en la construcción del nido (Caldwell, 1992; Höbel, 1999, 2000). Los resultados de este trabajo indican que *Hyla pugnax* utiliza este mismo patrón reproductivo.

El número de huevos depositados por *H. pugnax* se encuentra en un rango de 1783 a 2050 con un promedio

de 1896. Estos valores caen en el rango observado por Donoso-Barros & León-Ochoa (1972) para *Hyla crepitans* en Venezuela (1500-2000). Los huevos de *Hyla pugnax* son esféricos de color oscuro y de un tamaño de 1,73 mm, similar al registrado por Donoso-Barros & León-Ochoa (op. cit.) para *Hyla crepitans* (1,66 mm). Los huevos se encuentran depositados en una monocapa gelatinosa transparente colocada sobre la superficie del agua. Llama la atención que *H. pugnax*, a pesar de ser un animal más pequeño, deposita mayor cantidad de huevos por nidada que *H. rosenbergi* (513-1231), señalado por (Höbel, 2000).

El primer hallazgo de estos nidos se hizo en el mes de febrero de 2001, en plena época de sequía, cuando se encontraron 46 nidos. No se pudo precisar con exactitud el inicio de la actividad reproductiva. Sin embargo, el resto de las visitas al lugar, permite determinar que tal actividad finaliza cuando empiezan las primeras lluvias, por lo que se puede predecir que el comienzo de la actividad reproductiva está asociado con el inicio de la época de sequía, y probablemente el registro del mes de febrero corresponda al máximo real de dicha actividad, asociado con el mínimo de precipitación.

En relación con la época de reproducción de estas ranas arbóreas gladiatoras neotropicales, no existe un patrón general. *H. rosenbergi* e *H. faber*, se reproducen en la época seca, mientras que *H. crepitans* en la Península de Paria, Venezuela, comienza su período reproductivo al final de la temporada de sequía (Donoso-Barros & León-Ochoa, 1972); *H. boans* en Brasil se reproduce durante la época de lluvia (Magnusson et al., 1999). Sin embargo, en el caso de *H. pugnax* se puede asignar un patrón esporádico seco, reconocido para las zonas de los trópicos donde hay una marcada estacionalidad de lluvias (Duellman & Trueb, 1986).

El desarrollo larval de *H. pugnax* dura 95 días, en condiciones de laboratorio a una temperatura de 21°C. La tasa de crecimiento de la longitud total (LT) de la larva, una vez eclosionada, es acelerado durante los primeros 7 días, pero se estabiliza en los siguientes 33 días. Luego continúa con una tasa de crecimiento más alta en los siguientes 20 días. Después de este período se produce la erupción y el crecimiento se hace más lento hasta el momento de la reabsorción de la cola, cuando la tasa de crecimiento disminuye.

Se pueden destacar los siguientes cambios morfológicos: disposición centrada del ano; narinas de posición anterodorsal con ventanillas protuberantes cónicas; cuerpo fuertemente deprimido hacia la zona antero-ventral;

espiráculo tubular y cola robusta que termina en forma de punta dirigida horizontalmente en la misma dirección del cuerpo; presencia de puntos de melanina cubriendo la zona dorsoposterior, en especial la aleta caudal.

Conclusiones

Los nidos construidos por *Hyla pugnax* son de forma circular a elíptica; tienen un promedio de 326,12 cm²; un volumen de 1476,89 cm³ y un número de 1896 huevos.

Las observaciones de campo, donde se detectó la utilización de otros sitios para depositar los huevos, permite inferir que la especie construye nidos de manera facultativa, dependiendo de las condiciones del microhábitat. La reproducción de esta especie se restringe a la época de sequía.

El desarrollo larval de *Hyla pugnax* dura 95 días a una temperatura de 21°C. La formación de las branquias se origina a los 7 días, la aparición del espiráculo a los 22 días, la segunda etapa de crecimiento exponencial, comienza con la erupción a los 45 días y por último la reabsorción de la cola a los 92 días de desarrollo.

Agradecimientos

Unidad Ecológica y Calidad Ambiental de DESURCA; a Margarita Lampo, Cesar Barrio, Emma Camacho, Hector Suarez y Carlos Carmona por sus recomendaciones; al Prof. Benito Briceño, Jefe del Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, por el uso de la lupa; a Nelson Sánchez y Henry Marquina por su labor de campo.

Bibliografía

- Altig, R.** 1970. A key to the tadpoles of the Continental United States and Canada. *Herpetologica*, **26**(2):180-207.
- Ataroff, M. & L. Sarmiento.** En prensa. Las unidades ecológicas de los Andes de Venezuela. En: La Marca, E. Y P. Soriano (eds.). *Reptiles de Los Andes de Venezuela*. Ed. MCTM, Mérida, Venezuela.
- Barrio, C. L.** 1998. Sistemática y Biogeografía de los Anfibios (Amphibia) de Venezuela. *Acta Biol. Venez.*, **18** (2): 1-98.
- Caldwell, J. P.** 1992. Diversity of reproductive modes in anurans: facultative nest construction in gladiator frogs. P: 85-97. En: W. C. Hamlett (ed.) *Reproductive biology of South American vertebrates*. Springer-Verlag, New York.
- Castillo, L.** 1968. Cuenca Montañosa del Urubante. Convenio ULA CorpoAndes. P: 177.
- Consorcio Estudios Hidroeléctricos.** 1972. Aprovechamiento integral de los ríos Urubante y Caparo. *Hidrología, Tomo 3. Estudio preliminar*. CADAPE. P: 1-73+Anexos.
- _____. 1976. Aprovechamiento integral de los ríos Urubante-Doradas, y Camburito-Caparo. *Estudio de Factibilidad. Informe Final*. CADAPE.
- Donoso-Barros, R & J. León-Ochoa.** 1972. Desarrollo y evolución larval de *Hyla crepitans* (Amphibia; Salientia). *Bol. Soc. Biol. de Concepción*, **44**: 117-127.
- Duellman W. E.** 1970. The hylid frogs of Middle America. *Monog. Mus. Nat. Hist. Univ. Kansas.*, **1**:1-753.
- _____. & **L. Trueb** 1986. *The Biology of Amphibians*. McGraw Hill, New York: P 670.
- Goeldi, E. A.** 1895. Contribution to the Knowledge of the breeding-habits of some treefrogs (Hylidae) of the Serra dos Orgaos, Rio de Janeiro, Brazil. *Proc. Zool. Soc. Lond.* **1895**: 89-97.
- Gosner, K. L.** 1960. A simplified table for staging anuran embryos and larvae with notes on identification. *Herpetologica.*, **16**:183-190.
- Hoogmoed, M. S.** 1990. Resurrection of *Hyla wavrini* Parker (Amphibia: Anura: Hylidae), a Gladiator frog from northern South America. *Zool. Med. Leiden* **64**(6): 71-93, figs. 1-14.
- Höbel, G.** 1999. Facultative nest construction in the Gladiator Frog *Hyla rosenbergi* (Anura: Hylidae). *Copeia*, **1999**(3): 797-801.
- _____. 2000. Reproductive ecology of *Hyla rosenbergi* in Costa Rica. *Herpetologica*, **56**(4): 446-454.
- Kluge, A.G.** 1979. The Gladiator Frogs of middle America and Colombia-a reevaluation of their systematics (Anura: Hylidae). Occasional papers of the Museum of zoology University of Michigan. **688**: 1-24.
- _____. 1981. The life history, social organization and parental behavior of *Hyla rosenbergi* Boulenger, a nest-building Gladiator Frog. Miscellaneous Publications, Museum of Zoology, University of Michigan. **60**: 1-170.
- Myers, C.W. & W.E. Duellman.** 1982. A new species of *Hyla* from Cerro Colorado, and other tree frog records and geographical notes from western Panama. *American Museum Novitates* **2752**: 1-32.
- La Marca, E.** 1992. Catalogo taxonómico, biogeográfico y bibliográfico de las ranas de Venezuela. Cuadernos Geográficos U.L.A., Mérida (9): 197pp.
- _____. 1996a. First record of *Hyla pugnax* (Amphibia: Anura: Hylidae) in Venezuela. *Bull. Maryland Herp. Soc.*, **32** (2): 35-42.
- Lutz, B.** 1960a. Fighting and an incipient notion of territory in male tree frogs. *Copeia* **1960**: 61-63.
- _____. 1960b. Nacão de território em anfíbios anuros *Hyla faber* Wied. *An. Acad. Bras. Cienc.* **32**:143-145.
- _____. 1960c. The clay nest of *Hyla pardalis* Spix. *Ibid.* **1960**: 364-366.
- Magnusson, W. E., A. P. Lima, J. M. Hero & M. Carmozina de Araújo.** 1999. The rise and fall of a population of *Hyla boans*: reproduction in a Neotropical gladiator frog. *Journal of Herpetology*, **33**(4): 647-656.
- Martins, M. & G. Moreira.** 1991. The nest and the tadpole of *Hyla wavrini* Parker (Amphibia, Anura). *Mem.ins.butantan* **53**: 197-204.

Péfaur, J. E. 1986. Estudio de la Calidad de agua del Embalse Uribante. Convenio MRNR. CADAFE. Facultad de Ciencias ULA. P: 124 + Anexos.

_____ & **J. A. Rivero.** 2000. Distribution, species-richness, endemism, and conservation of venezuelan amphibians and reptiles. *Amphibian and Reptile Conservation.*, **2**(2): 42-70.

Sierra N. 1989. Estructura de la comunidad zooplantónica del Embalse Uribante, Táchira. Tesis de grado para optar por la Licenciatura de Biología. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. P: 163 + Anexos.

Wassersug, R. J. 1976. Oral Morphology of anuran larvae: Terminology and general description. *Occ. Pap. Mus. Nat. Hist. Univ. Kansas.*, **48**: 1-23.

_____. 1980. Internal oral features of larvae from eight anuran families: functional, systematic, evolutionary and ecological considerations. *University of Kansas Museum of Natural History. Miscellaneous Publication*, **68**: 1-143.

Yerena, E. 1994. Corredores Ecológicos en los Andes de Venezuela. Parque Nacionales y Conservación Ambiental N° 4, Editorial Torino, Caracas. P.XI + 186+ 1 mapa plegable: 12 figuras.

Recibido el 20 de junio de 2002

Aceptado para su publicación el 11 de febrero de 2004

A NEW COLOMBIAN FROG OF THE GENUS *ELEUTHERODACTYLUS* FROM THE NORTHERN CORDILLERA OCCIDENTAL

por

John D. Lynch & M. Cristina Ardila-Robayo¹

Resumen

Lynch, J. D. & M. C. Ardila-Robayo: A new Colombian frog of the genus *Eleutherodactylus* from the northern Cordillera Occidental. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **28** (108): 403-408, 2004. ISSN 0370-3908.

Se describe una nueva especie del género *Eleutherodactylus* de elevaciones medias en la vertiente occidental de la Cordillera Occidental, al occidente de Antioquia, Colombia. Esta especie, con *E. bellona* y *E. mars* forman parte del grupo *bellona*; las tres especies son alopátricas y ocupan un área muy pequeña en la cordillera al occidente de Antioquia y la zona adyacente de Risaralda; para cada especie se muestra su autapomorfia.

Palabras clave: Especie nueva, Especiación, Sistemática.

Abstract

A new frog of the genus *Eleutherodactylus* is named from intermediate elevations of the western flank of the Cordillera Occidental in western Antioquia, Colombia. The new species, with *E. bellona* and *E. mars*, are united in the *bellona* species group. The three species are allopatric and occupy a small area of the cordillera in western Antioquia and adjacent Risaralda. Each species exhibits autapomorphies.

Key words: New species, Speciation, Systematics.

Introduction

The genus *Eleutherodactylus* is very diverse in both the Cordillera Occidental and Cordillera Central of Co-

lombia in contrast to the relatively impoverished Cordillera Oriental and Cordillera de Mérida (Lynch, 1998, Lynch & Suárez-Mayorga, 2004). Lynch (1992) named the peculiar, because it exhibits cranial co-ossification,

¹ Laboratorio de Anfibios, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.

E. bellona from western Antioquia. **Lynch & Ruiz-Carranza** (1996) named *E. mars* (also with cranial co-ossification) from nearly Risaralda and proposed that *E. bellona* and *E. mars* were sister species. Here we describe a third species, also from western Antioquia, of this small cluster of frogs and propose that the three form a clade.

Materials and methods

Terminology follows **Lynch & Duellman** (1997). In the description below, the following abbreviations are used: E-N, eye to nostril distance, HW, greatest head width, IOD, interorbital distance, SVL, snout-vent length. All specimens are housed in the Amphibian collection of the Instituto de Ciencias Naturales (acronym, ICN).

Eleutherodactylus polemistes sp. nov. (Figs. 1-2)

Holotype: ICN 18808, adult male, one of a series collected 11 November 1988 by M. C. Ardila-R, M. Barrera-R, H. López-A, O. Montenegro, and P. M. Ruiz-C.

Paratypes: ICN 18809-10, collected with holotype and ICN 18807, from quebrada La Penca, 2300 m (very near the type-locality).

Type-locality: Colombia, ANTIOQUIA: Municipio de Ur Rao, vereda La Clara, quebrada Cañahonda, 2320 m.

Etymology: Fieldwork in western Antioquia has been impossible for some time owing to the competing bands of insurgents resident in those forests. Both of the described species were named in allusion to a God and Goddess of war—and, continuing with the same allusion, we name the third species, *polemistes*, Greek, meaning warrior.

Diagnosis: (1) Skin of dorsum bearing numerous small tubercles, that of venter areolate; no dorsolateral folds; (2) tympanum higher than long, its length 27–32 % eye length; (3) snout relatively short, subacuminate in dorsal view, rounded in profile; *canthus rostralis* rounded, concave; (4) upper eyelid narrower than interorbital distance; no cranial crests; skin of head not co-ossified to skull bones; (5) vomerine odontophores oval; (6) males with vocal slits, no nuptial pads; (7) first finger shorter than second; all fingers with round disks; (8) fingers bear lateral keels; (9) ulnar tubercles present; (10) conical tubercle on heel; indistinct outer tarsal tubercles present; (11) inner metatarsal tubercle oval, 6 times size of round outer; few supernumerary plantar tubercles; (12) toes with lateral fringes and expanded disks, no webbing; Toe V very long; (13) brown above with darker brown markings; venter brown in males, cream in females, with brown spots;



Figura 1. *Eleutherodactylus polemistes*, ICN 18807, male, 28.0 mm SVL. Photo by Pedro M. Ruiz-C.



Figura 2. *Eleutherodactylus polemistes*, ICN 18808, holotype. Photo by Pedro M. Ruiz-C.

posterior surface of thighs brown; (14) adults small, three males 27.2–28.0 mm SVL, one female 33.2 mm SVL.

The two white flank glands or tubercles (see description and Figs. 1-3) seen in *E. polemistes* are not known for any other frog—certainly not for any *Eleutherodactylus* seen by the first author. *Eleutherodactylus polemistes* is readily distinguished from *E. bellona* and *E. mars* because each of them has co-ossified skin on the head and lacks a conical tubercle on the heel.

Description: Head broader than body, broader than long; HW 39.3–42.7 % SVL in males, 40.1 % in one female; snout slightly subacuminate in dorsal view, rounded in lateral profile, nostrils protuberant, directed dorsolaterally; *canthus rostralis* rounded but evident and concave; loreal region weakly concave, sloping gradually

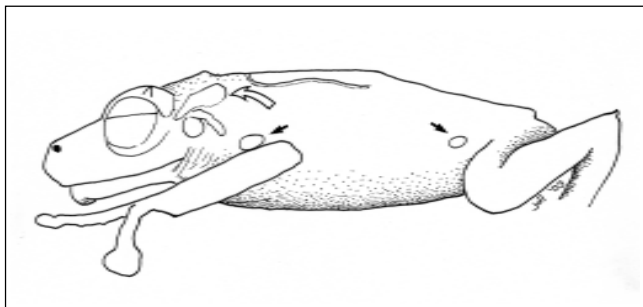


Figure 3. Drawing of *Eleutherodactylus polemistes*, ICN 18807, in lateral profile. Arrows indicate the white glands above the arm and above the groin (an autapomorphy of the species).

to slightly flared lips; E-N 81.6-91.7 % eye length; IOD broader than upper eyelid, flat, no cranial crests but frontoparietal bones textured; upper eyelid bearing conical tubercle as well as smaller rounded tubercles, its width 85.2-92.6 % IOD in males, 57.9 % in one female; supratympanic fold low, somewhat obscured by projecting textured squamosals; tympanum higher than long, separated from eye by distance slightly less than tympanum length, its length 26.8-32.4 % eye length; two postrictal tubercles; choanae round or oval, not concealed by palatal shelf of maxillary arch; vomerine odontophores median and posterior to choanae, each about size of a choanae, narrowly separated, each bearing slightly slanted row of 3-5 teeth; tongue oval, its posterior border not notched, posterior $\frac{1}{2}$ not adherent to floor of mouth; vocal slits lateral to tongue; vocal sac subgular.

Skin of dorsum bearing numerous low warts, ridge in form of inverted U on upper back, another in form of T over sacrum and urostyle; flanks bearing fewer but larger flattened warts; two pale warts (or glands) on each flank, one just dorsal to insertion of arm, other just anterodorsal to groin (Fig. 3); venter areolate but also bearing larger warts admixed with smaller granules; pair of subconical subanal warts; no anal sheath; upper surfaces of limbs smoother than dorsum; series of 4 low ulnar tubercles; palmar tubercle bifid, much larger than oval thenar tubercle; supernumerary palmar tubercles present; subarticular tubercles round, nonconical; fingers bearing lateral fringes; disks of outer fingers about twice as wide as digit below disk, round apically; disks of inner fingers smaller, round; all disks bear ventral pad, completely defined by circumferential grooves; first finger shorter than second; no nuptial pad in males.

Conical tubercle on heel (Fig. 4); outer tarsal tubercles indistinct; inner metatarsal tubercle oval, its length twice

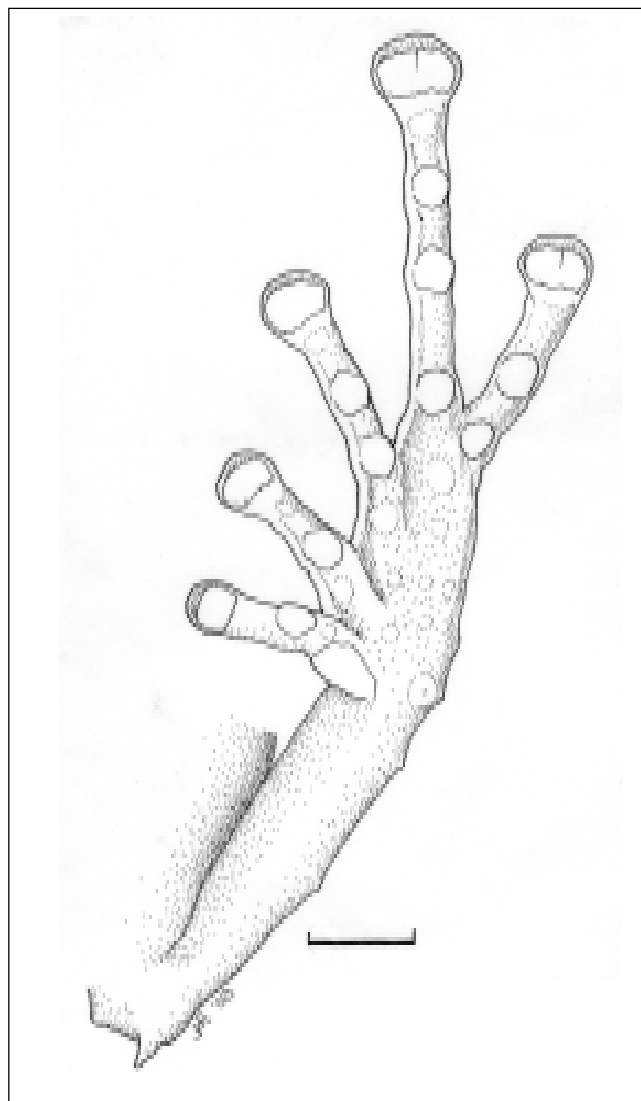


Figure 4. Underside of foot and tarsus of *Eleutherodactylus polemistes*, ICN 18809.

its width, about six times size of round outer metatarsal tubercle; few supernumerary plantar tubercles; subarticular tubercles round, nonconical; toes bearing lateral fringes, no webbing; disks of toes round, smaller than those of outer fingers; tip of Toe V reaches to middle of distal subarticular tubercle of Toe IV; when flexed hindlimbs held perpendicular to sagittal plane, heels overlapping; shank 53.2-58.0 % SVL.

Coloration in ethanol: Dorsum brown with darker brown or reddish-brown markings; some dorsal ridges cream; inner fingers cream; bars of thighs and tarsi complete, those on arms and shanks incomplete; underside of

shank brown banded with cream; all have a white wart immediately dorsal to arm insertion and another antero-dorsal to groin (ICN 18807 has small white spots over much of the flanks); venter brown in males, cream in female, all spotted with brown; brown inverted chevron across anterior edge of throat.

Coloration in life: Dorsum brown to dark olive with dark brown or black spots; dorsal spots edged with yellow or orange; flanks brown to olive with dark brown spots; flanks of ICN 18807 were described as bearing white flecks; venter dark brown with large whitish flecks in males; pale brown to brownish olive with black granules in female; limb bars dark brown or black edged with yellow or whitish-yellow; iris red above, bronze below and a black horizontal stripe (M. C. Ardila-Robayo fieldnotes).

Anatomy: The skin of the head was carefully separated from underlying tissue of the female paratype in order to access certain features of the cranium because the squamosal and frontoparietal bones suggested some useful information could be found there (Fig. 3)—the posterior end of the frontoparietals projects above the nape and the squamosal is outlined as a “structure” dorsal to the supratympanic fold and tympanum. The mandibular ramus of the trigeminal nerve passes lateral to the *m. adductor mandibulae* (condition S) and the *m. depressor mandibulae* originates on the squamosal (condition SQ) (Fig. 5). The frontoparietals and the zygomatic and otic rami of the squamosal bear bony protuberances (Fig. 5). The frontoparietals are like those of *E. bellona* (Lynch, 1992) and *E. mars* (Lynch & Ruiz-Carranza, 1996) except that *E. bellona* has cranial crests. The bony knobs seen upon the squamosal are not seen in either *E. bellona* or *E. mars*.

The white flank “warts” (Fig. 3) seem to actually be glands when cut transversely and examined under high magnification under a stereoscope. With only four specimens available, it seems premature to make a histological preparation.

Natural history: Little is known. All four specimens are adults and appear to be in reproductive condition. All four were found in patches of primary forest, closely associated with streams.

Discussion

In most frogs of the genus *Eleutherodactylus* (as well as in other frog species), the lateral margins of the frontoparietals are parallel or the brain case is wider anteriorly than near the posterior margins of the orbits (Figs. 95-97, 99, and 102 in Lynch, 1971). In frogs of the

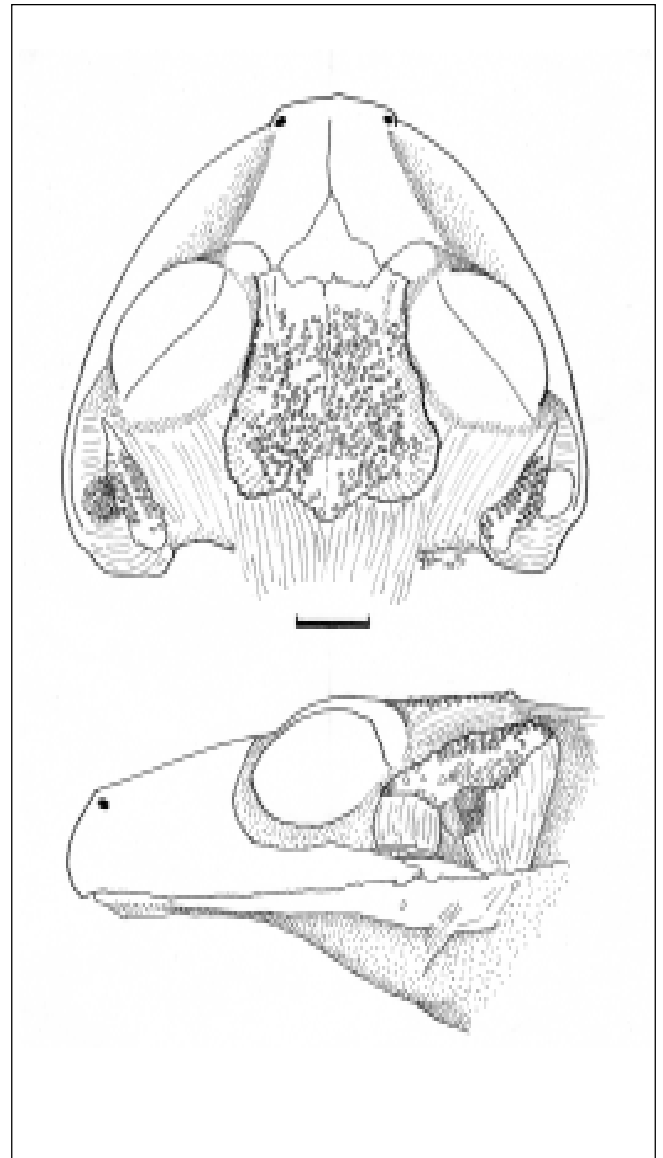


Figura 5. Dorsal and lateral views of skinned head of *Eleutherodactylus polemistes*, ICN 18810, scale equals 2 mm.

subgenus *Syrrhophus*, the braincase and the posterior margin of the orbits is broader than at the anterior margin (Figs. 106-107 in Lynch, 1971). Ornamentation of the frontoparietals occurs in relatively few species of *Eleutherodactylus* and takes the form of lateral or parasagittal crests or bony protuberances. In these cases, the tops of the frontoparietal bones, instead of being rounded, are flattened with obvious keels separating a frontoparietal table from the ascending processes of the frontoparietals.

In *E. bellona*, the only species studied ontogenetically, the frontoparietal table expands laterally near the posterior end of the table from an initial condition of the sides being parallel (Lynch, 1992), permitting the argument that the lateral expansion of the posterior part of the frontoparietal table is a derived condition. Out-group comparison results in the same conclusion. Thus, we suggest that this feature is a synapomorphy for the *E. bellona* species group, composed of three species—*E. bellona*, *E. mars*, and *E. polemistes*. A second synapomorphy is the co-ossification of the skin of the head and the underlying bones, shared by *E. bellona* and *E. mars*. Autapomorphies include: cranial co-ossification in males (*E. mars*), thick cranial crests (*E. bellona*), ventral expansion of the zygomatic and otic rami of the squamosal (*E. polemistes*), and white glands above the insertions of the limbs (*E. polemistes*). The discovery of these autapomorphies lends credence to some of the arguments of Mishler & Theriot (2000) without supporting the extreme counter position (Willmann & Meier, 2000: 113-114).

Lateral expansion of the frontoparietal table occurs in other species of *Eleutherodactylus*, for example in the *E. curtipes* group but there, the lateral expansion occurs above the mid-level of the orbits (Lynch, 1979, 1995, Lynch & Duellman, 1997) and this condition is seen in a wide assortment of frog species.

The fully resolved cladogram (Fig. 6) permits us to examine this clade relative to ideas in speciation (Lynch, 1999). Firstly, all three species are allopatric (or perhaps parapatric)

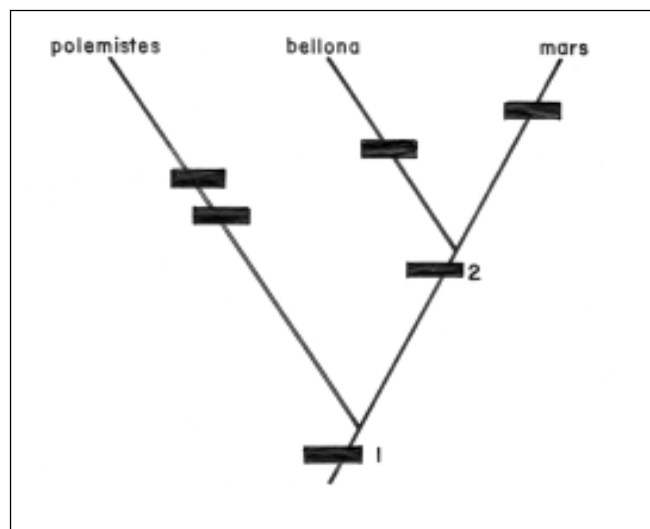


Figura 6. Cladogram for the species of the *Eleutherodactylus bellona* species group. Autapomorphies and synapomorphies are mentioned in text.

yet all occur in a very small (about 10-15 Km X 150 Km) geographic area on the northern part of the Cordillera Occidental. The presence of autapomorphies in each species is inconsistent with the expectations of peripatric speciation but not with those for vicariance (or dichopatric) speciation. The known geographic distributions of both *E. mars* and *E. polemistes* are small, surely reflecting the lack of adequate fieldwork, in comparison to that of *E. bellona*, small in contrast to many frog distributions but perhaps not for most northern Andean *Eleutherodactylus* (Lynch, 1998, 1999, Lynch & Duellman, 1997). Using Lynch's (1999:153) simple means of identifying different ecological subunits, *E. bellona* is scored as BC, *E. mars* as B, and *E. polemistes* as C—providing another case of ecological shifts associated with speciation. The brief distances between known distributions suggests that there has been no extinction of populations in the core of the distribution of this small clade of frogs.

Bibliography

- Lynch, J. D. 1971. Evolutionary relationships, osteology, and zoogeography of leptodactyloid frogs. Misc. Publ. Univ. Kansas Mus. Nat. Hist. (53): 1-238.
- _____. 1979. Leptodactylid frogs of the genus *Eleutherodactylus* from the Andes of southern Ecuador. Misc. Publ. Univ. Kansas Mus. Nat. Hist. (66): 1-62.
- _____. 1992. A new species of *Eleutherodactylus* (Amphibia: Leptodactylidae) from western Colombia with cranial co-ossification. Copeia 1992: 826-831.
- _____. 1995. Three new species of *Eleutherodactylus* (Amphibia: Leptodactylidae) from páramos of the Cordillera Occidental of Colombia. Journal of Herpetology 29: 513-521.
- _____. 1998. New species of *Eleutherodactylus* from the Cordillera Occidental of western Colombia with a synopsis of the distributions of species in western Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fís. Nat. 22 (82): 117-148.
- _____. 1999. Ranas pequeñas, la geometría de evolución, y la especiación en los Andes colombianos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fís. Nat. 23 (86): 143-159.
- _____. & W. E. Duellman. 1997. Frogs of the genus *Eleutherodactylus* (Leptodactylidae) in western Ecuador: systematics, ecology, and biogeography. Nat. Hist. Mus., Univ. Kansas, Spec. Publ. (23): 1-236.
- _____. & P. M. Ruiz-Carranza. 1996. New sister species of *Eleutherodactylus* from the Cordillera Occidental of southwestern Colombia (Amphibia: Anura: Leptodactylidae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fís. Nat. 20 (77): 347-363.
- _____. & A. M. Suárez-Mayorga. 2004 ("2003"). Two additional new species of *Eleutherodactylus* (Leptodactylidae) from southwestern Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fís. Nat. 27 (105): 607-612.

Mishler, B. D. & E. C. Theroit. 2000. The phylogenetic species concept (*sensu* Mishler and Theroit): monophyly, apomorphy, and phylogenetic species concepts, pp. 44-54, In, **Q. D. Wheeler & R. Meier** (eds.), Species Concepts and Phylogenetic Theory. Columbia University Press, New York.

Willmann, R. & R. Meier. 2000. A critique from the Hennigian species concept perspective, pp. 101-118, In, **Q. D. Wheeler & R. Meier** (eds.), Species Concepts and Phylogenetic Theory. Columbia University Press, New York.

Recibido el 20 de junio de 2004.

Aceptado para su publicación el 30 de agosto de 2004.

LAS SERPIENTES DEL GÉNERO *ATRACTUS* WAGLER, 1828 (COLUBRIDAE, XENODONTINAE) EN LA AMAZONIA COLOMBIANA

por

Juan J. Silva Haad*

Resumen

Silva, J. J.: Las serpientes del género *Atractus* Wagler, 1828 (Colubridae, Xenodontinae) en la Amazonia colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **28** (108): 409-446, 2004. ISSN: 0370-3908.

Se presenta un estudio biológico y ecológico del género *Atractus* Wagler, 1828, en la región amazónica colombiana. Un total de 113 especímenes fueron obtenidos mediante un muestreo realizado en 40 puestos de captura ubicados en las diferentes regiones naturales. Se describen las características de los hábitats y biotopos donde se hallaron las diferentes especies. Tras el análisis de la muestra se identificaron cuatro taxones ya registrados para Colombia [*A. elaps* (Gunther, 1868); *A. latifrons* (Gunther, 1868); *A. major* Boulenger, 1894; *A. occipitoalbus* (Jan, 1862)]. Dos especies constituyen nuevos registros [*A. snethlagae* Cunha & Nascimento, 1983; *A. zidoki* Gasc & Rodríguez, 1979]. Se describen siete nuevas especies [*A. charitoeae* sp. nov., *A. emersoni* sp. nov., *A. davidhardi* sp. nov., *A. helibelluomin* sp. nov., *A. emersoni* sp. nov., *A. janethae* sp. nov. y *A. lucilae* sp. nov.]. Se analizan los aspectos reproductivos, alimenticios y las características de los diferentes hábitats.

Palabras clave: Colubridae, serpientes, *Atractus*, Amazonas, Colombia, nuevas especies, sistemática.

Abstract

A biological and ecological study of the snakes of the genus *Atractus* in the Colombian Amazon based on study of 113 specimens from 40 localities reveals the presence of six described species and seven undescribed species.

Key words: Colubridae, snakes, *Atractus*, Amazonas, Colombia, new species, systematics.

* Calle 145 No. 25-61. Edificio Jagai-Cedritos. Apto. 207. Bogotá. Tel.: 6279719. Tel. en Leticia: 098-5927155 (Casa), 098-5926533 (Laboratorio).

Dedicatoria

A mi maestro y amigo entrañable, el profesor Helio Emerson Belluomini, del Instituto Butantan de San Pablo, D. F., Brasil, en homenaje y reconocimiento por su valiosa contribución al desarrollo de la ofidiología médica, por sus trabajos sobre la producción media de veneno de las serpientes del Brasil y por el estudio de la toxicidad experimental de los venenos de *Viperidae* y *Crotalinae*.

A mi esposa Rosario Collazos de Silva paradigma de amor, caridad y tolerancia. Su presencia durante 42 años en la región constituyó estímulo vital en el desarrollo de la investigación.

Introducción

En este trabajo se exponen la taxonomía, ecología y los aspectos biológicos más sobresalientes del género *Atractus*, cuyas especies viven en los más variados hábitats de la región amazónica. Además, se describen siete nuevas especies y se citan cuatro nuevos registros para el territorio colombiano.

El presente estudio corresponde a un proyecto de investigación relativo a la ofidiofauna amazónica, realizado con la colaboración voluntaria del personal al servicio de la Salud Pública del departamento. Se inició a mediados de 1962 y, durante 40 años se cumplieron las etapas propuestas. Como resultado se obtuvo una muestra de material científico representada en 2.671 ejemplares de las diferentes especies y subespecies de ofidios de la región.

Se estudiaron y analizaron 112 especímenes preservados del género *Atractus* y se observaron las serpientes en su medio natural. Fue un trabajo complejo debido a la extensión del área geográfica investigada, carente de vías de comunicación, con poco recurso humano y sin apoyo del Estado.

La zona geográfica estudiada corresponde a los departamentos de Amazonas, Caquetá, Putumayo y Vaupés. Esta región tiene un área de 285.784 km² de bosques primarios húmedos y ríos de la extensa cuenca amazónica. Figura 1. La limitación de los recursos económicos, la extensión del área estudiada, y la alteración del orden público en la región del piedemonte de la cordillera Oriental, no permitieron un muestreo más amplio.

Los estudios relativos a la biodiversidad de la ofidiofauna de la Amazonia colombiana son escasos. Unas pocas publicaciones están dispersas en revistas nacionales y foráneas

En el proyecto de investigación para el estudio de la de las especies del género *Atractus*, de la región amazónica, se consideraron los siguientes objetivos:

- a) Levantar el inventario de las especies.
- b) Determinar la distribución espacial de éstas en el área de estudio.
- c) Investigar su biología y ecología.
- d) Conocer la frecuencia poblacional de las especies y las fluctuaciones temporales de éstas en las diferentes épocas del año.
- e) Estudiar los hábitos alimenticios y de reproducción.

Los siguientes caracteres taxonómicos externos e internos se tuvieron en cuenta para la determinación de las especies.

- 1) Escamado cefálico.
- 2) Escamado del cuerpo: escala dorsal, ventral y subcaudales.
- 3) Morfometría general.
- 4) Dentición.
- 5) Hemipenes.
- 6) Coloración.
- 7) Patrones de los diseños.

Con base en el estudio de 113 especímenes estudiados e identificados, que hoy forman parte de la colección de ofidios "Juan J. Silva Haad", en Leticia, Amazonas, Colombia, con duplicados en el Instituto de Ciencias ICN en Bogotá, se puede inferir que los ofidios del género *Atractus* están representados por 14 taxones: *A. elaps* (Gunther, 1868), *A. latifrons* (Gunther, 1868), *A. major* Boulenger, 1894, *A. occipitoalbus* (Jan, 1862) y *A. torquatus* (Dumeril *et al*, 1854). Se presentan dos nuevos registros para Colombia: *A. snethlagae* Cunha O. & Nascimento F., 1983 y *A. zidoki* Gasc & Rodríguez, 1979 y siete nuevas especies: *A. heliobelluomini*, *A. emersoni*, *A. charitoe*, *A. franciscopaivai*, *A. davidhardi*, *A. janethae* y *A. lucilae*.

Guía fundamental en la elaboración del presente trabajo fueron las excelentes publicaciones de los investigadores Oswaldo **Rodríguez Cunha** y Francisco **Paiva do Nascimento** del Museo "Emilio Goeldi", acerca de las serpientes de la Amazonia oriental brasilera, en la región este del estado de Pará. (1975, 1976, 1977, 1978, 1982,



Figura 1. Amazonia colombiana. Área de trabajo.

1984, 1987, 1989 y 1993). Los trabajos de **Afranio Amaral** relacionados con los ofidios de la región neotropical y de Colombia (1926, 1927, 1928, 1929, 1930, 1931, 1932, 1933, 1934, 1935, 1936, 1937, 1954 y 1978); **Richard Hoge-Romano** y colaboradores (1947, 1953, 1960, 1962, 1969, 1971, 1972, 1976, 1978 y 1979); **Dixon & Soini**, "Iquitos región, Perú" (1986); **Hoogmoed** (1979, 1980); **Jean-Philippe Chippaux** (1986); **Martins & Oliveira** (1988, 1993); **Duellman** (1978); **Savage** (1960); **Nicéforo María** (1939, 1942); **Dunn** (1944); y **Pérez-Santos & Moreno** (1988).

Otras referencias de trabajos citados están relacionadas en la bibliografía.

Materiales y métodos

La captura de serpientes en sus hábitats se realizó en 30 puestos, localizados en las diferentes regiones naturales de la Amazonia colombiana. Figura 2.

Para la captura de los ofidios se utilizaron ganchos y cordeles con un lazo corredizo en la punta, apoyado en tubos de aluminio de 1,60 m. de largo.

La mayoría de los ofidios fueron aprehendidos vivos y para su observación se colocaron en cajas especiales de plástico, con adecuada humedad y ventilación.

El muestreo, en el territorio del departamento de Amazonas, fue intenso y continuo durante toda la época del año. Las otras áreas estudiadas corresponden a los territorios de los departamentos del Caquetá, Putumayo y Vaupés. En esta labor colaboraron, voluntariamente, el personal de los organismos de salud de la antigua dirección de salud pública del departamento de Amazonas: médicos, auxiliares de enfermería, colonos y nativos de la Amazonia, cuyo valioso conocimiento de la región, permitió el éxito de la labor. El autor realizó, regularmente, operaciones de campo, en diferentes épocas del año, teniendo en cuenta la dinámica de las poblaciones de ofidios, principalmente, los desplazamientos temporales que presentan algunas especies.

Muchos especímenes se recibieron muertos. Estos se examinaron, se anotó su procedencia geográfica, el tamaño, sexo, coloración; y a cada ejemplar se le colocó una etiqueta numerada amarrada al cuerpo con una seda. Todos los ejemplares examinados y estudiados se registraron en un catálogo en el cual se anotaron la procedencia geográfica, la fecha de la captura, nombre del recolector y algunos datos biológicos de interés, como el contenido

alimenticio, el estado de preñez y el hábitat en donde fue hallado. A cada ejemplar recibido se le elaboró una ficha taxonómica de identificación específica.

Para el análisis morfológico de las especies fueron tenidos en consideración los principales caracteres taxonómicos usados corrientemente en herpetología valorando cuantitativamente los elementos merísticos en el orden siguiente: escamado cefálico: caras superior, inferior y laterales; escamas del cuerpo de las regiones dorsal y lateral; escamas ventrales, anales y subcaudales.

Examen de los hemipenes mediante extracción manual en ejemplares frescos y, por disección anatómica, en especímenes fijados en alcohol etílico al 75%. Numeración de los dientes maxilares y mandibulares. Morfometría general: tamaño de la cabeza, del cuerpo y la cola.

Mediante disección abdominal se exploró el contenido alimenticio de estómago, intestino y cloaca. En los ejemplares frescos se estudiaron la coloración y los patrones de diseños corporales. Las fotografías fueron tomadas por el autor.

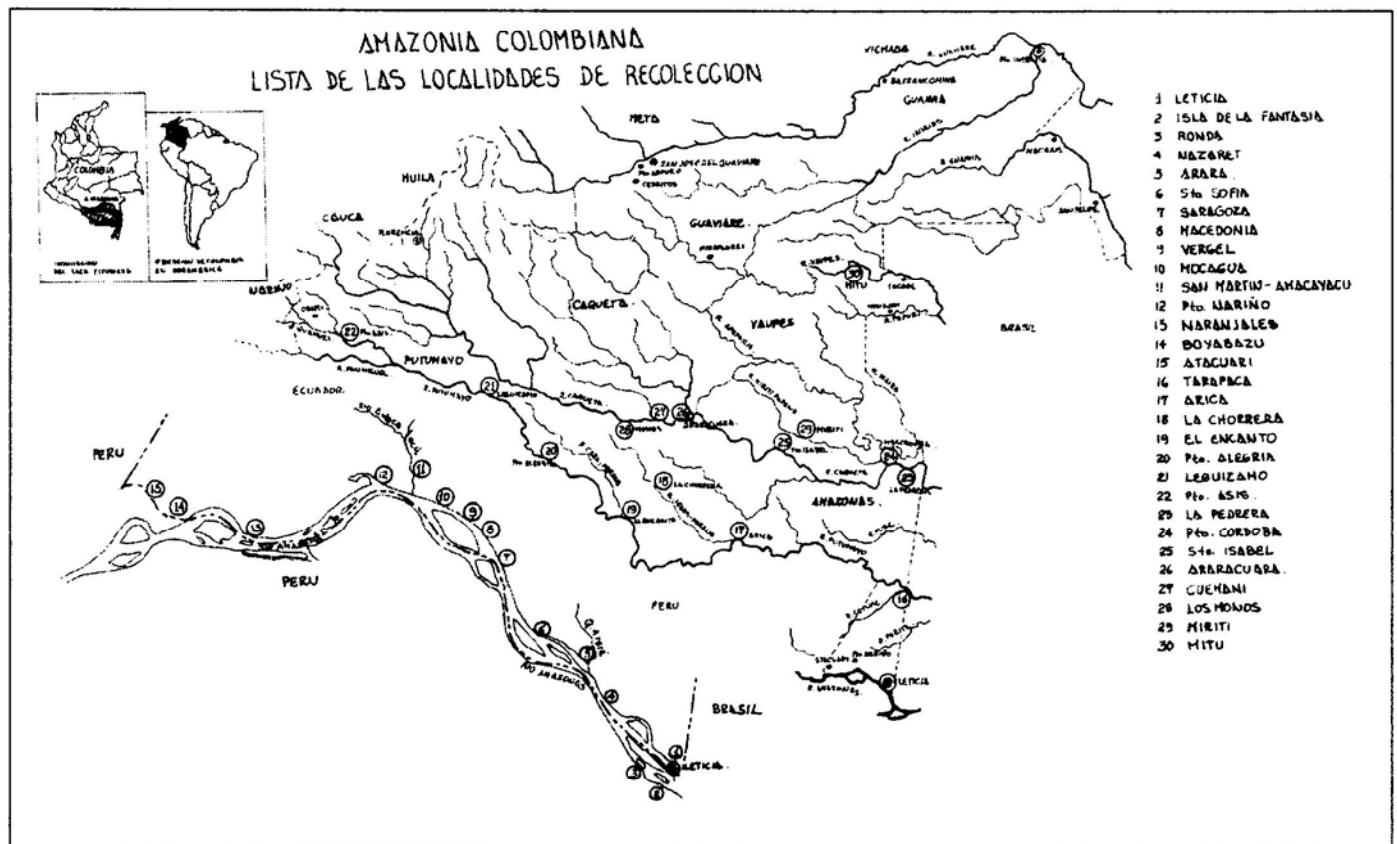


Figura 2. Amazonia colombiana. Localidades de recolección de ofidios.

La Amazonia colombiana: generalidades.

La región amazónica colombiana es una extensa planicie situada al sur del país, por debajo de los 200 msnm, con una extensión de 392.21 km². En su conjunto, representa una provincia biogeográfica (Hylea amazónica) rica en ecosistemas y comunidades naturales. Su relieve plano presenta varias elevaciones, entre las cuales, la más importante es la Serranía de la Macarena, con un área de 4.700 km². Otras elevaciones denominadas Montes Islas o "Inselberg" son cerros de naturaleza granítica, aislados, con alturas de 100 a 300 metros, se hallan en los territorios de los departamentos del Guainía y Vaupés. En el departamento de Amazonas se encuentra una importante elevación, de textura granítica, denominada cerro de la "Pedrera" o Jupatí, con 300 m. de altura, localizado en la localidad del mismo nombre.

Se consideran como sus límites naturales por el norte, el río Guaviare, y, desde allí, en dirección noroccidental, siguiendo la línea de separación entre el llano y la selva, hasta la desembocadura del río Ariari, en el departamento del Guaviare, para luego ascender en dirección del río Güejar hasta su nacimiento, en el vértice occidental de la sierra de la Macarena, incluida esta formación en la Amazonia. En dirección sur occidental, siguiendo la curva de nivel de los 500 metros, en la cordillera Oriental, hasta los límites con la República del Ecuador.

La Amazonia colombiana limita con Venezuela por el Departamento del Guainía; con el Brasil por los departamentos del Vaupés y Amazonas; con el Perú por los departamentos de Amazonas y Putumayo; y con el Ecuador por el último de los señalados.

La planicie amazónica es una inmensa región sedimentaria compuesta, principalmente, por terrenos del terciario superior e inferior amazónico, (abarca las épocas Pleistocénica y Miocénica) entre 2 a 5 millones de años, cubierta por bosques húmedos tropicales y en una extensión menor por depósitos recientes del cuaternario.

La extensión de la cuenca amazónica se ha calculado en 7.000.000 km². El eje hidrográfico lo constituyen los ríos Amazonas propiamente dicho, Ucayali, en el Perú y el denominado brazo de Solimoes, en Brasil. El sistema tiene una longitud de 6.762 km. Cerca de un millar de tributarios principales drenan hacia el Amazonas desde los macizos montañosos de los Andes, de la Guayana y del Plan Alto Central brasileiro.

La extensión de la Amazonia colombiana es de 392.21 km² lo cual representa el 6,5% del área de la gran cuenca. Su posición geográfica en el extenso bioma amazónico

corresponde a la denominada Amazonia Noroccidental de la cual hacen parte las Repúblicas de Ecuador y Perú y una porción de la Amazonia brasilera que se extiende hasta la ciudad de Manaos. Figura 3.

Resultados

Un total de 113 especímenes, del género *Atractus*, procedentes de la Amazonia colombiana fueron estudiados y clasificados en el presente trabajo.

Taxones descritos y registrados para la Amazonia colombiana:

A. elaps (Gunther, 1868)

A. latifrons (Gunther, 1868)

A. major (Boulenger, 1894).

A. occipitoalbus (Jan, 1862).

A. torquatus (Duméril, Bibron et Duméril 1854)

Taxones señalados por primera vez para Colombia:

A. snethlagae Cunha y Nascimento. 1983.

A. zidoki Gasc y Rodríguez, 1979.

Nuevos taxones:

A. charitoe. sp. nov.

A. davidhardi. sp. nov.

A. franciscopaivi sp. nov.

A. emersoni. sp. nov.

A. heliobelluomini. sp. nov.

A. lucilae. sp. nov.

A. janetae. sp. nov.

Género *Atractus* Wagler, 1828.

Para Colombia se han registrado entre 30 a 35 especies de éste género: **Peters, & Orejas-Miranda** (1970). En la Amazonia colombiana han sido señaladas siete especies: *A. arangoi* Prado, 1939; *A. elaps* (Gunther, 1858); *A. major* Boulenger, 1893; *A. latifrons* (Gunther); *A. occipitoalbus* (Jan, 1862) y *A. limitaneus* Amaral, 1935 y *A. guentheri* (Wuchereri, 1861). Hasta el momento no se ha demostrado la presencia de éstas dos últimas especies (citadas en 1935), en el sur de la Amazonia colombiana

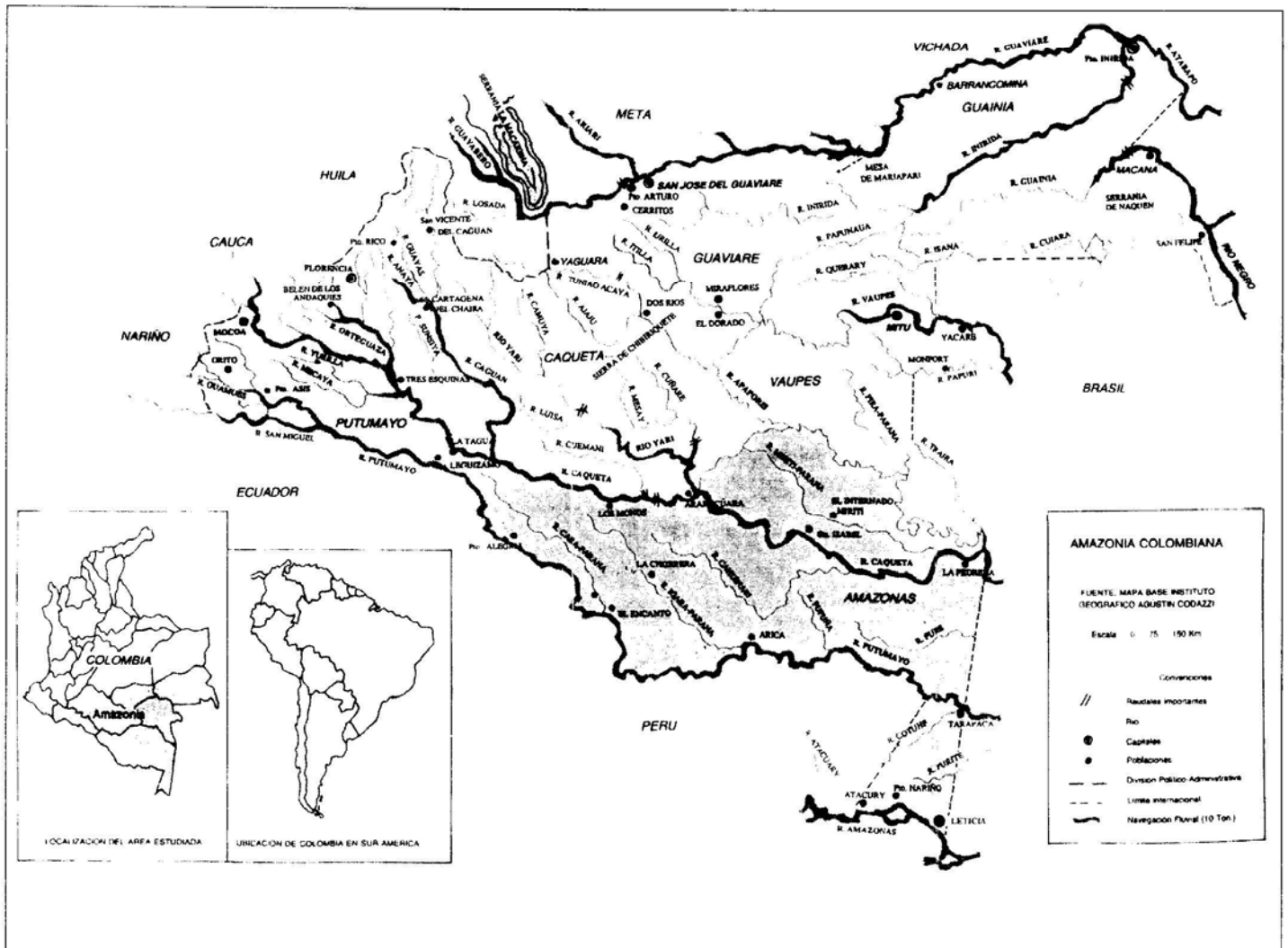


Figura 3. Amazonia colombiana. Mapa político administrativo.

Los primeros estudios del género *Atractus* en Colombia fueron realizados por Afranio Amaral y Alcides Prado, durante la década, comprendida entre 1931 y 1940. El material científico estudiado por los mencionados investigadores procedía de las más variadas regiones de Colombia y fue suministrado por los hermanos Nicéforo María y Daniel del Instituto de la Salle de la ciudad de Bogotá, Colombia.

Excelentes trabajos han sido publicados recientemente sobre el género *Atractus* en la región amazónica en general Cunha, (1978 1993, 1984), Martins & Oliveira (1998, 1999), Hoogmoed (1980). La excelente monografía sobre los *Atractus* del Ecuador por Savage (1960) aún continúa vigente.

A pesar de la diversidad específica del género *Atractus* en Colombia, reconocida por Afranio Amaral, quien expresó que nuestro país podría ser el centro origen de estos ofidios para la América del Sur, o por lo menos, el centro de distribución de éstos (Afranio, 1932), debe reconocerse su desconocimiento en la región amazónica colombiana.

Características morfológicas generales

Las serpientes del género *Atractus* son de pequeño y mediano tamaño, con excepción de *A. latifrons*, de amplia distribución en la región amazónica, la cual puede alcanzar hasta 800 mm de tamaño. En general los *Atractus* son de hábitos terrestres, criptozóicos, nocturnos, o diurnos, no venenosos y mansos.

Lepidosis. Escamas cefálicas y corporales similares a los demás colúbridos, pero con algunas variaciones morfológicas en la loreal y las mentonianas. Las figuras 4A, 4B y 4C ilustran sobre la nomenclatura y morfología de las escamas cefaloicas de *Atractus*.

Cabeza. Pequeña, ligeramente distinguible del cuerpo, en algunas especies alargadas con el hocico agudo; escama rostral variable en la forma y el tamaño. Figuras 5A, 5B, 5C y 5D.

Región supracefálica. Dos internasales, generalmente pequeñas y en contacto en la línea media, con excepción de la especie *A. franciscopaivai sp nov*, en la cual están separadas por interposición de la escama rostral. Dos prefrontales, variables en la forma y el tamaño; frontal igualmente variable en su morfología; supraoculares generalmente pequeñas; parietales grandes. La preocular, en la mayoría de las especies, ausente, remplazada por la escama loreal. Las postoculares son variables en el número y la forma. La escama loreal es constante y alargada en la mayoría de las especies, lo cual constituye un carácter taxonómico importante; sin embargo, en algunas especies se observan variaciones en su forma. Las figuras 6A, 6B, y 6C ilustran las variaciones de la escama loreal.

Región gular. Un par de mentonianas alargadas y separadas de la sifisal por las dos primeras escamas infra-labiales, carácter taxonómico constante y significativo en la determinación del género *Atractus*. Figura 4B.

Ojos. Pequeños, con pupila circular, algunas veces semielíptica.

Escala dorsolateral del cuerpo. Escamas lisas sin fosetas apicales en la mayoría de las especies, dispuestas en filas de 17-17-17 ó 15-15-15, raras veces con reducción a lo largo del cuerpo. Escama anal entera (carácter taxonómico constante). Subcaudales divididas.

Dientes. Maxilares 5 a 8, a veces hasta 12, variables en tamaño. Dientes mandibulares, pterigoideos y palatinos presentes. Ausencia de hipoapófisis en la parte media y posterior del cuerpo.

Hemipenes. Bilobados o bifurcados profundamente con el conducto seminífero igualmente dividido en la mayoría de las especies; algunas tienen hemipenes simples. En todas las especies los hemipenes están cubiertos por espículas; la forma, la extensión y la disposición de éstas en el cuerpo y en las ramas de los hemipenes constituyen características taxonómicas de cada especie.

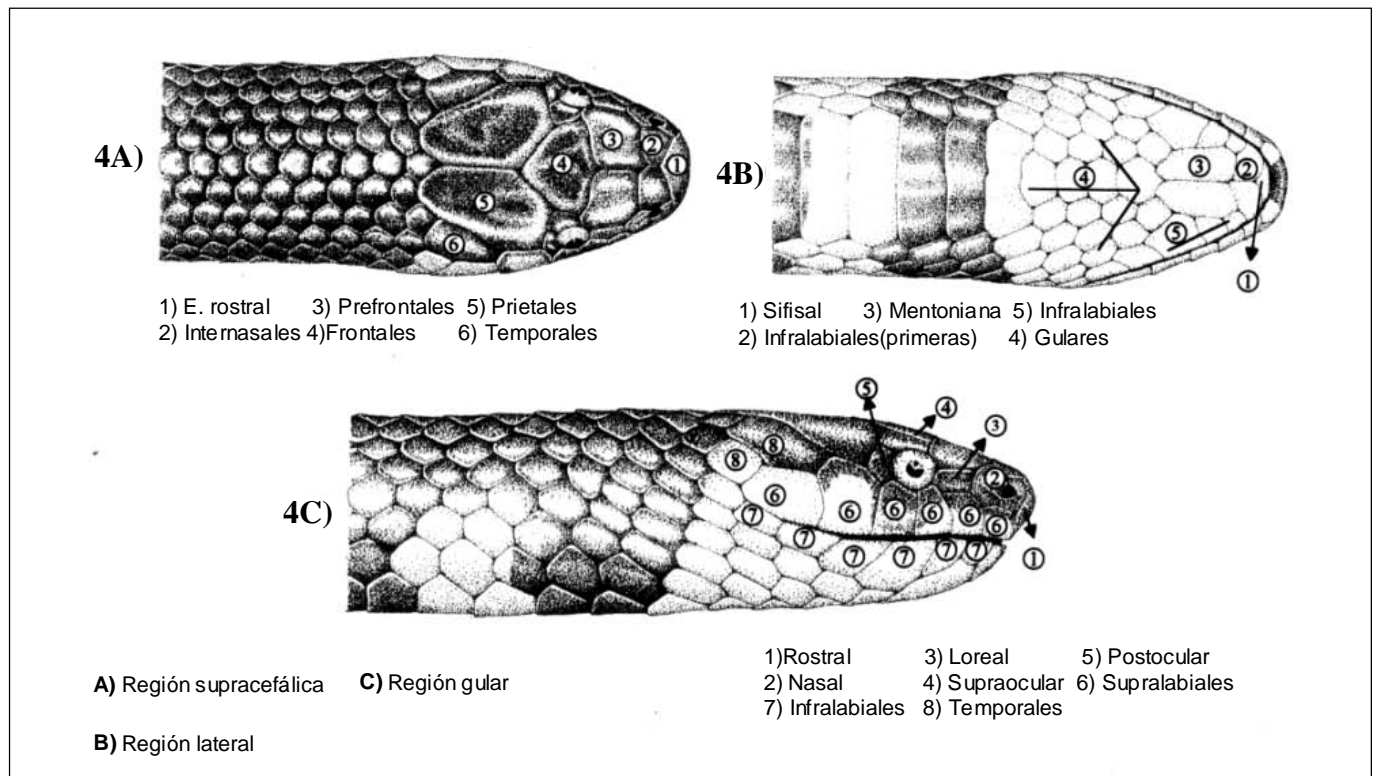


Figura 4. *Atractus elaps* (Gunther, 1858). Morfología y nomenclatura de las escamas cefálicas.

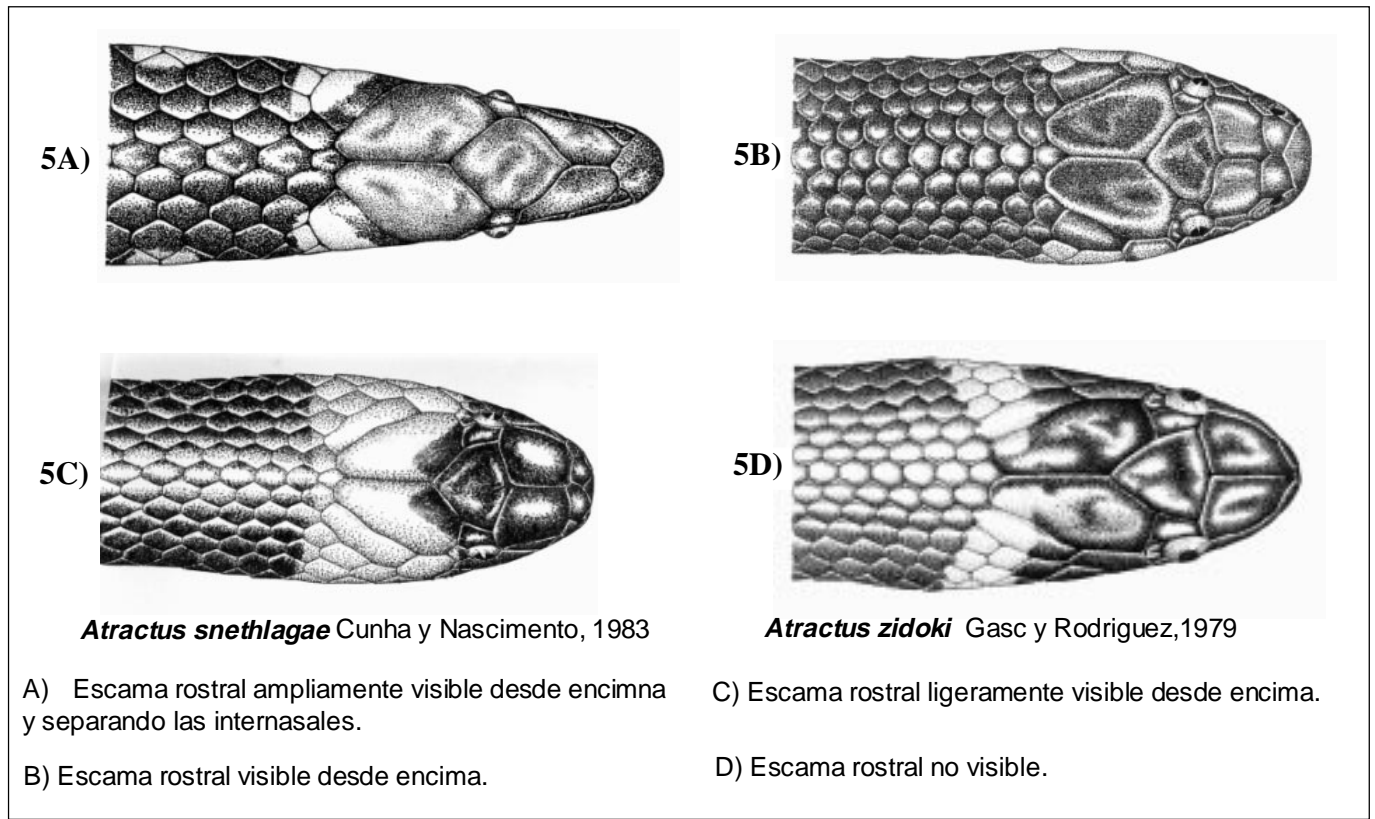


Figura 5. Variaciones de la escama rostral.

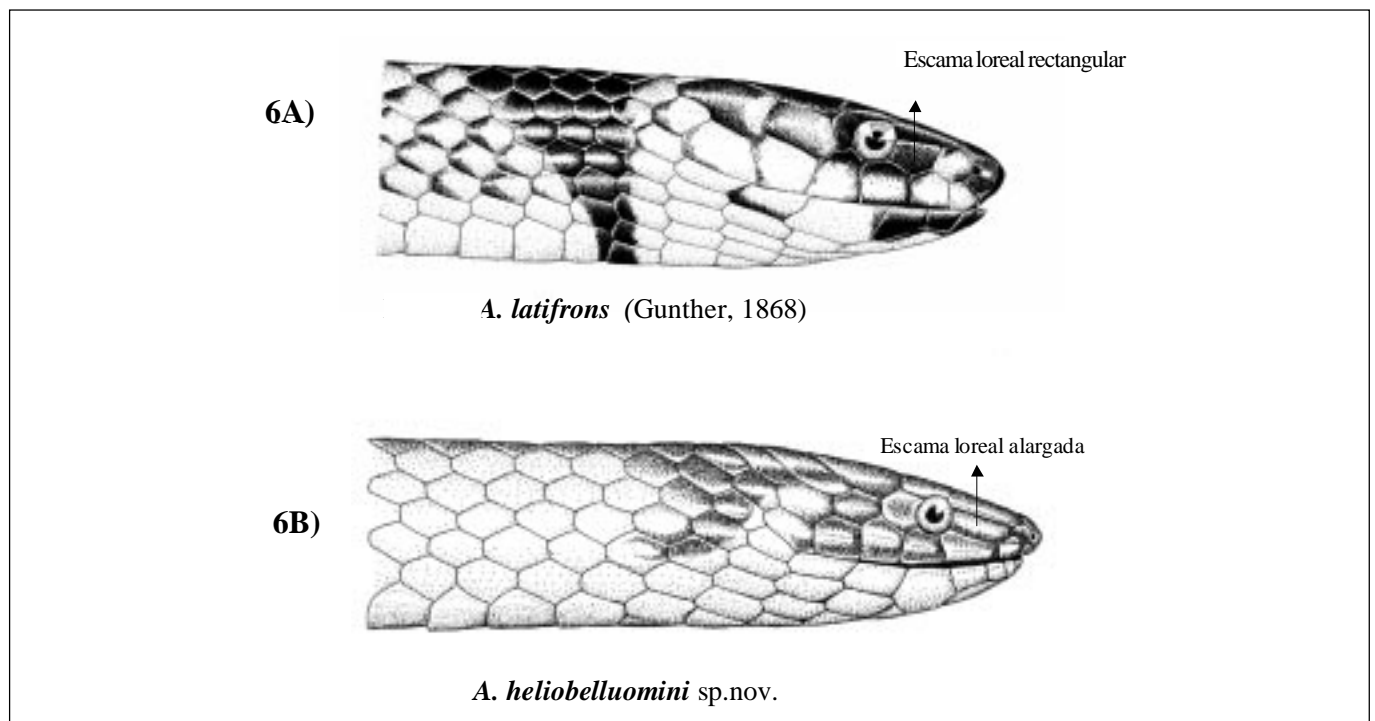


Figura 6. Variaciones de la escama loreal.

Descripción taxonómica de especies

I. *Atractus charitoe* sp. nov. Figuras 8 y 9.

Holotipo. Instituto de Ciencias-Reptiles ICN 10095 (JSH-1162). Ejemplar macho, en buen estado de conservación. Capturado por un nativo de la región en 1989.

Localidad típica. Taraira. Colombia, departamento del Vaupés. Región limítrofe entre Colombia y Brasil, en las márgenes del río del mismo nombre (00° 29' 38" N 69° 40' 11" E.). Figura 12.

Diagnosis. Especie de pequeño tamaño, caracterizada por la presencia de diseños negros triangulares bien definidos, situados en el tercio anterior del cuerpo, sobre las caras dorsolaterales de éste, separados entre sí por anillos blancos, finos, apenas del ancho de una escama dorsal. Se extienden desde la nuca hasta la cola, en número de 26 a 27. En la parte media del cuerpo, en la región dorsolateral, los diseños negros se tornan más irregulares en su forma, uniéndose unos con otros. Abdomen de color crema adornado con bandas finas, negras, irregulares en su disposición, en número de 36 a 37. Se extienden desde la región gular hasta la cola. Seis supralabiales y seis infralabiales. La quinta supralabial contacta la parietal. Escala dorsal 17-17-17. Figuras 4A, 4B y 4C.

Etimología. Dedicada a mi esposa Charito de Silva, en reconocimiento a su dedicación, paciencia y amor al compartir 40 años de investigación de la ofidiofauna en la Amazonia colombiana.

Morfometría del holotipo. Largo de la cabeza: 5 mm; ancho: 6 mm. Tamaño Total: 155 mm (hocico-cola); cola: 20 mm (12% T.T.).

Descripción del holotipo. Adulto. Cabeza ligeramente distinta del cuerpo, negra, con un anillo nucal blanco. Ojos con pupila circular; internasales más anchas que largas, ligeramente triangulares, en contacto por encima. Prefrontales más anchas que largas. Frontal triangular, más ancha que larga; supraoculares pequeñas, parietales grandes; loreal pequeña, cuadrada, nasal dividida; ausencia de preocular; nasal dividida; una postocular. Temporales 1+1 – 1+1; supralabiales 6-6, tercer y cuarta en contacto con el ojo; infralabiales 6; un par de gulares en contacto con las tres primeras infralabiales. Figuras 7A, 7B y 7C. Escala dorsal 17-17-17; ventrales 150. Anal entera. Subcaudales 33/33.

Coloración del holotipo. Diseños negros triangulares, bien definidos, situados en el tercio anterior del cuerpo, sobre las caras dorsolaterales de éste, separadas entre

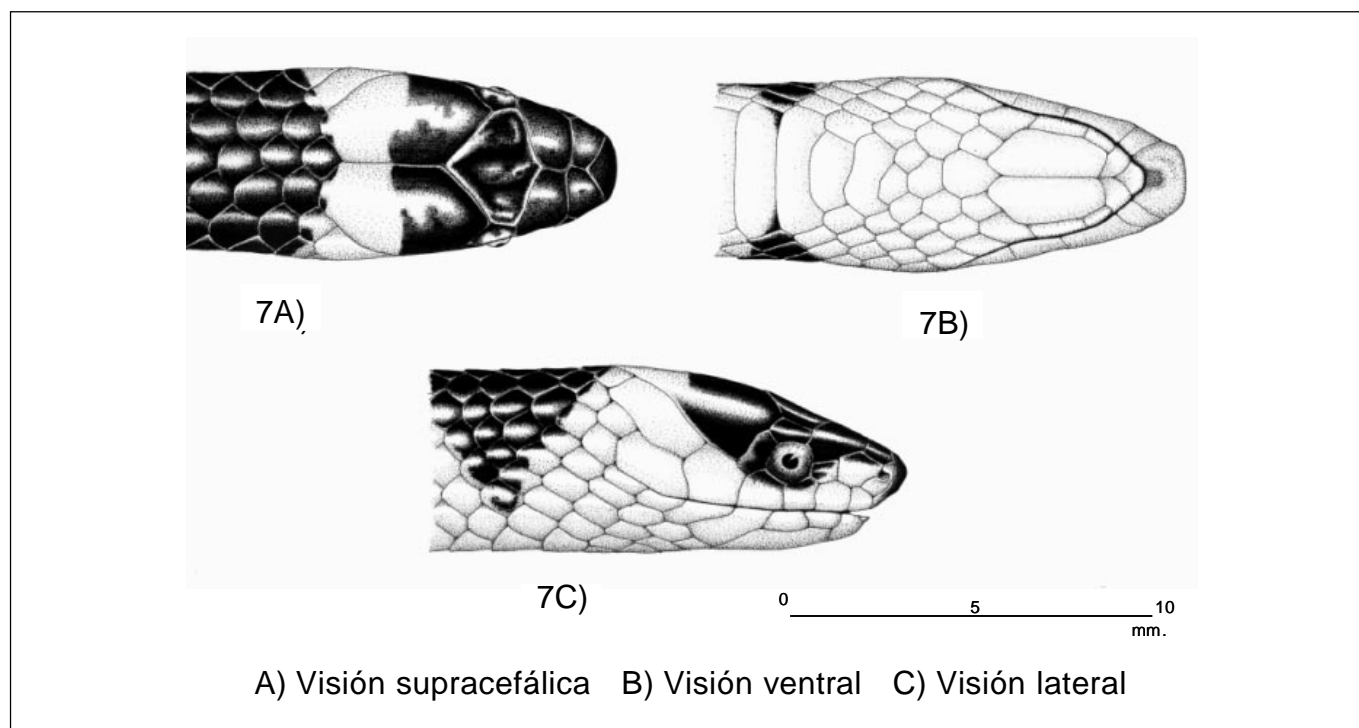


Figura 7. *Atractus charitoe* sp. nov.

sí por anillos blancos, finos, apenas del ancho de una escama dorsal, los cuales se extienden desde la nuca hasta la cola. El holotipo está conservado en alcohol al 75%. No se observa decoloración del holotipo, por lo tanto, mantiene la coloración natural.

Comentarios. El patrón cromático difiere notablemente de todas las especies hasta ahora señaladas por los investigadores de la Amazonia central, occidental y oriental brasilera: **Cunha & Nascimento** (1979,1983,1984,1993); **Martins & Oliveira** (1993,1998); **Hoogmoed** (1980); **Chippaux**(1986) de la Guayana francesa; **Dixon & Soini** en la Amazonia peruana (región de Iquitos).

Se examinó: un espécimen.

II. *Atractus davidhardi* sp. nov. Figuras **10** y **11**.

Holotipo. ICN 10096 (JSH-2.667), macho, en buen estado de conservación. Capturado en febrero del 2004 por un indígena, en la localidad de Muniyamina, en el municipio de Leticia.

Morfometría del holotipo. Tamaño total (hocico-cola): 380 mm; tamaño cola: 70 mm (12% T.T.).

Localidad Típica. Colombia, departamento de Amazonas, municipio de Leticia, vereda Muniyamina (04° 12' 55" Sur, 59° 56' 26" Oeste). Figura **12**.

Diagnosis

De mediano tamaño, caracterizada por la presencia de franjas transversales, de color marrón oscuro, las cuales adornan las regiones dorsolaterales del cuerpo. Se extienden desde la región de la nuca hasta la iniciación de la cola. Hemipenes cubiertos por espículas pequeñas, con excepción de las ramas de división, que son lisas. Estas son pequeñas (3 mm), e incurvadas hacia adentro; pedúnculo pequeño (2 mm), surco espermático bifurcado, la división es alta. Figura **13**. Región ventral crema, adornada con pequeñas manchitas de color castaño, las cuales se extienden desde la región gular hasta la cola. Región supracefálica de color negro brillante; por detrás de ésta presenta una lista transversal amarilla o crema.

Etimología. Dedicada en homenaje al Dr. David L. Hardy en reconocimiento por su contribución al estudio de los ofidios venenosos de Norte y Centro América y a la investigación clínica acerca de la efectividad de los variados procedimientos terapéuticos de uso empírico en las Américas.

Descripción del holotipo. Cabeza ligeramente aguda y distinguible del cuerpo; ojos con pupila circular; región

supracefálica negra brillante, por detrás de ésta se aprecia una franja transversal amarilla; rostral pequeña, ligeramente visible desde encima; internasales redondeadas, pequeñas y en contacto por encima; prefrontales más largas que anchas, tan largas como una frontal; frontal hexagonal; supraoculares pequeñas; parietales grandes; temporales 1+2-1+2; loreal alargada; nasal dividida; ausencia de preoculares; postoculares 1+1 – 1+1; supralabiales 7-7, tercera y cuarta en contacto con el ojo; infralabiales 7-7, las tres primeras en contacto con las gulares. Escala dorsal 17-17-17, lisas sin fosetas apicales. Ventrals 148, subcaudales 44, escama anal entera. Figuras **14A**, **14B** y **14C**.

Coloración del holotipo. Regiones dorsolaterales adornadas con bandas transversales marrón, algunas de éstas están fusionadas en la parte media del dorso, dando un aspecto de zetas ("z"). Región supracefálica negra brillante. Región ventral amarilla con punticos castaños.

Comentarios

El análisis morfológico apenas permite encontrar una ligera similitud con el patrón cromático de *A. schach* (F. Boie, (1827); sin embargo, las bandas transversales de color marrón, de las regiones dorsolaterales del cuerpo son más estrechas y están más separadas una de otra. En *A. davidhardi* las franjas transversales son anchas y estrechamente separadas una de la otra. La estructuras de los hemipenes difieren notablemente entre estas dos especies. En *A. davidhardi* los hemipenes son más pequeños y están cubiertos completamente con espinas diminutas, con excepción de las ramas de división terminal, las cuales son lisas. Las dos pequeñísimas ramas de división de los hemipenes, son ligeramente curvas hacia adentro, aspecto morfológico únicamente presente en esta especie. Los hemipenes tienen un tamaño de seis milímetros, lo cual corresponde al largo aproximado de siete escamas subcaudales. El pedúnculo es corto, sin dilataciones laterales ("bolsillos"). Los hemipenes de *A. schach*, por el contrario son más largos y presentan espículas grandes en la parte media y proximal y cálices en la región distal (**Hoogmoed**, 1980). Figura **13**.

III. *A. elaps* (Gunther, 1858) Figuras **15** y **16**.

Distribución geográfica. Sur de la Amazonia colombiana. Territorios de los departamentos de Amazonas, Putumayo y Caquetá; regiones limítrofes con Brasil, Ecuador y Perú. Amazonia ecuatoriana (**Duellman**,1978; **Savage**, 1960). Amazonia peruana, región de Iquitos (**Carrillo & Icochea**,1995; **Dixon & Soini**, 1986). Sur de la Amazonia venezolana (Estado federal de Mazonas) (**Lancini**,1986; **Roze**,1966). Amazonia colombiana (**Pérez-Santos & Moreno**,1998).



Figura 8. *Atractus charitoe* sp. nov. Visión dorsal.



Figura 9. *Atractus charitoe* sp. nov.



Figura 10. *Atractus davidhardi*. Visión dorsal.



Figura 11. *Atractus davidhardi*. Visión ventral.



Figura 15. *Atractus elaps*. Visión dorsal.



Figura 16. *Atractus elaps* (Gunther, 1858). Visión ventral.

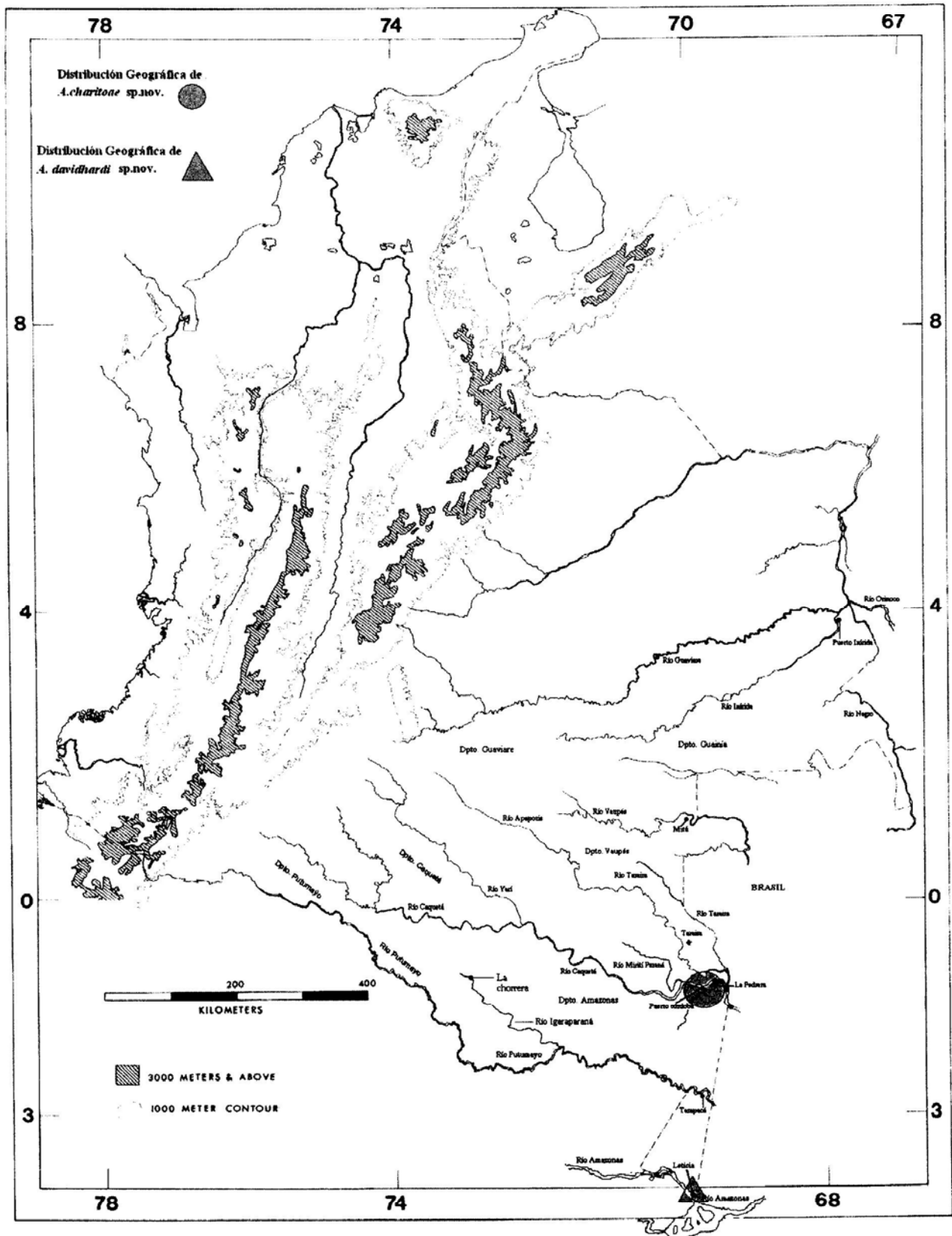


Figura 12. Mapa de distribución geográfica de *A. davidhardi* y *Atractus charitoae*.

Descripción morfológica. Cabeza ligeramente distinguible del cuerpo, hocico redondeado; ojos con pupila circular; rostral visible desde encima, más ancha que alta; internasales triangulares; prefrontales cuadradas, más anchas que largas, dos veces el tamaño de una internasal; frontal más ancha que larga, triangular, tan ancha como una prefrontal; supraoculares pequeñas; parietales grandes, más largas que anchas; nasales grandes, enteras; loreal pequeña, rectangular o cuadrada; ausencia de preoculares; una postocular (13 N); dos postoculares (3 N); temporales 1+ 2(16 N); supralabiales 6-6 (16 N), tercera y cuarta en contacto con el ojo; infralabiales 7-7 (13 N), 6-6 (3 N); un par de grandes mentonianas, en contacto con las tres primeras infralabiales. Figuras 17A, 17B y 17C; escala dorsal 15-15-15 lisas, brillantes sin fosetas apicales; ventrales 139-158 (\bar{X} = 150) en machos; 151-170 (\bar{X} = 158,2) en hembras; anal entera; subcaudales 22-32 (\bar{X} = 27,2) en machos; 20-28 (\bar{X} = 21,75) en hembras.

Tamaño máximo observado. 500 mm machos (T.T. hocico-cola), cola 65 mm (13% T. T.); 420 mm hembras (T.T. hocico-cola), cola 35 mm (8.3% T.T.).

Hemipenes. Bilobados con 18 mm de largo, tan largo como seis subcaudales. Surco espermático bífido, la

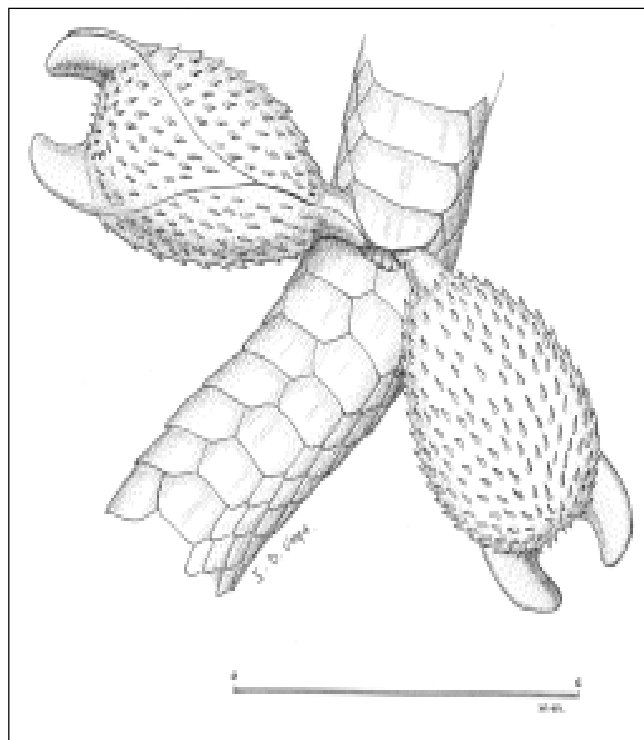
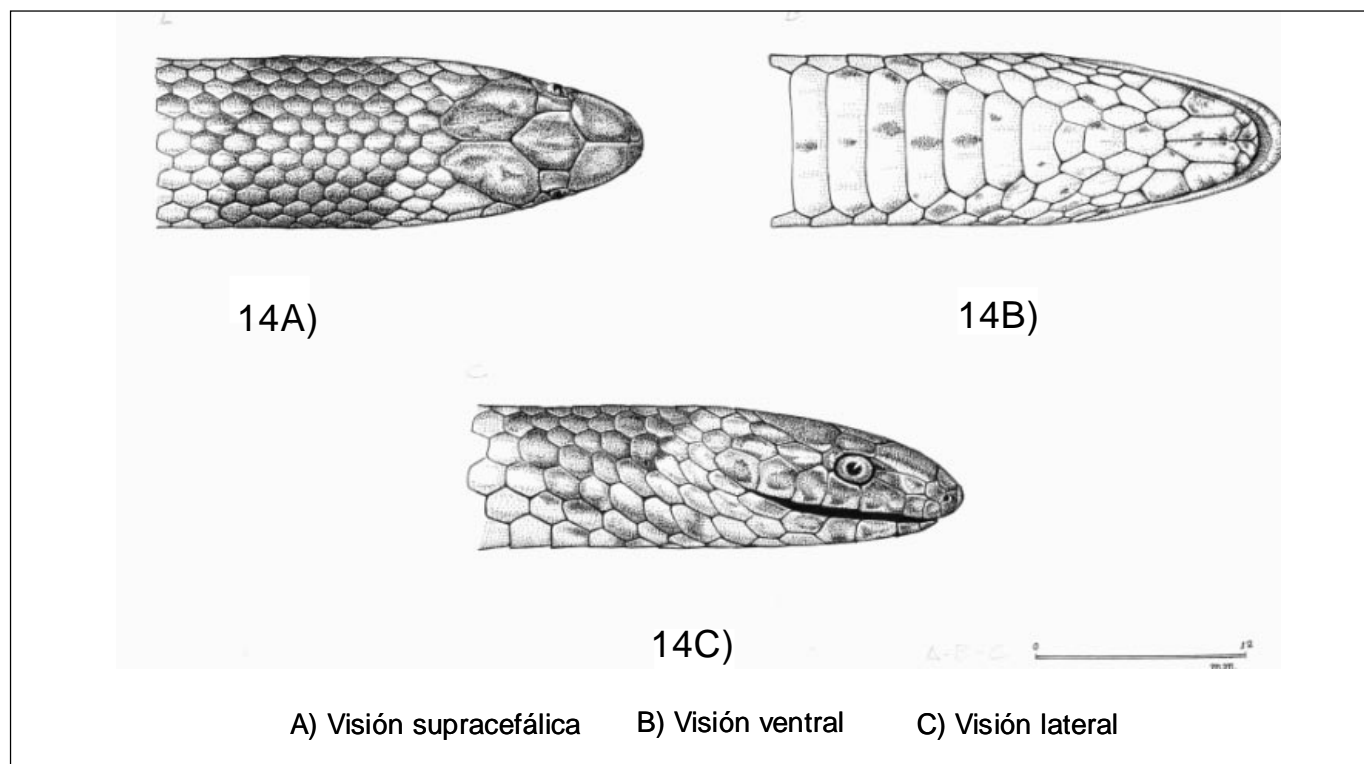


Figura 13. Hemipenes de *Atractus davidhardi* sp. nov.



A) Visión supracefálica

B) Visión ventral

C) Visión lateral

Figura 14. *Atractus davidhardi* sp. nov.

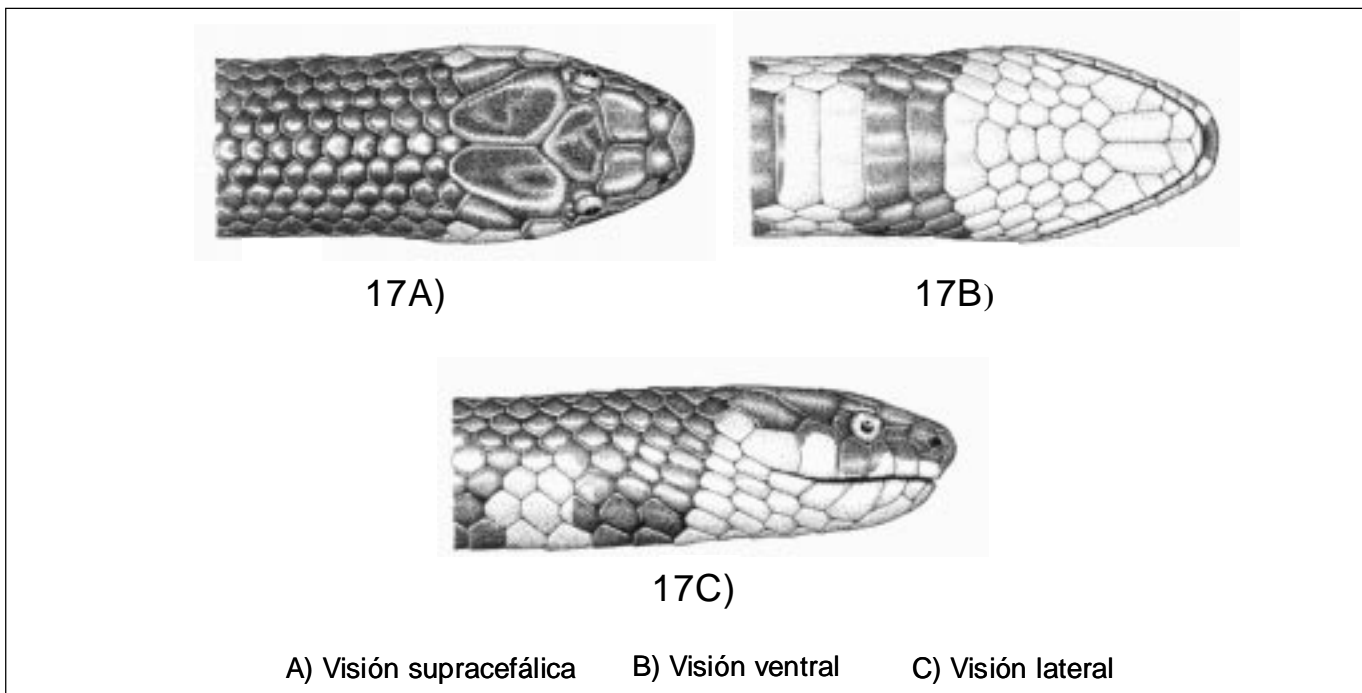


Figura 17. *Atractus elaps* (Gunther, 1858).

división es alta. Cuerpo cubierto con espinas pequeñas. El vértice de los lóbulos tienen algunas espinas. Figura 18.

Coloración. Cabeza negro brillante por encima, región gular crema, anaranjada o blanca; región dorsal, negro brillante, homogénea; las caras laterales del cuerpo, negro uniforme; en la región paraventral, a cada lado, manchas anaranjadas, amarillas o rojas; vientre adornado con bandas transversales, rectangulares, amarillas en algunos individuos y rojas en otros; franjas negras intercaladas entre las anaranjadas, las cuales se extienden desde la región gular hasta la cola. Figura 15.

Hábitat. De hábito fosario, penetra la capa superior del suelo, blanda, rica en materiales orgánicos en descomposición, en donde abundan oligoquetos que constituyen su alimento preferencial. Con frecuencia aparece en el bosque primario húmedo, debajo de la cubierta de hojarasca y troncos de árboles caídos en descomposición.

Reproducción. Ovívora. Tres a cuatro huevos de 32 x 8 mm de ancho. Las puestas entre los meses de abril, mayo y junio.

Alimentación. Se alimenta preferencialmente de oligoquetos, de acuerdo con los restos alimenticios encontrados en estómago e intestinos.

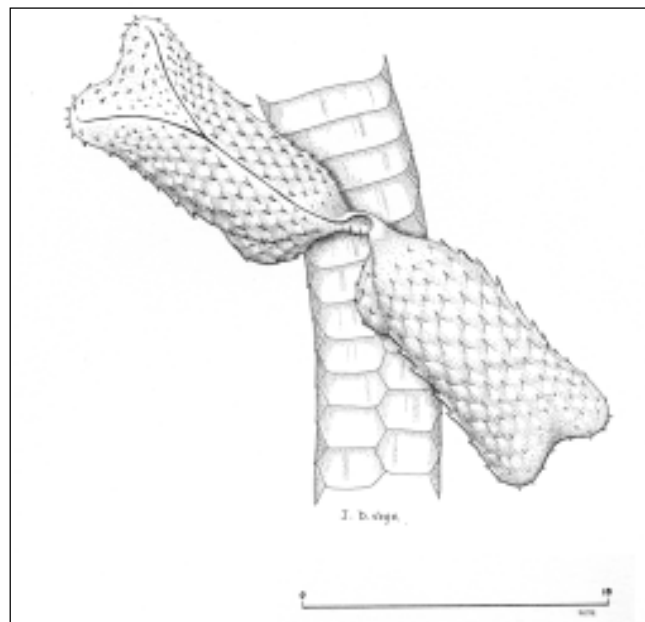


Figura 18. Hemipenes de *A. elaps*.

Comentarios. En el área del trapezio amazónico, en las regiones limítrofes con Brasil y Perú, *A. elaps* es un ofidio común. Se le halla en el biotopo del bosque primario y frecuentemente en las áreas de cultivo, en el

ambiente de vegetación secundaria modificada por el hombre. Es simpátrica con su congénere *A. latifrons* (Gunther, 1868), en todo el sur de la Amazonia colombiana. La identificación macroscópica entre *A. elaps* y *A. latifrons*, no es difícil, debido a la separación de caracteres externos. *A. elaps* exhibe un patrón cromático de gran parecido con algunos *Micrurus*, principalmente con *M. scutiventris*, con la cual presenta mimetismo batesiano. Los individuos de *A. elaps*, procedentes del departamento de las poblaciones del Putumayo, en los límites con Ecuador, tienen un patrón de color con anillos negros y rojos, semejante a un *Micrurus*. Los individuos de las poblaciones de las riveras del río Amazonas, en los límites con Brasil y Perú, no presentan anillos, su coloración es negra uniforme en las regiones dorso laterales del cuerpo. Las caras paraventrales del cuerpo dejan entrever los colores amarillos y anaranjado de las gastrotegas. La región ventral tiene colores vistosos: anaranjado, rojo, amarillo y negro. Cuando este ofidio es agredido, enrolla y levanta la cola, en actitud aposemática, exponiendo la coloración ventral para alejar al depredador. El análisis merístico realizado en 16 especímenes de *A. elaps* muestra un claro dimorfismo sexual en la gastrotegas y en las escamas subcaudales. Estos resultados coinciden con los publicados por **Duellman** (1978) en poblaciones de la región de Santa Cecilia, en la Amazonia ecuatoriana. Igualmente concuerdan con los hallazgos de **Dixon & Soini** (ibídem) obtenidos del estudio de los individuos de la Amazonia peruana.

Atractus elaps ha sido registrada para Venezuela por **Lancini** (1986) & **Roze** (1966). Los datos merísticos señalados muestran marcada similitud con los resultados aquí expuestos. Sin embargo, hay diferencia en cuanto a la morfología de la escama loreal, la cual es pequeña, rectangular o cuadrada en los individuos de las poblaciones de la Amazonia colombiana. Por su parecido con las "corales venenosas" *A. elaps* es considerada una serpiente peligrosa, por los nativos y colonos. Cualquier encuentro con el hombre es fatal para este inofensivo ofidio.

Se examinaron 15 especímenes.

IV. *Atractus emersoni* sp. nov. Figuras 19 y 20.

Holotipo. ICN 10097 (JSH-2462). Boa Vista-Brasil. Ejemplar hembra, capturado en mayo de 2001. Se encuentra en buen estado de conservación.

Localidad típica. Boa Vista-Brasil. Municipio de Benjamín Constant, en la rivera del río Solimoes, situada a 4°, 25' de latitud sur y a 70° de longitud oeste. Figura 16A.

Morfometría del holotipo. Cabeza largo: 10 mm; ancho: 10 mm (medida en la región temporal). Tamaño total: 440 mm (hocico-cola), cola 40 mm (9% del T.T.).

Paratipos. ICN 10098 (JSH-2643). Ejemplar hembra, 400 mm de tamaño total (hocico-cola), cola de 40 mm (9% del T.T.), capturado en el 2001 en el mismo lugar de holotipo. Capturado en el mismo lugar del holotipo. ICN 10099 (JSH-2564). Macho juvenil, 300 mm de T.T., cola 40 mm (13% T.T). Capturado en la quebrada de los lagos de Leticia, Colombia.

Diagnosis. Especie de tamaño mediano, coloración rojo oscuro de fondo, ornado con manchitas negras, algunas triangulares, otras cuadradas o circulares, ocupan una o dos escamas dorsales en las caras superiores y laterales del cuerpo. Vientre con franjas transversales, color marrón o castaño oscuro localizadas en cada una de las gastrotegas. Regiones laterales del abdomen, anaranjado; ventrales 156, subcaudales 25, supralabiales 7-7, infralabiales 6-6.

Etimología. Dedicada en homenaje al Dr. Helio Emerson Belluomini, del Instituto Butantan, en reconocimiento a su valiosa contribución al estudio de las serpientes venenosas del Brasil, a la producción media de veneno y la determinación de la potencia letal de éstos, en animales domésticos.

Descripción del holotipo. Hembra adulta, cabeza ligeramente distinta del cuerpo; ojos con pupila circular; rostral no visible desde encima; internasales redondas, en contacto; prefrontales cuadradas; frontal triangular, tan ancha como una prefrontal; supraoculares pequeñas; parietales grandes, dos veces el tamaño de la frontal; loreal alargada; nasales divididas; ausencia de preoculares; postoculares dos; temporales 1+2; supralabiales 7-7, tercera y cuarta tocando el ojo; infralabiales 6-6; un par de mentonianas, en contacto con las tres primeras infralabiales; escala dorsal 17-17-17, lisas sin foseas apicales; ventrales 156-158, en hembras; 140-145 en machos; anal entera; subcaudales 25/25 en hembras y 29/29, en machos. Figuras 22A, 22B y 22C.

Coloración. Rojo oscuro brillante en las regiones dorsolaterales del cuerpo, con manchitas negras, triangulares, cuadradas o redondas. Vientre ornado con barras transversales, color marrón o castaño oscuro, que cubren las gastrotegas. Las caras paraventrales del abdomen son de color anaranjado.

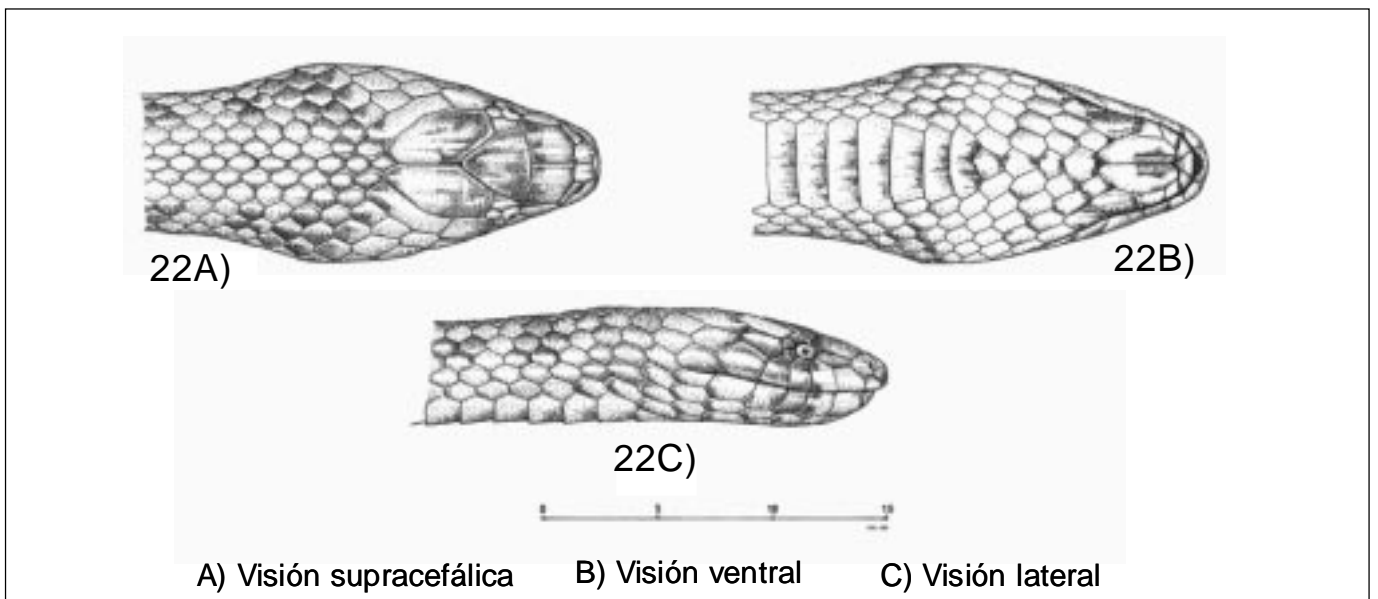
Hemipenes. Bilobados, con abundantes espículas grandes en los dos tercios inferiores del cuerpo y pequeñas en el tercio superior. Surco espermático bifurcado. Figura 23.



Figura 19. *Atractus emersoni*. Visión dorsal.



Figura 20. *Atractus emersoni* sp. nov. Visión ventral.



A) Visión supracefálica B) Visión ventral C) Visión lateral

Figura 22. *Atractus emersoni* sp. nov.



Figura 24. *Atractus franciscopaivai* sp. nov. Visión dorsal.



Figura 25. *A. franciscopaivai* sp. nov. Visión ventral.

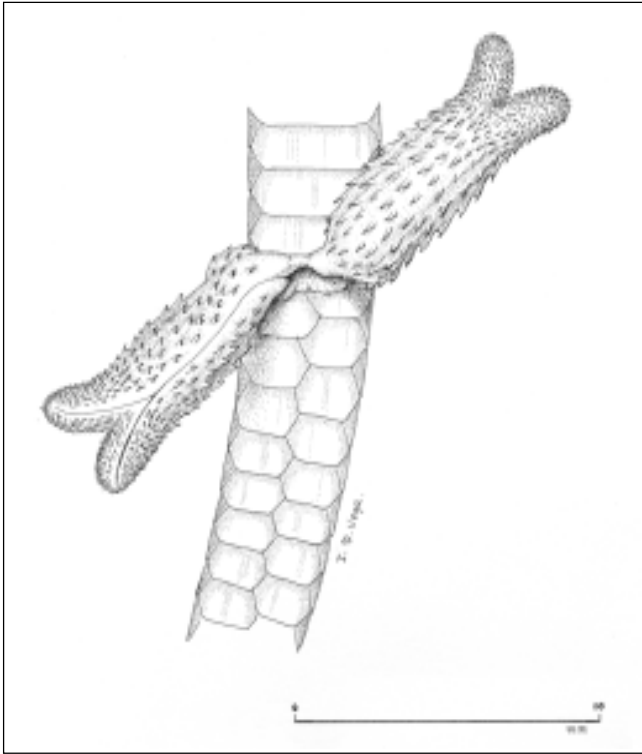


Figura 23. Hemipenes de *Atractus emersoni* sp. nov.

Comentarios. *A. emersoni* ha sido hallada en ambiente criptozoico, en las tierras bajas, inundables, en los márgenes de lagos y en las riveras del Igapó, debajo de la hojarasca húmeda.

Hasta el momento su distribución corresponde al área fronteriza entre Colombia, Brasil y Perú en los márgenes del río Amazonas y en formaciones lólicas.

El análisis de los caracteres merísticos muestra leve dimorfismo sexual y mayor desarrollo somático en las hembras.

Atractus emersoni tiene coloración rojo oscuro brillante en las regiones dorsolaterales del cuerpo, ornadas con manchitas negras, triangulares, circulares o cuadradas. Esta coloración es similar a la de algunos individuos de *A. torquatus* (Duméril, Bibron et Duméril), 1854. *A. torquatus* es polimorfa; varios morfotipos han sido señalados por **Martins & Oliveira** (1993) en la Amazonia central brasilera, región de Manaus. *A. emersoni* difiere ampliamente de *A. torquatus*, principalmente en la coloración de la región ventral, la cual se caracteriza, por la presencia de unas franjas de color marrón o castaño oscuro, dispuestas transversalmente sobre las gastrotegas. La región ventral de *A. torquatus* es de color crema uniforme, salpicada con manchitas castaño os-

curo, puntiformes. Otro aspecto morfológico diferencial importante entre estas dos especies es la merística ventral y subcaudal. La escala ventral de *A. emersoni* va de 156-158, en hembras, y de 151-172 en los machos. *A. torquatus* tiene un rango mayor de gastrotegas las cuales van de 144-160 en hembras y de 151-172 en los machos. Igualmente, las escamas subcaudales son mayores en número: 38-47 en machos y 36-42 en las hembras (**Hoogmoed**, 1980). Similares datos han sido señalados por **Martins & Oliveira** en los individuos de las poblaciones de la región de Manaus, en la Amazonia central brasilera.

Se examinaron tres especímenes.

III. *Atractus franciscopaivai* sp. nov. Figuras 24 y 25.

Holotipo. ICN 10100 (JSH-1155). Macho juvenil, macho, capturado por J. Silva Haad, 1989, en la localidad de Puerto Córdoba en la rivera del río Caquetá, departamento de Amazonas, Colombia.

Paratipos. ICN 10101 (JSH-1268). Macho adulto, procede de Puerto Córdoba, Colombia, en el corregimiento de La Pedrera, departamento de Amazonas. Capturado en 1989 por J. Silva Haad. ICN 10102 (JSH-1280). Hembra adulta, procede de la vereda de "Garimpito" Colombia, en el corregimiento de Taraira, en el departamento del Vaupés, Amazonia oriental colombiana.

Localidad típica. Colombia, Puerto Córdoba, en el corregimiento de La Pedrera, en el departamento de Amazonas, a orillas del río Caquetá (01° 09' 38" N, 69° 40' 00" Oeste). Figura 21.

Morfometría del holotipo. Tamaño total: 180 mm (T. hocico-cola). Tamaño cola: 16 mm (9% TT).

Diagnosis. Cuerpo cilíndrico, cabeza puntiaguda no diferenciada del cuerpo, boca inferior, coloración negro brillante uniforme en las caras dorsolaterales del cuerpo; vientre con bandas negras anaranjadas o amarillas, rectangulares, bien definidas, la mayoría; algunas divididas, irregulares; las franjas se extienden un poco por detrás de la región gular hasta la cola; la coloración de las listas es amarilla o roja en algunos especímenes, con franjas negras intercaladas; cola corta, redondeada en la punta, de color negro en la cara dorsal y adornada con bandas negras, anaranjadas o amarillas en la región ventral. Loreal pequeña, trapezoidal; nasales divididas; las escamas supralabiales en 5-5; infralabiales 5-5; escala dorsal en 15-15-15 filas.

Etimología. Especie dedicada al Dr. Francisco Paiva do Nascimento, investigador del Museo Emilio Goldei,

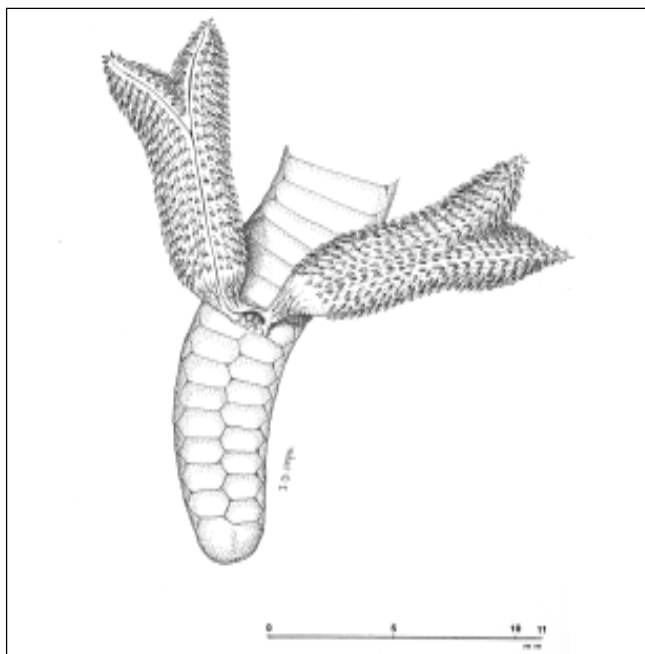


Figura 27. Hemipenes de *Atractus franciscopaivai* sp. nov.

de hacia atrás separando completamente las internasales; cinco dientes maxilares; internasales pequeñas separadas completamente por interposición de la rostral; prefrontales grandes, más anchas que largas; preoculares pequeñas; parietales grandes, hexagonales; loreal pequeña, trapezoidal; postoculares 1-1(3 N); supralabiales 5, tercera y cuarta en contacto con el ojo; infralabiales 5-5; un par de mentonianas grandes en contacto con las cuatro primeras infralabiales; ventrales 138; subcaudales 20/20; anal entera. Escala dorsal 15-15-15, lisas sin fosetas apicales.

Macho. ICN 10102. Procede de la Vereda de “Garim-pito”, en el corregimiento de Taraira, tierra típica del holotipo, en el departamento del Vaupés (Amazonia Oriental), Colombia.

Morfometría. Tamaño total: 280 mm (hocico- cola). Tamaño cola: 16 mm (5.7% T.T.).

Cabeza. Aguda no distinguible del cuerpo; ojos pequeños con pupila circular; rostral grande ampliamente visible desde encima, se extiende de adelante hacia atrás, separando completamente las internasales. Cinco dientes maxilares; internasales pequeñas, separadas ampliamente por la rostral; prefrontales grandes, más anchas que largas; preoculares pequeñas; parietales grandes hexagonales; una porción anterior y otra posterior; ausencia de proculares; postoculares 1-1; temporales 1+1; supralabiales 5, tercera y cuarta en contacto con el ojo; infralabiales 5-5; escala 15-15-15; ventrales 135, subcaudales 18/18.

Comentarios

A. franciscopaivai tiene cuerpo cilíndrico, coloración negra brillante homogénea en las caras dorsolaterales del cuerpo. Abdomen ornado con franjas transversales, negras y amarillas o anaranjadas. Presenta gran similitud morfológica con *A. elaps* (Gunther), principalmente en el patrón cromático; sin embargo, muestra marcadas diferencias taxonómicas que permiten diferenciarlas con precisión. Los tres especímenes analizados, procedentes de dos localidades distantes la una de la otra, pero ecológicamente similares, se diferencian de las demás especies de la *Atractus*, de la amazonia colombiana por los siguientes caracteres: A) Escama rostral grande, dirigida hacia atrás y arriba la cual se interpone entre las dos escamas internasales, separándolas una de otra. Caracter taxonómico único. B) Boca en situación ventral. C) Cabeza puntiaguda. Lepidosis cefálica y corporal con un número bajo de escamas supralabiales, infralabiales. D) Hemipenes bifidos cubiertos totalmente por espinas del mismo tamaño; pedúnculo libre de espículas; conducto seminífero bifurcado. El hemipene se estudió por disección *in situ* mediante microscopía. El ejemplar estudiado está identificado con la ficha ICN 10101.

A. franciscopaivai es afín a *A. elaps*, principalmente, por la similitud entre los patrones cromáticos. Los tres ejemplares estudiados de *A. franciscopaivai* presentan idénticos caracteres morfológicos.

La posibilidad de considerar a *A. franciscopavii* como una raza geográfica de *A. elaps*, no puede sustentarse por el examen morfológico, pues los caracteres taxonómicos que diferencian una especie de otra, son muy marcados. Muy significativa es la simpatria de *A. elaps* con *A. franciscopaivai*. Estos dos ofidios conviven en el mismo biotopo. La mínima disociación de los caracteres morfológicos externos no es rara entre las especies del género *Atractus*. Las capturas de nuevos ejemplares en el área de distribución de *A. franciscopaivai*, y en las regiones limítrofes de las localidades típicas será intensificada con el propósito de ampliar el conocimiento de esta curiosa serpiente, hasta ahora endémica de las regiones de La Pedrera y Taraira, en el departamento de Amazonas, Colombia.

Se examinaron tres especímenes.

VI. *Atractus heliobelluomini* sp. nov. Figuras 28 y 29.

Holotipo. ICN 10103 (JSH-639). Hembra. Capturada por J. Silva Haad en noviembre de 1975. Colombia, departamento de Amazonas, La Pedrera, en el cerro Jupatí, a 300 m de altitud (01° 19' 42" Sur, 69° 30' 33" Oeste). Figura 30.

Morfometría. Tamaño total 158 mm; largo de la cabeza 5 mm y largo de la cola 5 mm (7.6% del T.T.).

Diagnosis. Cabeza muy puntiaguda con 5 mm de largo; cola aguda, con 8 subcaudales y 5 mm de largo (7.6% del T.T.); escala dorsal 15-15-15; supralabiales 6-6 y 7-7 infralabiales. Coloración castaño claro uniforme en las regiones dorsal y ventral, con una línea fina castaño claro medio dorsal, extendida desde la cabeza hasta la cola.

Etimología. Dedicada al Dr. Helio E. Belluomini, maestro y amigo entrañable del Instituto Butantan, Brasil, en reconocimiento de su valiosa contribución al estudio de los ofidios venenosos del Brasil, la producción media y máxima de venenos y la farmacología experimental de éstos, aplicada a la clínica humana y veterinaria.

Descripción del holotipo. Hembra, adulta. Cabeza distinta del cuerpo; hocico muy agudo; ojo con pupila circular; rostral pequeña, más ancha que alta; internasales, pequeñas en contacto; prefrontales más largas que anchas; frontal triangular, tan larga como una prefrontal; supraoculares pequeñas, parietales grandes, nasal entera; loreal alargada, ausencia de preoculares, una postocular; temporales 1+1- 1+1, supralabiales 7-7, tercera y cuarta tocando el ojo; infralabiales 7-7, las cuatro primeras en contacto con las mentonianas, un par de mentonianas grandes en contacto con las dos primeras infralabiales, escala dorsal 15-15-15, lisas sin fosetas apicales, ventrales 121, anal entera; subcaudales ocho, divididas. Figuras 31A, 31B, 31C y 31D.

Coloración. Castaño claro en las regiones dorso laterales del cuerpo y en el abdomen; cabeza y hocico castaño, ligeramente más oscuro que el cuerpo. A lo largo de la región dorsal presenta, desde atrás de la cabeza hasta el dorso de la cola, una línea fina negra. Abdomen crema sin manchas.

Comentarios. *A. heliobelloumini* fue capturada en la vertiente occidental del cerro Jupatí, de 300 m de altitud, en el corregimiento de La Pedrera, a las 4:00 p.m., en un ambiente sombrío y húmedo. El estrato está compuesto por abundantes rocas y piedras cubiertas con grama, y plantas pequeñas.

La lepidosis dorsolateral del cuerpo, en filas 15-15-15, el bajo número de gastrotegas: 121, y el tamaño de la cola 5 mm, aproximan ligeramente esta especie a *A. trilineatus* Wagler, 1828. El carácter único de ocho esca-mas subcaudales, la sobresaliente agudeza cefálica y caudal, el patrón cromático caracterizado por una fina lista mediodorsal, la diferencian notoriamente. Tiene tres líneas corporales bien definidas.

VII. *Atractus janethae* sp. nov. Figuras 32, 33A, 33B, y 33C.

Holotipo. ICN 10104 (JSH-567). Ejemplar hembra, en buen estado.

Localidad típica. Colombia, departamento de Amazonas, La Chorrera (01° 25' 24" Sur, 72° 51' 16" Oeste). Actualmente restringida a la localidad típica en el corregimiento de La Chorrera, en los márgenes del río Igaparaná. Figura 34.

Morfometría del holotipo. Largo total: 300 mm, largo de la cabeza: 9 mm; ancho de la cabeza: 5 mm; largo de la cola: 40 mm (13.3% T.T.).

Diagnosis. Cabeza alargada, hocico agudo, con ojos ligeramente sobresalientes, pupila circular y 12 dientes maxilares largos visibles fácilmente. Coloración crema uniforme, tanto en las regiones dorsolaterales como en el abdomen. En el dorso presenta múltiples manchitas de color castaño oscuro que se extienden desde la región nugal hasta la cola. Cabeza castaño oscuro por encima; región gular, crema. Escala dorsal 17-17-17; supralabiales 7-7; tercera y cuarta tocando el ojo; infralabiales 7-7.

Etimología. Esta especie está dedicada a mi hija Janeth Silva Collazos.

Descripción del holotipo. Hembra. Cabeza ligeramente distinta del cuerpo, alargada, con hocico agudo; ojos ligeramente sobresalientes; pupila circular, 12 dientes fácilmente visibles; rostral no visible desde encima, más ancha que larga; internasales grandes, ligeramente cuadradas, en contacto; prefrontales, grandes, triangulares; loreal alargada, tan larga como una prefrontal. Frontal triangular, más ancha que larga, en forma de corazón; supraoculares pequeñas; parietales grandes, triangulares, más largas que anchas; supralabiales 7-7, tercera y cuarta tocando el ojo; infralabiales 6-6; un par de mentonianas en contacto con las tres primeras infralabiales. Escala dorsal 17-17-17, sin fosetas apicales. Anal entera, subcaudales 40, divididas. Figuras 33A, 33B y 33C.

Coloración. Cabeza de coloración castaño oscuro; cuerpo de color crema uniforme en las regiones dorsolaterales y el vientre. En el dorso tiene unas manchitas castaño oscuro que se extienden desde la región nugal hasta la cola. La coloración descrita corresponde al espécimen fijado en alcohol al 75% y conservado en el alcohol-glicerina.

Comentarios. *A. janethae* sp. nov. presenta aspectos morfológicos muy característicos como el largo de la cabeza, el número de dientes y su tamaño; éstos son largos y salientes, por lo cual son fácilmente visibles e identificables;

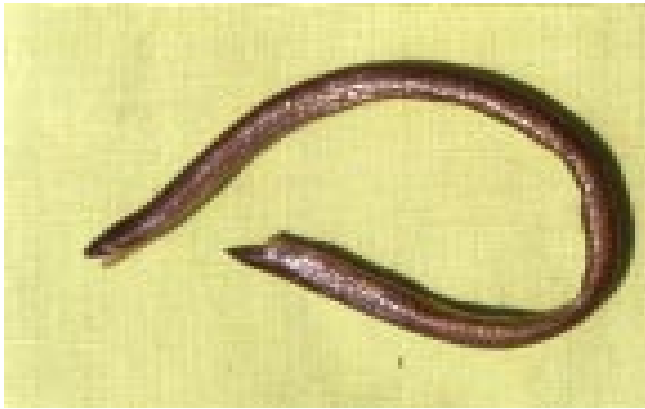
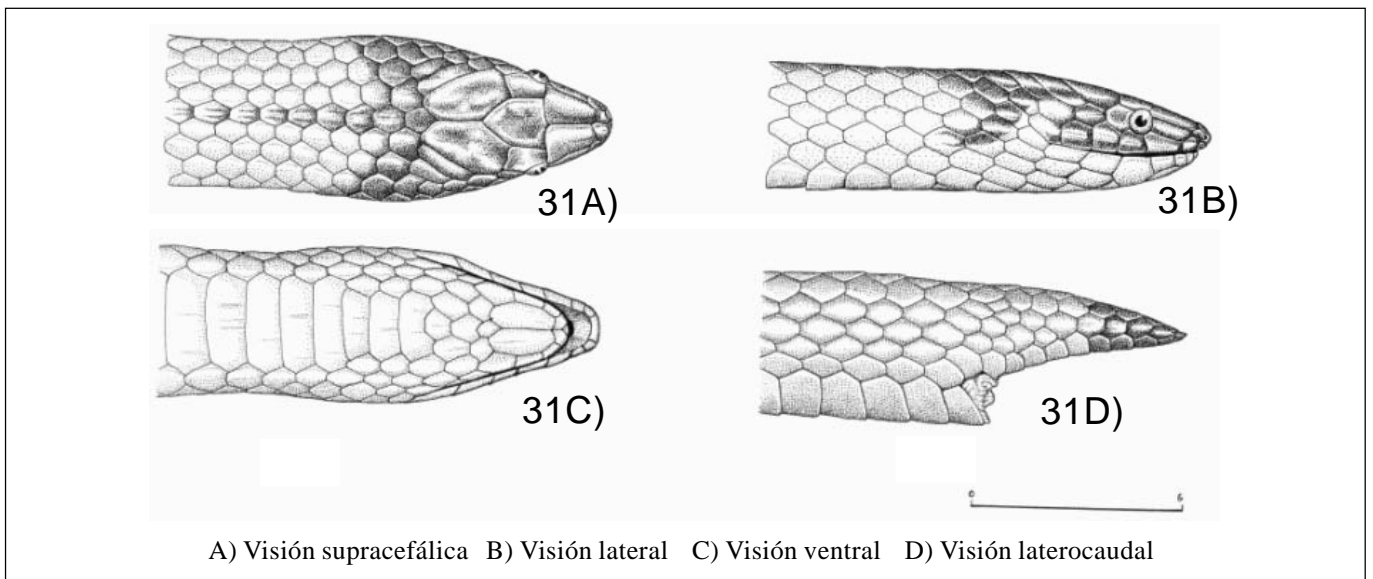


Figura 28. *Atractus heliobelluomini* sp. nov. Visión dorsal.



Figura 29. *Atractus heliobelluomini* sp. nov. Visión ventral.



A) Visión supracefálica B) Visión lateral C) Visión ventral D) Visión laterocaudal

Figura 31. *Atractus heliobelluomini* sp. nov.



Figura 32. *Atractus janethae* sp. nov.

su patrón de color la diferencia de las otras especies que habitan en la región sur de la Amazonia colombiana.

VIII. *Atractus latifrons* (Gunther, 1868). Figura 35. Nombre vulgar “Falsa ‘coral’”.

Distribución geográfica. Amazonia colombiana. Amazonia occidental brasilera. Amazonia central, región de Manaus (Martins & Oliveira, 1993-1988). Amazonia peruana, en los límites con Colombia, riveras de los ríos Amazonas y Putumayo. Surinam. (Hoogmoed, 1980). Amazonia colombiana (Pérez-Santos & Moreno, 1988).

Descripción morfológica. Cabeza ligeramente distinta del cuerpo, ovalada; ojos levemente prominentes, con pupilas circular; rostral ligeramente visible desde encima, más ancha que alta; internasales pequeñas, trian-

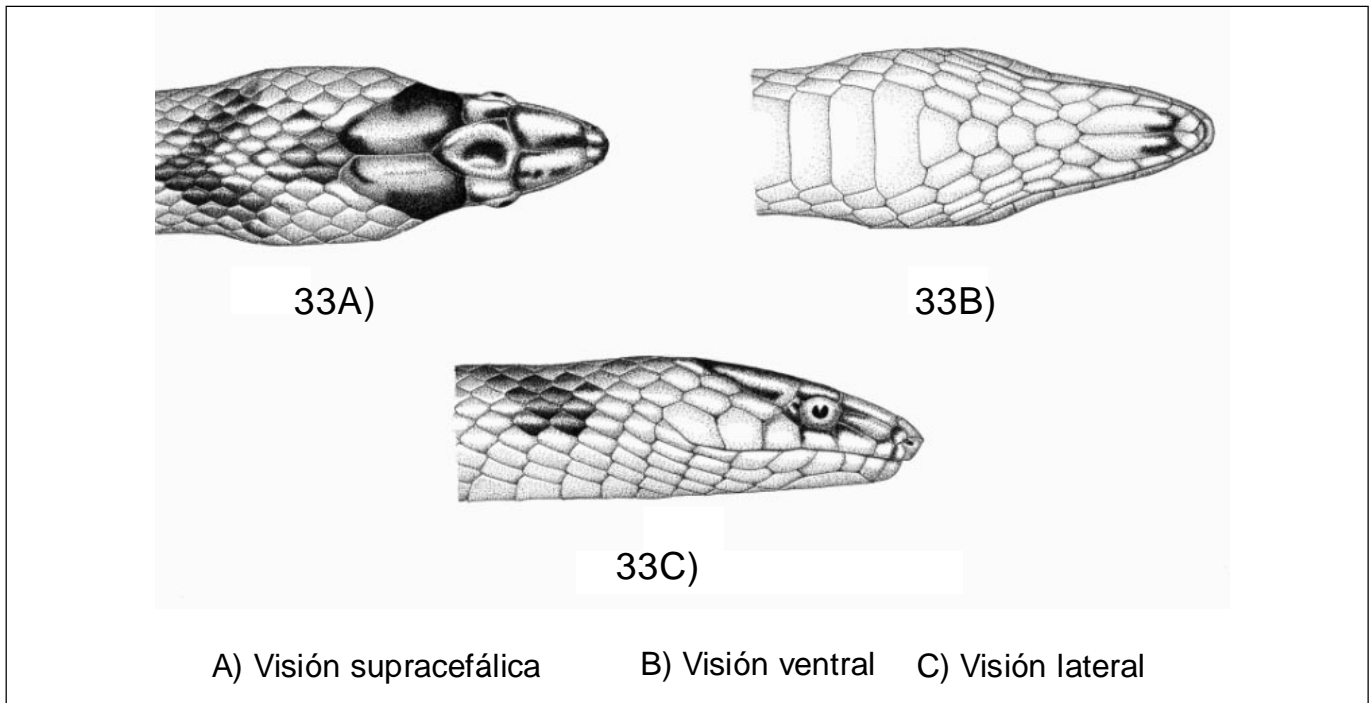


Figura 33. *Atractus janethae* sp. nov.

gulares y en contacto; prefrontales grandes, más anchas que largas, dos y media veces más grandes que las internasales; frontal triangular, más ancha que larga, tan ancha como una prefrontal. Supraoculares, pequeñas, triangulares; parietales, grandes; nasal dividida; loreal, pequeña, cuadrada o rectangular, en algunos especímenes; ausencia constante de preoculares; postocular 1-1 (52 N); 1-2 (5 N); supralabiales 6-6 (57 N), tercera y cuarto tocando el ojo; infralabiales 7-7 (55 N); 7-6 (2 N); un par de mentonianas, grandes, en contacto, con las cuatro primeras infralabiales; temporales 1+2 (56 N); 1+1 (1 N); Figuras 36A, 36B y 36C. Escala dorsal 17-17-17, lisas sin fosetas apicales; ventrales 145-157, en machos y 150-163, hembras; anal entera; subcaudales 25/25 (3 N); 35/35 (9 N); 38 /38 (7 N); 41/41 (2 N), en machos; 27/27 (8 N); 30/30 (14 N); 34/34 (10 N), en hembras. Figuras 36A, 36B y 36C.

Tamaño máximo observado. 700 mm (hocico-cola), en machos. Relación T.T. cola (12.4 %). Tamaño total en hembras: 650 mm. Relación T.T. cola (10%).

Coloración. *A. latifrons* exhibe diferentes patrones de color. La coloración general consta, básicamente, de anillos rojos, negros, amarillos o blancos, dispuestos en díadas o tríadas; en algunos individuos no hay una dispo-

sición regular. El patrón de colorido más común es el de anillos negros, blancos y rojos completos alrededor del cuerpo. Los anillos blancos en algunos individuos están remplazados por amarillo. La coloración y sus diseños semejan las corales venenosas con las cuales ésta especie es generalmente confundida.

Hemipenes. De 17 mm de largo, bífidos; cubiertos con abundantes espículas en el cuerpo y en las ramas de división; conductos seminíferos con bifurcación alta. Figura 37.

La rica variabilidad de colores y diseños puede explicarse por el comportamiento mimético que exhibe en su hábitat. Indudablemente el colorido de *A. latifrons* guarda relación con las especies simpátricas de *Micrurus* e igualmente con las especies del grupo opistoglifodonte con quienes convive en la región.

En el sur de la Amazonia colombiana vive en simpatría con ocho especies de *Micrurus* (corales venenosas) y otros ofidios del grupo opistoglifodonte, principalmente con los de hábitos terrestres como *Oxyrhopus petola digitalis*, *O. melanogenis* y *Erithrolamprus aesculapii*. Con esta última especie *A. latifrons* presenta mimetismo batesiano. *Micrurus M. lemniscatus*, *M. hemprichii ortonii* y *M. filiformis* son imitados imperceptiblemente por *A. latifrons*.

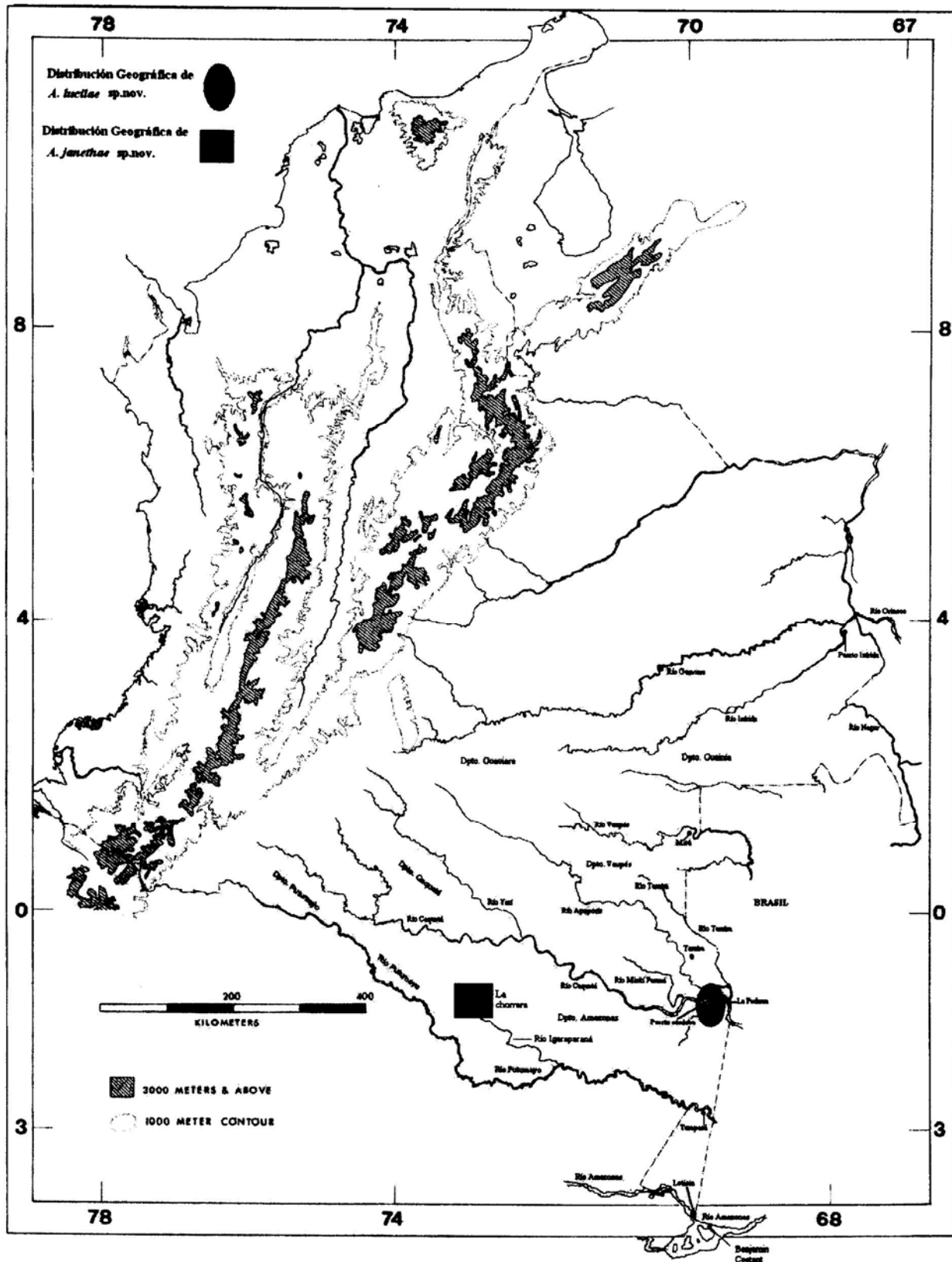


Figura 34. Mapa de distribución de *A. janethae* sp. nov. y *A. lucilae* sp. nov.

Hábitat. Vive principalmente en el ambiente criptozoico debajo de la cobertura foliácea, del sustrato regenerativo en el bosque primario. Algunos individuos viven en la mata secundaria, en área de cultivo, debajo de troncos y material vegetal en descomposición, donde abundan oligoquetos, y otros organismos descomponedores. Umbratícula, como la mayoría de los *Atractus*, y de actividad nocturna. *A. latifrons* se ha adaptado bien a los ambientes antropogénicos y es cada vez más común en los alrededores de la ciudad de Leticia.

Alimentación. Se alimenta preferentemente de oligoquetos. Un ejemplar mantenido en cautiverio regurgitó una "lombriz de tierra". Iguales hábitos alimenticios han sido observados por **Martin & Oliveira** (1988).

Reproducción. Ovípara. Las posturas constan de 4 a 9 huevos, de 25 a 27 mm de largo. La época de postura va de mayo a junio, observándose las eclosiones de los huevos entre los meses de agosto, septiembre y octubre.

Comentarios. *A. latifrons* es la especie con mayor frecuencia poblacional en la Amazonia. Un total de 57 ejemplares han sido capturados hasta 2002; además es, desde el punto de vista taxonómico, la mejor caracterizada; sus caracteres morfológicos presentan mínima variación.

En relación con los elementos merísticos comprobamos la invariabilidad en la lepidosis cefálica; escamas supralabiales e infralabiales, postoculares, temporales y loreal, son constantes en número y morfología. Las variaciones de las gastrotegas y subcaudales corresponden a caracteres genéticos de dimorfismo sexual.

Los hallazgos del análisis de la escamación ventral, subcaudal y cefálicas publicados por investigadores de la herpetofauna de la región amazónica, demuestran la homogeneidad de los caracteres morfológicos externos de esta especie.

Frente a cualquier agresión externa *A. latifrons* exhibe un comportamiento aposemático, enrollando, evertiendo y levantando la cauda, dejando ver la coloración anaranjada, roja y negra de la región ventral. Es razonable considerar, que la coloración de su cuerpo es principalmente mimética pero también puede ser procríptica.

Se examinaron: 57 especímenes.

IX. *Atractus lucilae* sp. nov.

Figura 38.

Holotipo. ICN 10105 (JSH-1243). Ejemplar hembra adulto, capturado por el indígena Abelardo Yepes a las 8:00 a.m. en XII-5-1987. Se encuentra en buen estado.

Paratipo. Un ejemplar, adulto, hembra, ICN 10106 (JSH-2097) hallado en la misma localidad de origen del holotipo, en octubre de 1989, en un sustrato pedregoso, húmedo, cubierto por hojarasca; ICN 10107 (JSH-2687). Ejemplar hembra adulta, hallada en la Chorrera, en agosto de 2004.

Localidad típica. Colombia, departamento de Amazonas. Puerto Córdoba, corregimiento de La Pedrera, en la margen nororiental del río Caquetá (01° 09' 38" Sur, 69° 40' 00" Oeste). Figura 34.

Morfometría del holotipo. Largo de la cabeza 8 mm; ancho 5 mm; largo total del cuerpo 230 mm; largo de la cola 28 mm (12,7% del T.T.)

Diagnos. Cuerpo pequeño con 17-17-17 filas de escamas de color castaño claro o crema brillante ornado con múltiples puntitos irregulares castaño oscuro, los cuales ocupan las regiones laterales y el dorso, y se extienden desde la nuca hacia atrás, en una extensión de 5 cm; además tiene 7 a 9 líneas transversales muy finas, que ocupan una escama dorsal; son de color castaño oscuro y alcanzan, cada lado, la región paraventral. En la cabeza, cubriendo la corona cefálica, presenta una mancha castaño oscuro, brillante. Abdomen crema brillante. Supralabiales 7-7 e infralabiales 6-6.

Etimología. Esta especie está dedicada a mi hija Lucila Silva Collazos.

Descripción del holotipo. Bien preservado en alcohol glicerina al 75%, conserva su coloración natural. Cabeza ligeramente sobresaliente del cuerpo, hocico negro, suavemente agudo; ojos con pupila circular; rostral pequeña no visible desde encima; internasales pequeñas, redondeadas, en contacto. Prefrontales más largas que anchas; frontal triangular, más larga que ancha, tan larga como la prefrontal; loreal alargada; nasal dividida. Ausencia de preocular; una (1) postocular (1-1); temporales 1+2-1+2; supralabiales 7-7, tercera y cuarta tocando el ojo; infralabiales 6-6.; un par de mentonianas, grandes, en contacto con las tres primeras infralabiales. Escala dorsal en 17-17-17 filas, ventrales 160. subcaudales 38/38, cola aguda con 28 mm de largo. Figuras 39A, 39B y 39C.

Comentarios. El examen comparativo de *A. lucilae* sp. nov., con las del sur de la Amazonia colombiana muestra claras diferencias taxonómicas. Si bien el patrón cromático de *A. torquatus* presenta ligeras similitudes con *A. lucilae*, los demás caracteres taxonómicos, como la lepidosis en general, y la morfometría, son notablemente diferentes. *A. torquatus* es una especie grande con 463

mm (T.T.) en machos; y 527 mm (T.T.) en hembras; cola de 94 mm; 8 supralabiales, igualmente ocho infralabiales (**Hoogmoed**, 1980). En la Amazonia colombiana se capturó un ejemplar de *A. torquatus* en Mitú. No se ha registrado la presencia de esta especie en el sur de la Amazonia colombiana. En *A. lucilae* las hembras miden 230 a 340 mm (T.T.).

Por las características expuestas *A. lucilae* difiere de las demás especies de *Atractus* de la región amazónica colombiana, considero que se trata de una buena especie.

El holotipo y el paratipo (ICN 10105-06) fueron fijados en formol, la rigidez de los ejemplares y el tamaño pequeño de la región subcaudal, imposibilitó la disección para determinar el sexo.

Se examinaron tres especímenes.

X. *Atractus major* Boulenger, 1894. Figuras 40 y 41.

Distribución geográfica. En la Amazonia oriental colombiana, departamento del Putumayo; Brasil en la región de Manaus (**Martins & Oliveira**, 1993-1998); Amazonia peruana, región de Iquitos (**Carrillo & Icochea**, 1995; **Dixon & Soini**, 1986). Amazonia ecuatoriana (**Savage**, 1960; **Duellman**, 1978). Sur de la Amazonia Venezolana (**Lancini**, 1986; **Roze**, 1966).

Descripción morfológica. Cabeza fina, ligeramente distinguible del cuerpo; ojos con pupila circular, 6 dientes maxilares; rostral no visible desde encima; internasales pequeñas, circulares en contacto, frontal triangular, más larga que ancha; parietales grandes; nasal entera; loreal alargada; ausencia de preocular; postoculares 2-2; temporales 1+1-1+1; supralabiales 7-7, infralabiales 7-6; un par de mentonianas grandes, en contacto con las tres primeras infralabiales; escala dorsal 17-17-17; ventrales 146; anal entera; subcaudales 34/34. Figuras 42A, 42B y 42C.

Tamaño máximo: 450 mm; cola 62 mm (13.7 % T. T.), ejemplar No. 2.031.

Coloración. Cabeza oscura, brillante, región gular amarilla o crema, dorso de color castaño ornado con manchas castaños oscuras, diferentes formas que se extienden desde atrás de la nuca hasta la cola. Región ventral crema brillante salpicada con múltiples puntitos castaño oscuros que se extienden desde la región gular hasta la cola.

Hemipenes. Bífidos, con abundantes espinas grandes e incurvadas en la mitad inferior; otras finas en las ramas terminales; las ramas de división son incurvadas hacia adentro; conducto seminífero bífido, la división es alta. Figura 43.

Hábitat. El ejemplar ICN 10105, macho, fue capturado en el patio de una vivienda en la localidad de Puerto Caicedo, Putumayo, a las 6 a.m., en un sustrato pedregoso, sombrío y húmedo.

Martins & Oliveira (1993), informan de varias capturas en el suelo del bosque primario cubierto por hojas húmedas y señalan la actividad tanto diurna como nocturna. **Dixon & Soini** (1986), hallaron un espécimen durante el día en áreas cultivadas. **Duellman** (1978) indica la actividad diurna de *A. major* en el suelo del bosque primario cubierto de hojas.

Alimentación. Preferiblemente oligoquetos. **Martins & Oliveira** (1993) y **Duellman** (1978).

Reproducción. Ovípara. Posturas de 6 huevos. Las eclosiones pueden ser en los meses de agosto, septiembre y noviembre [**Martins & Oliveira** (1993)].

Comentarios. La descripción de *A. major* corresponde al ejemplar único No. 2.031 capturado en Puerto Caicedo (1996), departamento del Putumayo. Esta especie ha sido registrada para Brasil, en la región de Manaus por **Martins & Oliveira** (1993); para Perú en la región de Iquitos, por **Dixon & Soini** (1986) & **Carrillo e Icochea** (1995). En Ecuador por **Savage** (1960). En Venezuela por **Lancini** (1986) & **Roze** (1966). El análisis morfológico del único espécimen no permite conocer las variaciones intra específicas de la lepidosis. La escama rostral, pequeña, poco visible desde encima; y la escama loreal alargada, coinciden con la descripción dada por **Roze** (1966) en los ejemplares estudiados procedentes de la región amazónica de Venezuela.

En Colombia ha sido registrada en los departamentos de Atlántico y Cundinamarca por **Sánchez C. & cols.** (1987), por lo tanto, *A. major* tendría una amplia dispersión geográfica en el territorio colombiano. Es importante revisar la dispersión geográfica de ésta especie, pues es dudosa su presencia en el Caribe y la zona andina.

XI. *Atractus occipitoalbus* (Jan, 1862). Figura 44. Figuras 45A, 45B y 45C.

Distribución geográfica. Orito, en el departamento del Putumayo, a 775-850 msnm; en la región nororiental de la Amazonia ecuatoriana, en los límites con Colombia y Perú.

Descripción morfológica. Cuerpo cilíndrico, cabeza pequeña (10 mm), hocico ligeramente agudo; ojos con pupila circular; escama rostral, pequeña, no visible desde

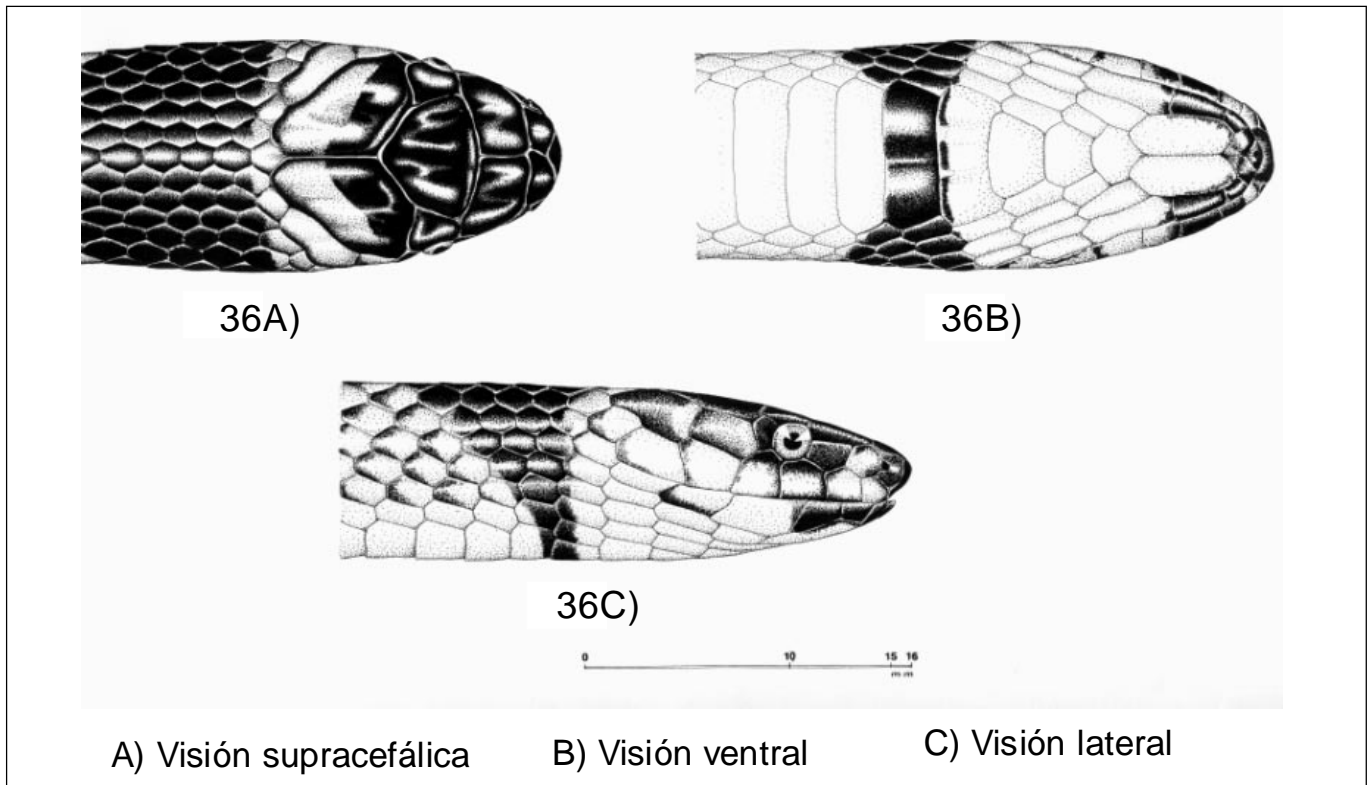


Figura 36. *Atractus latifrons* (Gunther, 1868).

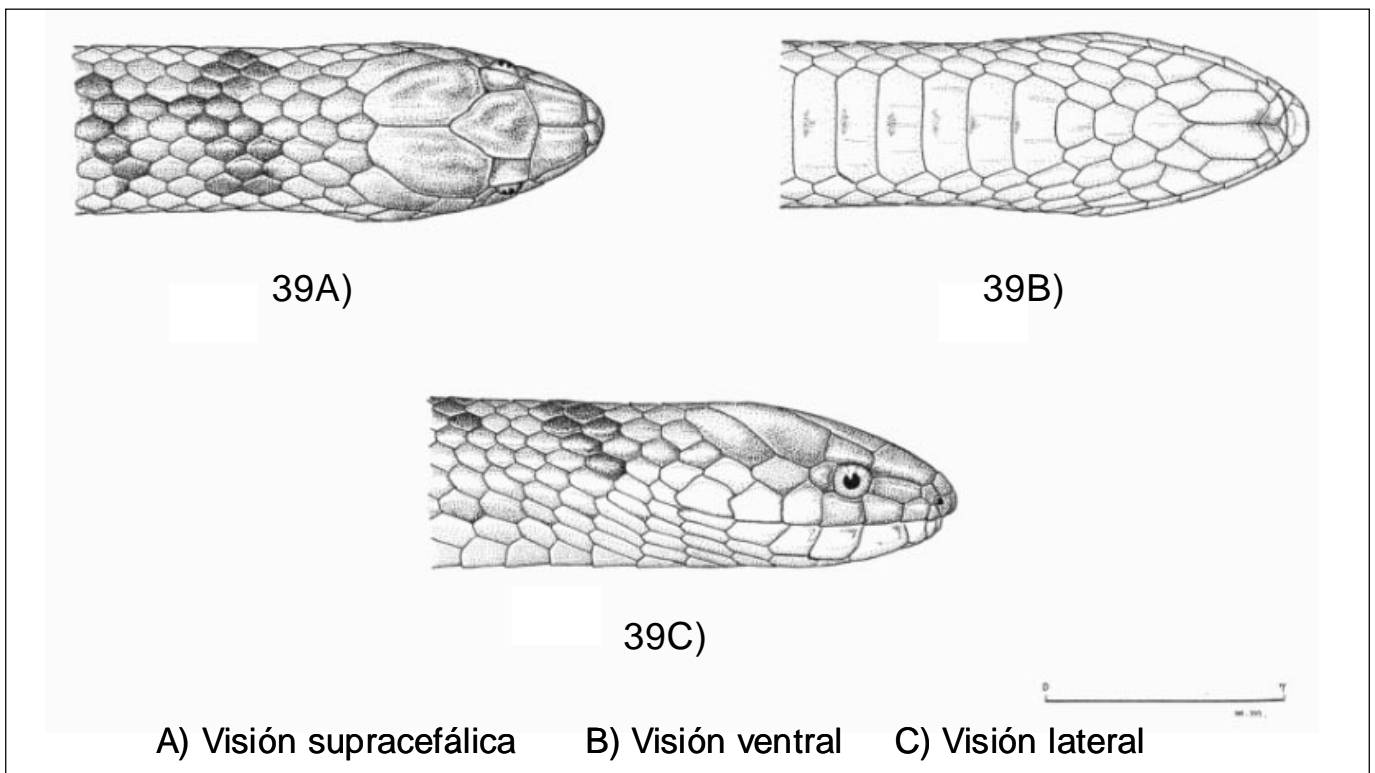


Figura 39. *Atractus lucilae* sp. nov.



Figura 35. *Atractus latifrons* (Gunther, 1868).

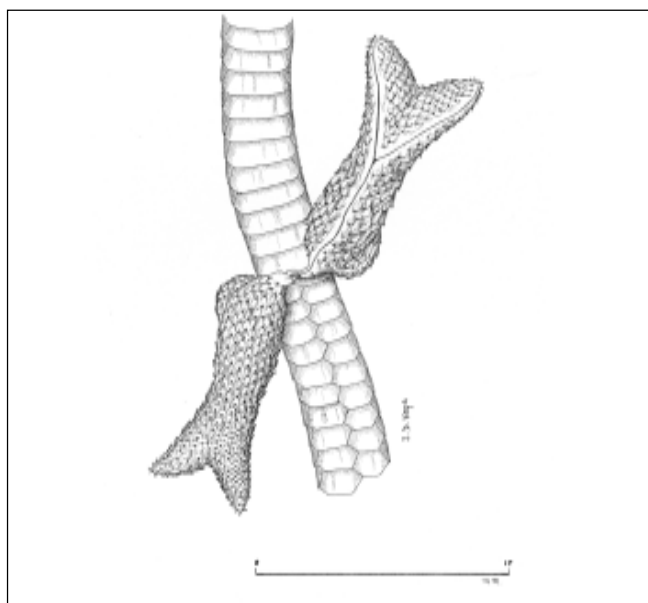


Figura 37. Hemipenes de *Atractus latifrons* (Gunther, 1868).



Figura 38. *Atractus lucilae* sp. nov.

encima; internasales pequeñas, redondeadas; nasales divididas; prefrontales grandes, trapezoidales, tan largas como la loreal; frontal triangular, más ancha que larga; ausencia de preoculares; postoculares 1-1; loreal alargada; supralabiales 7-7, cuarta, quinta y sexta, en contacto con el ojo; infralabiales 7-7, las cuatro primeras en contacto con las mentonianas; un par de mentonianas grandes; dorsales en filas de 15-15-15, lisas, brillantes y sin fosetas apicales; ventrales 166; anal entera; subcaudales alargadas en sentido transversal, divididas y en número de 13/13. Figuras 45A, 45B y 45C.

Tamaño máximo observado: 230 mm (hocico-cola); cola: 10 mm (4,3% del T. T.).

Coloración. Cabeza con hocico negro. En la región supracefálica presenta una franja de color blanco que ocupa las regiones temporal y parietal; además se extiende hacia abajo a la región gular.



Figura 40. *Atractus major* Boulenger, 1894. Visión dorsal.



Figura 41. *Atractus major* Boulenger, 1894. Visión ventral.

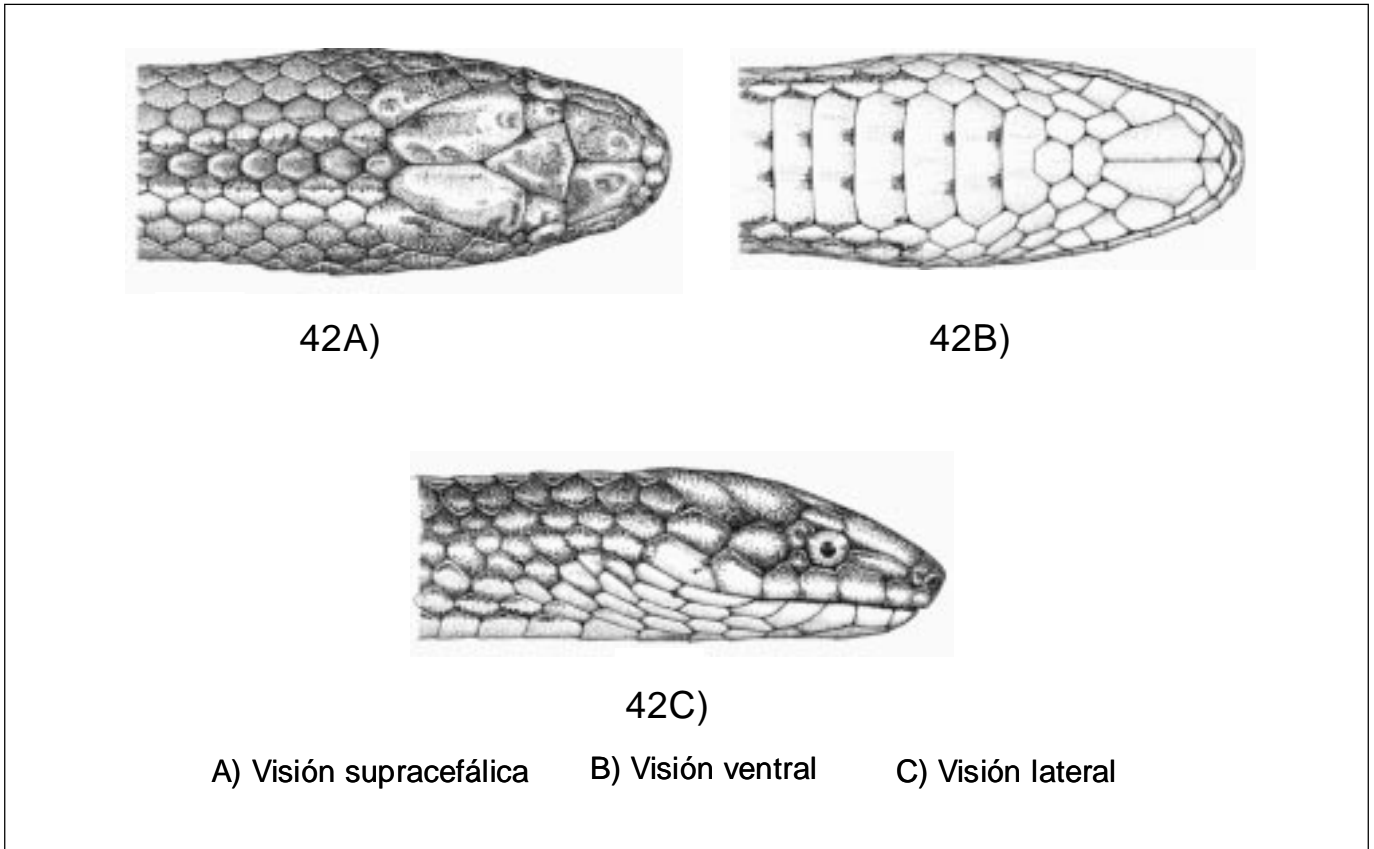


Figura 42. *Atractus major* Boulenger, 1894.

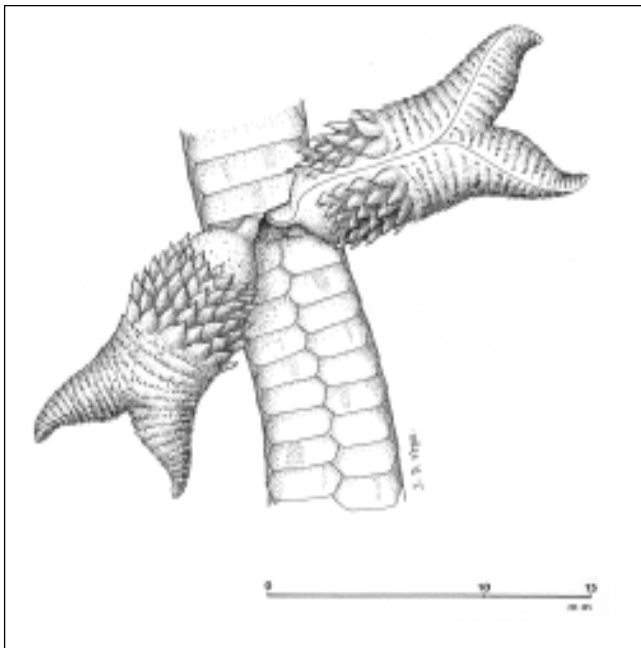


Figura 43. Hemipenes de *Atractus major* Boulenger, 1894.

Coloración negro brillante, homogéneo, en las caras dorsolaterales del cuerpo; región ventral de color gris azulado.

Hábitat. El bosque húmedo sombrío, en el biotopo criptozoico, cubierto por hojarasca. El ejemplar N° F. Q (R) 2080, procedente del municipio de Orito, Putumayo, Colombia, fue capturado a las 7 p.m., en un sustrato muy húmedo, en el “Cananguchal” (agrupación de palmeras del género *Mauritia*).

Reproducción. Ovípara. Las disecciones practicadas por **Duellman** (1978), en especímenes hembras, de la región de Santa Cecilia, Ecuador, muestran un máximo de tres huevos en el oviducto, durante los meses de marzo y abril.

Alimentación. Se alimenta de oligoquetos (**Duellman**, 1978).

Comentarios. *Atractus occipitoalbus* (Jan, 1862) es de tamaño pequeño, cuerpo cilíndrico, coloración negra brillante uniforme en las regiones dorsolaterales del cuer-

po y en la cabeza, presenta una franja blanca de dirección transversal; cola pequeña, aguda, con las escamas subcaudales alargadas transversalmente –observación del autor– estas características morfológicas permiten una fácil determinación. El hallazgo de *A. occipitoalbus*, constituye el primer registro para territorio colombiano.

Los ejemplares estudiados por **Duellman** (1978), en la región de Santa Cecilia, Ecuador, presentan iguales caracteres taxonómicos que el ejemplar analizado en el presente trabajo. El polimorfismo de esta especie ha sido señalado por Duellman, en los individuos de las poblaciones del Ecuador. En el Perú, ha sido registrado en la región del Eucayali, en el Cuzco y en el territorio de Junín por **Carrillo & Icochea** (1995).

Material examinado: Un ejemplar perteneciente al Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia. Ejemplar N° F. Q. (R) 2080.

XII. *Atractus snethlagae* Cunha y Nascimento, 1983. Figura 46.

Distribución geográfica. Sur de la Amazonia colombiana, Amazonia oriental y región de Manaos (**Cunha & Nascimento**, 1983-1993; **Martins & Oliveira**, 1998-1993); Regiones limítrofes de Colombia, Brasil y Perú, en el área del Trapecio amazónico, Colombia (**Silva Haad**, 2003).

Descripción morfológica. Ejemplar ICN 10106 (JSH-694). Cabeza no distinta del cuerpo, 12 mm de largo desde la región temporal hasta el hocico. Ojos pequeños, pupilas circulares; rostral no visible desde encima; internasales pequeñas en contacto; prefrontales grandes, trapezoides, más largas que anchas; frontal triangular, en forma de corazón; supraoculares pequeñas; parietales grandes; loreal alargada; nasales divididas; preocular ausente; postoculares dos; temporal 1+1; supralabiales 7-7, 3ª y 4ª tocando el ojo. Infralabiales 7-7, cuatro en contacto con las mentonianas. Un par de mentonianas. Cuerpo cilíndrico, cubierto con escamas lisas en filas de 17-17-17; escamas ventrales 154; subcaudales 22/ 22. Figuras 47A, 47B y 47C.

Cuerpo. Cilíndrico cubierto con escamas lisas, sin fosetas apicales. Escala dorsal en 17-17-17 filas; ventrales 154; anal entera; subcaudales 22.

Morfometría. Especímenes: ICN 10106, macho, procedente de Nazareth, Amazonas, Colombia, y el ejemplar ICN 10107 (JSH-1.706), hembra, procedente de Puerto Córdoba, en las márgenes del río Caquetá, departamento de Amazonas. Ejemplar (JSH-694), tamaño total (T.T.): 260 mm; cola 35 mm, aguda, (13.46% T.T.).

Lepidosis. Escala dorsal 17-17-17; ventrales 161; subcaudales 33.

Coloración. Hocico marrón; una banda transversal castaño claro o amarillo cubre las regiones parietal y temporal. Región gular castaño claro ornada con manchitas marrones irregulares. Las regiones dorsolaterales del cuerpo tienen bandas transversales irregulares en forma y número que se extienden desde el cuello hasta la cola. Abdomen amarillo claro, con múltiples manchitas castaño o marrón claro.

Hemipene. Simple, cubierto con espinas, cortas y curvas, las cuales ocupan los dos tercios superiores del cuerpo; ausencia de espículas en el tercio inferior; pedúnculo liso.

Hábitat. Bosque primario en el ambiente criptozoico, sombrío y húmedo.

Alimentación. Preferentemente oligoquetos (**Cunha & Nascimento**, 1978, 1993). Además restos de ácaros (Colobatidae) y de insectos. Posiblemente estos últimos provienen de la digestión de los oligoquetos.

Reproducción. Nada se sabe sobre la reproducción de esta especie.

Comentarios. En 1978, **Cunha & Nascimento**, describieron *A. snethlagae* como *A. flamigerus snethlagae*, asignándole el status de subespecie de *A. flamigerus* Boie, 1827. Los especímenes estudiados y publicados en la monografía fueron identificados como *A. badius* Boie, 1827. Posteriormente ellos mismos reconocieron y enmendaron el equívoco (1993). **Martins & Oliveira** (1993) le dieron la categoría de especie como un taxón distinto de *A. flamigerus* Boie, 1827. **Hoogmoed**, en su revisión del género *Atractus* en Surinam (1980), revalida la especie *A. flamigerus* Boie y señala la distribución geográfica restringida a la Guayana Holandesa (Surinam).

Material examinado. Dos especímenes (No. JSH-694 y JSH-1.706). Su presencia constituye un nuevo registro para Colombia.

XIII. *A. torquatus* (Dumeril, Bibron et Dumeril, 1894). Figura 48.

Distribución geográfica. Sur de la Amazonia colombiana. El ejemplar ICN 10108 (JSH-2.040) fue capturado en la localidad de Mitú, Vaupés, por un nativo de la región en 1997. Amazonia central brasilera, región de Manaos (**Martins & Oliveira**, 1993-1998).

Descripción morfológica. Cabeza aguda, distinguible del cuerpo; hocico agudo; ojos con pupila circular; cinco



Figura 44. *Atractus occipitoalbus* (Jan, 1862) 1894.

dientes maxilares; rostral pequeña, no visible desde encima; internasales pequeñas, redondeadas; prefrontales grandes, trapezoidales; frontal triangular, más larga que ancha, tan larga como una prefrontal; supraoculares pequeñas; parietales grandes; temporales 1+2; loreal alargada; ausencia de preocular; nasales enteras; postoculares 1-1; supralabiales 6-6; 1^a, 2^a y 3^a en contacto con el ojo; la 3^a y la 4^a son grandes; infralabiales 7-7, tres en contacto con las mentonianas; un par de mentonianas, grandes en contacto con la 1^a, 2^a y 3^a, infralabiales. Dorsales 17-

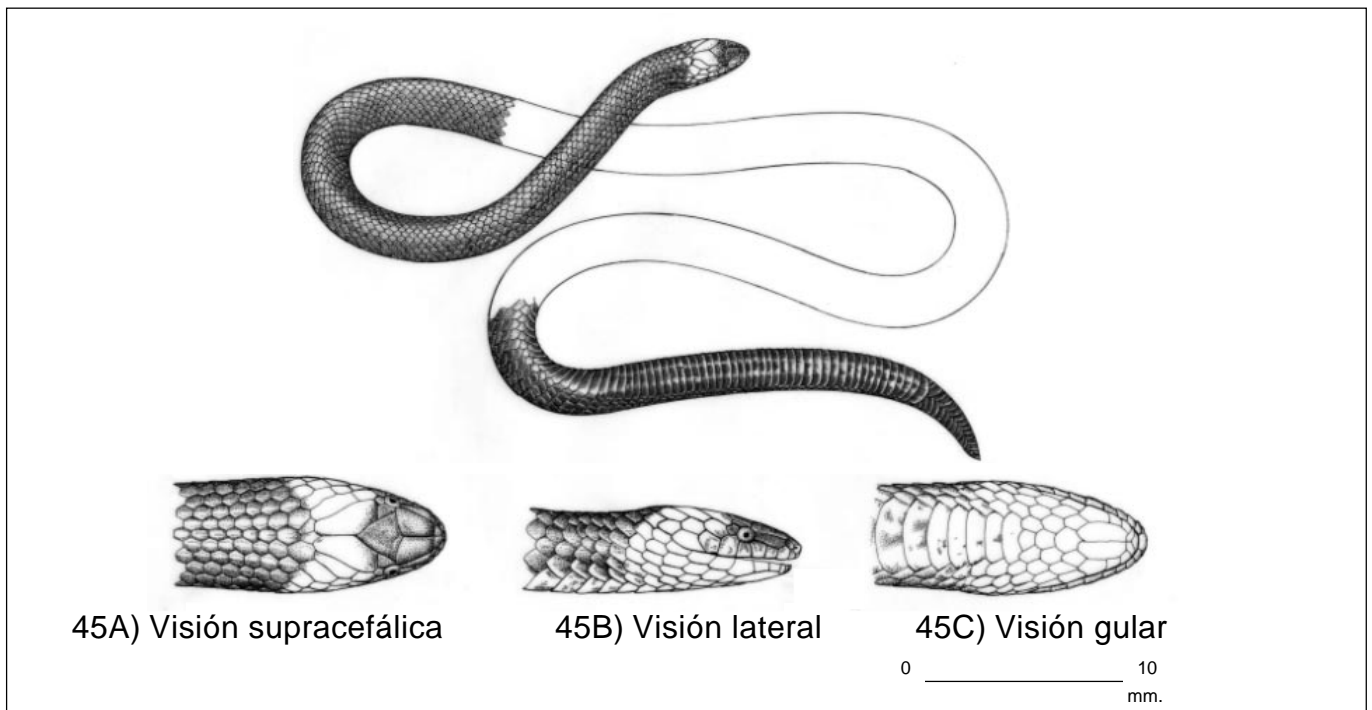


Figura 45. *Atractus occipitoalbus* (Jan, 1862).



Figura 46. *Atractus snethlagae* Cunha y Nascimento, 1983.



Figura 48. *Atractus torquatus* (Dumeril, Bibron et Dumeril, 1894).

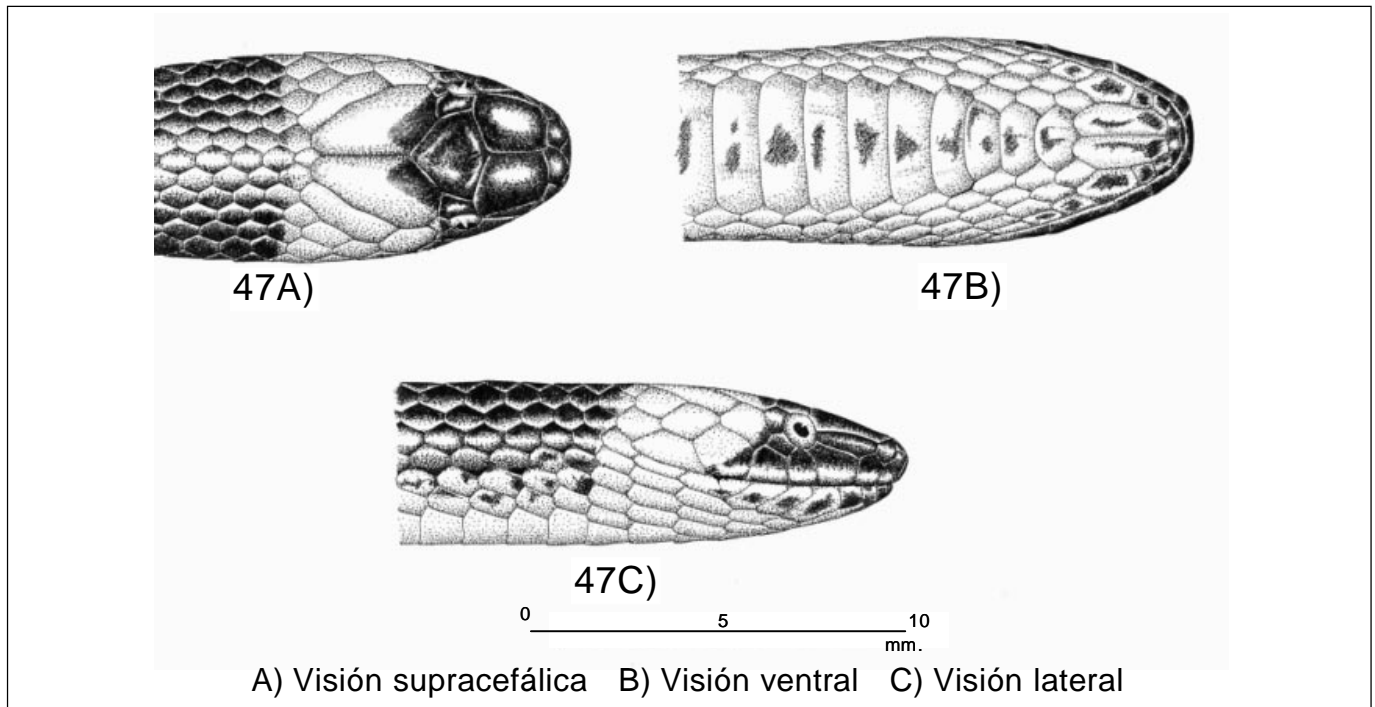


Figura 47. *Atractus snethlagae* Cunha y Nascimento, 1983.

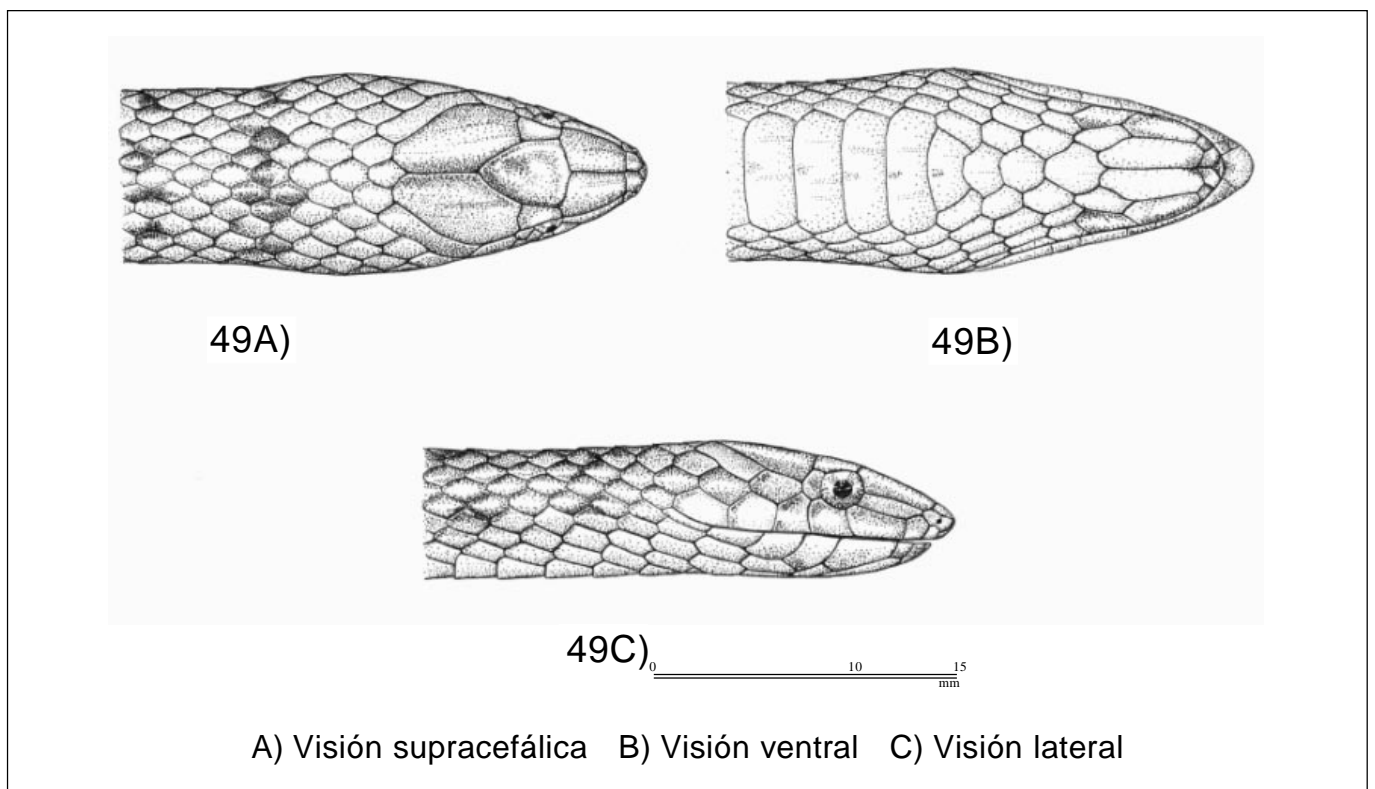


Figura 49. *Atractus torquatus* (Dumeril, Bibron et Dumeril, 1854).

17-17; ventrales 146 subcaudales 39/39. Figuras 49A, 49B y 49C.

Tamaño. 500 mm (hocico-cola); cola 65 mm (13% T.T.).

Coloración. Cabeza castaño claro brillante, región gular crema. Las regiones dorsolaterales del cuerpo, adornadas con manchitas negras puntiformes distribuidas irregularmente; vientre crema brillante con manchitas castaño oscuro.

Hábitat. Sustrato pedregoso, húmedo, cubierto por gramíneas. Capturada a las 8 a.m., al occidente de la localidad de Mitú por un nativo de esa región.

Alimentación. Oligoquetos preferencialmente, según Martins & Oliveira (1993).

Reproducción. Ovípara. Posturas de 7 a 8 huevos, según Martins & Oliveira (1993).

Comentarios. *Atractus torquatus* ha sido señalado en la región de Manaus, Amazonia central brasilera, por ilustres investigadores brasileiros (Martins & Oliveira, 1988). La coloración de los ejemplares estudiados por estos herpetólogos muestra variabilidad cromática, con tonos grises, rosados, castaño, iridiscentes, brillantes. Las regiones dorsolaterales del cuerpo están ornadas con punticos castaño oscuros. El vientre es de color crema o amarillo con manchitas castaño claro distribuidas irregularmente. La cabeza, en la región supracefálica, es de color negro claro brillante. La región gular amarilla o crema.

El ejemplar ICN 10108, hembra, capturado en la localidad Mitú, departamento del Vaupés, en la región



Figura 50. *Atractus zidoki* Gasc y Rodríguez, 1979. Visión dorsal.



Figura 51. *A. zidoki* Gsc y Rodríguez, 1979. Visión ventral.



Figura 53. *Atractus zidoki* Gasc y Rodríguez, 1979. Morfotipo rojo. Visión dorsal.



Figura 54. *Atractus zidoki* Gasc y Rodríguez. Morfotipo rojo. Visión ventral.

nororiental de la Amazonia colombiana, presenta una coloración igual a la detallada por los investigadores brasileiros. Son similares, igualmente la morfología general y la lepidosis.

La distribución geográfica de *A. torquatus* en Colombia es hasta el momento desconocida, en esto coincidimos con lo expresado por **Pérez-Santos & Moreno** al referirse al desconocimiento que hay al respecto en Colombia. La distribución geográfica señalada, en forma general, por Peters Orejas y Donoso Barros es vaga e imprecisa.

Por el momento, consideramos la distribución interna de *A. torquatus* restringida al territorio del departamento del Vaupés, en la región nororiental de la Amazonia colombiana.

XIV. *Atractus zidokii* Gasc y Rodríguez 1979.
Figuras 50 y 51.

Distribución geográfica. Sur de la Amazonia colombiana, en las localidades de La Pedrera, Taraira y Leticia. La Amazonia oriental brasileira, en la región este de Pará (**Cunha & Nascimento**, 1984-1993), Guayana holandesa y francesa (**Hoogmoed**, 1980).

Descripción morfológica. Cabeza ligeramente alargada, con una franja blanca, fina de dirección transversal,

sobre las escamas parietales, lateralmente se extiende sobre las temporales y la primera fila de las dorsales. Ojos con pupila circular; cinco dientes maxilares; rostral no visible desde encima, más ancha que larga; internasales en contacto por encima; prefrontales trapezoidales, más largas que anchas; frontal triangular más larga que ancha, tan larga como una prefrontal; supraoculares rectangulares; parietales grandes; loreal alargada; nasal entera; ausencia de preocular; postoculares 2-2; supralabiales 7-7(3N); infralabiales 7-7, 1^a, 2^a y 3^a tocando el ojo; Escala dorsal 17-17-17; ventrales 173-184; anal entera; subcaudales 26/26 – 36/36. Figuras 52A, 52B y 52C.

Tamaño máximo observado. 250 mm (hocico-cola); cola: 20 mm (8% T.T.).

Coloración. Cabeza pardo oscura con pequeñas manchitas negras; una franja nuczal de dirección transversal, roja o blanca sobre las escamas parietales, abarca hasta las escamas temporales, en ambos lados de la cabeza. Cuerpo pardo oscuro en las regiones dorsolaterales, salpicado con puntitos negros de distribución irregular. Van desde la nuca hasta la cola. A cada lado en las caras laterales del cuerpo, tiene una lista muy fina, castaño claro, que se extiende por las caras paraventrales, desde la región temporal hasta la cola. Dos especímenes, ICN 10109-10 (JSH-222 y JSH 1.268), presentan color castaño claro, uniforme, y vien-

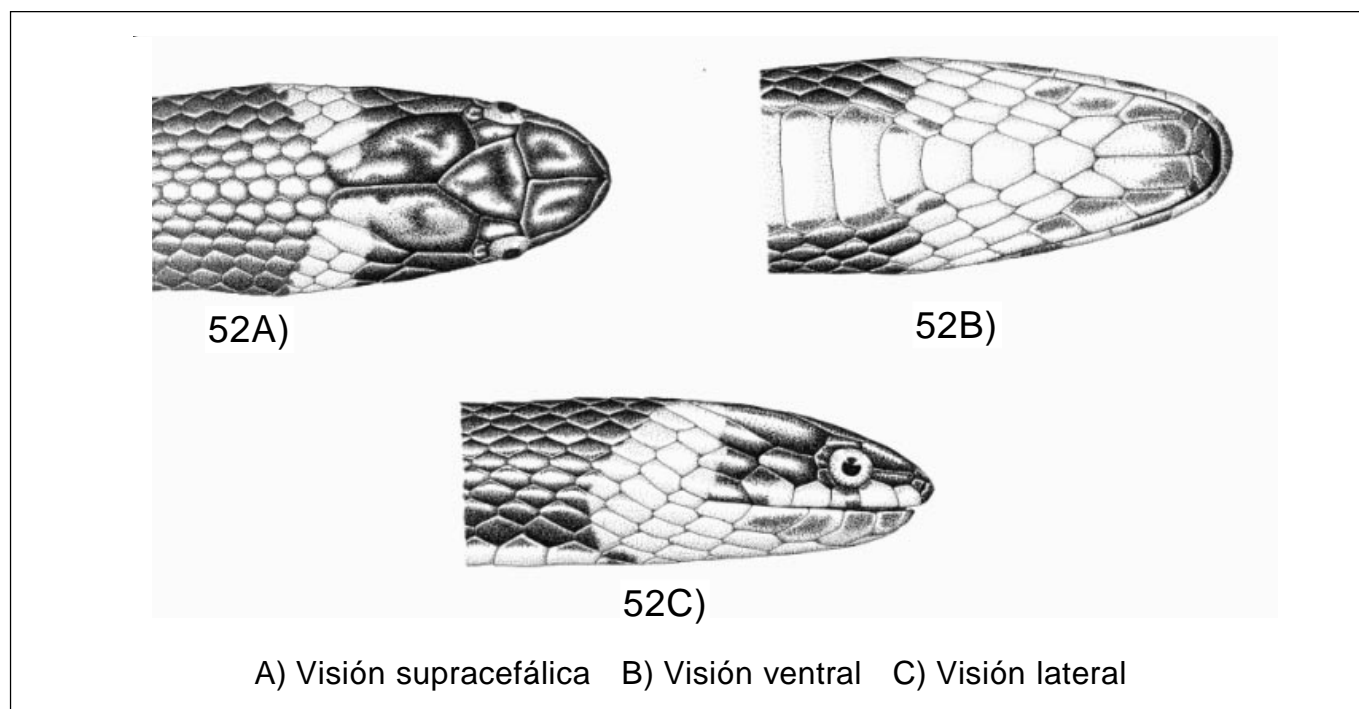


Figura 52. *Atractus zidoki* Gasc y Rodríguez, 1979.

tre crema homogéneo. En algunos ejemplares vivos la región ventral es de color rojo intenso y el dorso negro con fondo rojo. Figuras 53 y 54. Ejemplar ICN 10111.

Hábitat. En sustrato del bosque primario, húmedo, cubierto por hojarascas, y en las áreas de cultivos en el bosque intervenido y modificado por el hombre.

Alimentación. Nada sabemos acerca de los hábitos alimenticios de esta especie.

Reproducción. Se desconoce el ciclo reproductivo de esta especie.

Comentarios. Cuatro especímenes capturados en 30 años de pesquisa en el sur de la Amazonia colombiana, revelan la baja frecuencia poblacional de esta curiosa especie. Los especímenes examinados identificados con las fichas ICN 10109-12 (JSH-1303, JSH-222 y JSH-1286 y 1233) presentan una coloración distinta al patrón de colorido referido por **Cunha & Nascimento** (1984). El espécimen ICN 10111, *in vivo*, tenía la regiones dorsolaterales del cuerpo negro sobre un fondo rojo intenso; la región ventral, rojo in-

tenso uniforme; la cola negra en ambas caras. Los ejemplares ICN 10109-10 son castaño claros en las regiones dorsolaterales del cuerpo. El espécimen ICN 10112 es castaño oscuro, homogéneo en las regiones dorsolaterales del cuerpo y la región ventral crema uniforme (especímenes fijados en alcohol al 75%). El material examinado procedente del sur de la Amazonia colombiana y muestra una mínima variación en la lepidosis ventral y caudal, comparado con los individuos de las poblaciones de la región este de Pará, estudiados por **Cunha & Nascimento** (1984). En cuanto al número de dientes maxilares no se observó variación alguna en los especímenes estudiados; el hallazgo de cinco dientes en el maxilar fue constante. El hallazgo de *A. zidoki* Gasc & Rodríguez, 1979, en la Amazonia colombiana, constituye un nuevo registro para el país.

Se analizaron cuatro especímenes.

La Tabla 1 presenta una sinopsis comparativa de la morfometría y la lepidosis entre las diferentes especies presentes en la región amazónica de Colombia.

Tabla 1. Morfimetría y Lepidosis de los Atractus de la Amazonia colombiana

Atractus	Relación tamaño total-cola	Ventrales	Subcaudales	Escala dorsal	Supralabiales	Infralabiales	Postoculares	Temporales
<i>Davidhardii</i>	12%	148	44	17-17-17	7-7	7-7	1-1	(1+2)-(1+2)
<i>Elaps</i>	10%	139-158 (x=150) ♂ 151-170 (x=158.2) ♀	22/23 (x=27.2) ♂ 20/28 (x=21.75) ♀	15-15-15	6-6 (16N)	7-7 (13N) 6-6 (13N)	Una (13N) Dos (3N)	(1+2)-(1+2)
<i>Emersonii</i>	9%	156-158 ♀	25/25 ♀ 29/29 ♂	17-17-17	7-7	6-6	2-2	(1+2)-(1+2)
<i>Franciscopaivaii</i>	8.33%	120	20/20	15-15-15	5-5	5-5	1-1	(1+1)-(1+1)
<i>Heliobelluominii</i>	7.60%	121	8	15-15-15	6-6	7-7	1-1	(1+2)-(1+2)
<i>Janethae</i>	13.30%	156	40	17-17-17	7-7	6-6	1-1	(1+2)-(1+2)
<i>Latifrons</i>	10%	145-157 ♂ 150-163 ♀	25/25 (3N) ♂ 30/30 (14N) ♀ 35/35 (9N) ♂ 34/34 (10N) ♀ 38/38 (7N) ♂ 27/27 (8N) ♀	17-17-17	6-6 (57N) 7-7 (55N) 7-6 (2N)	7-7 (55N) 6-6 (67N)	1-1 (52N) 1-2 (5N)	1+2 (56N) 1+1 (1N)
<i>Lucilae</i>	12.70%	160	38/38	17-17-17	7-7	6-6	(1+1)-(1+1)	(1+2)-(1+2)
<i>Major</i>	13.70%	146	34/34	17-17-17	7-7	6-6	(2+2)-(2+2)	(1+1)-(1+1)
<i>Occipitoalbus</i>	4.3%	166	13/13	15-15-15	7-7	7-7	1-1	1+2
<i>Snethlagae</i>	13.46%	161	33/33	17-17-17	7-7	7-7 (1N) 8-8 (1N)	2-2	(1+1)-(1+1)
<i>Torquatus</i>	13%	146	39/39	17-17-17	6-6	7-7	1-1-1-1	(1+1)-(1+1)
<i>Zidoki</i>	8%	173-184	26/26 36/36	17-17-17	7-7 (3N)	7-7 (7N)	2-2-2-2	(1+2)-(1+2) (7N)

Agradecimientos

Al Dr. Jhon D. Lynch, del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, por su inmensa bondad y paciencia en la corrección y orientación científica durante la elaboración de este trabajo. Al Dr. Francisco Luis Franco, curador de la colección de Herpetología del Instituto Butantan, San Pablo, D. F., por su gran generosidad, esmero y dedicación en la corrección del presente estudio y en la orientación científica. A José Domingo Vega, excelente pintor, cuya mano plasmó las figuras esquemáticas de las especies tratadas en este trabajo. A mi nieto Juan P. Barrera Silva, por las labores de computación y artes gráficas. A Roxana Paula Franco y César García Peso por la eficiente colaboración en la identificación de especies y en la ardua labor de recuento de la escamación. A Fausto Gómez y Sarela Babilonia por su magnífica colaboración y esmerado mantenimiento de los bioterios.

Bibliografía

- Afranio, A.** 1929. Estudos sobre ophidios Neotrópicos XVII. Valor Sistemático de varias formas de ophidios Neotrópicos. Mem. Inst. Butantan. 1929 Tomo IV: 3-68.
- _____. 1929 Estudos sobre ophidios Neotrópicos XVIII. Lista remissiva dos ophidios da região neotrópica. Mem. Inst. Butantan. Tomo IV: 127-271.
- _____. 1929 Contribuição ao conhecimento dos ophidios do Brasil. IV. Lista remissiva dos ophidios do Brasil. Mem. Inst. Butantan. Tomo IV: 69-125.
- _____. 1931 Studies of Neotropical Ophidia "Ophidia of Colombia" Bull. A.I.A. March- 109. A Reprint by Jhon O. Truit Coral Gables, Florida- 1964.
- _____. 1932 Estudos sobre ophidios Neotrópicos XXIX. Novas notas sobre especies da Colombia. Mem. Inst. Butantan. Tomo VII: 3-21.
- _____. 1933-34. Estudos sobre ophidios Neotrópicos XXX. Novo genero e especies de Colubridos na fauna da Colombia. Mem. Inst. Butantan. Tomo VIII: 157-159.
- _____. 1935 Estudos sobre ophidios Neotrópicos XXXII. Apontamentos sobre a fauna da Colombia. Mem. Inst. Butantan. Tomo IX: 209-216.
- _____. 1935 Contribuição ao conhecimento dos ophidios do Brasil. 36 VIII. Lista remissiva dos ophidios do Brasil. Tomo X: 87-161.
- _____. 1978 Serpentes do Brasil Iconografía colorida. Edições Melhoramentos. Editora da Universidade de São Paulo. Tomo IV: 189-198.
- Atlas de Colombia Instituto Geográfico "Agustín Codazzi".** Quinta Edición 2002. Imprenta Nacional de Colombia.
- Beebe, W.** 1946. Field Notes on the snakes of Karatabo, British Guiana, and Caripito Venezuela. Cientific Contributions of the New York Zoological Society. New York.
- Cabrera L. A. & W. Abraham.** 1980. Biogeografía de América Latina. Segunda Edición. Editora Eva V. Chesnan. Caracas, Venezuela.
- Cadle, J. E.** 1987. Geographic distribution: Problems in Phylogeny and Zoogeography. In Snakes: Ecology and evolutionary Biology. Mac Graw-Hill Publishing Company p.p. 77-105.
- Camacho, J H.** 1990 La Selva en Colombia. En Selva y Futuro. Bogotá: El sello Editorial. p.p 13-40.
- Carrillo, N. & Icochea, J.** 1995. Lista Taxonómica Preliminar de los Reptiles vivientes del Perú. Publ. Mus. Hist. Nat. UNMSM (A) 49: 1-27 Lima 15 Sept.
- Chippaux, J. P.** 1986. Les Serpentes de la Guyana Francaise, Paris, Editions de "I'Orstom".
- Cunha, O. F. Nascimento.** 1978 Ofidios da Amazônia X- As cobras da Região leste do Pará Museo Paraensi Emilio Goeldi, Publicaciones Avulsas No. 31- Belem- Pará Brasil.
- _____. 1984 Ofidios da Amazônia. XXI- *Atractus* Zidoki no leste do Pará e notas sobre *A. alphonsehogeii* e *A. Schach (Ophidia, Colubridae)*. Bol. Mus. Pará. Emilio Goeldi. Sér. Zool., 1(2): 219-228.
- Da Cunha de Avila-Pires Saner C.T.** 1985. Os répteis da área de Carajas, Pará, Brasil (Testudines e Squamata). I Bol. Mus. Pará. Emilio Goeldi No. 40: 10-81.
- _____. 1993. Ofidios da Amazônia. As Cobras da região Peste do Pará Bol. Mus. Pará. Emilio Goeldi, nova ser, 2001., Belem. 9(1):
- Dixon, R. J.** 1979. Origin and distribution of the reptiles in Powland tropical rainforest of South America, in Duellman William E., (Ed.) 1979. The South American Herpetofauna: its origin, evolution and dispersal. Univ. Kansas Mus. Nat. Hist. Monogr. 7: 1-485
- _____, **Soini, P.** 1986. The Reptiles of the upper amazon Basin, Iquitos region, Perú. Milwaukee Public Museum, Milwaukee.
- Do Nascimento Paiva F., de Avila-Pires y da Cunha Rodrigues O.** 1987. Os reptéis da área de Carajas. Pará Brasil (Squamata) II. Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi. Serie Zoológica. 3(1): 3-63.
- _____, **Lima-Verde J. S.** 1989. Ocorrências dos Ofidios de Ambientes Florestais em enclaves de matas úndas do Ceará (*Ophidia-Colubridae*). Bol. Mus. Pará. Emilio Goeldi. Sér. Zool. 5(1): 95-99.
- Domínguez, A. C.** 1985. Amazonia colombiana. Biblioteca Banco Popular. Textos universitarios – Bogotá, Colombia
- Duellman, W.** 1978. The biology of an equatorial Herpetofauna in Amazonian Ecuador., Laurance – Kansas – Estados Unidos, University of Kansas Publications.
- Dunn, E. R.** 1944. Herpetología. Los géneros de Anfibios y Reptiles de Colombia Caldasia. 3(12).

- Goin, C. J., Goin, O. B. y G. R. Zug.** 1978. Introduction to Herpetology. W. H. Freeman and Company. New York p.p. 307-337.
- Gomes, F. J.** 1918. Contribuição para o conhecimento dos Ofidios do Brasil II Rev. Mus. Paulista São Paulo- Brasil. p.p. 505-527.
- . 1918b. Contribuição para o conhecimento dos Ofidios do Brasil III. *Ophidios* do Museu Paraensi. Mem. Inst. Butantan, São Paulo 1918b; **1**(1): 57-77.
- Herrera Castro, F.** 1998. Aspectos de la filogenia de las Serpientes suramericanas Toxinas y envenenamientos por animales, plantas y microorganismos. Primer Simposio colombiano de Toxicología. Medellín, Colombia, marzo 12, 13 y 14.
- Hoogmoed, S. M.** 1980. Revision of the Genus *Atractus* in Surinam, with the resurrection of two species (Colubridae, Reptilia) Notes on the Herpetofauna of Surinam VII. Zoogische Verhandelingen. Maart. Leiden. E.J. Brill. No. 175.
- . 1982. Nomenclatural problems relating to *Atractus trilineatus*, Wagler, 1828. Zoologische. Medelingen, Uitgegeven Door Het. Deel 56 n° 10-7 mei.
- Jan, G. & Sordelli F.** 1860-1881. Iconografía generale des ofhidiens. Milan V. 1-3.
- Lancini, A. R.** 1986. Serpientes de Venezuela, segunda edición, Ernesto Armitano (Editor).
- Medem, F.** 1986. Desarrollo de la Herpetología en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **13**(50): 149-199.
- Martins, M. & Oliveira, E.M.** 1993. The Snakes of the *genus Atractus* Wagler (*Reptilia: Squamata: Colubridae*) from de Manans region, central Amazonia, Brazil. Zoological Mededelingen **67**: 22-40
- . 1998. Natural history of snakes in forest of the Manans region central Amazonia, Brasil.- Herpetological Natural History Vol: 6 No. 2 p.p. 78-150.
- Nicéforo, María, Hno.** 1939. Contribución al estudio de la Ofidiología colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **3**: 91-94.
- . 1942. Los Ofidios de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **3**: 91-94.
- Pérez-Santos, C. & Moreno, G. A.** 1988. Ofidios de Colombia. Museo Regionale fi Scienze Naturali. Torino. Monografía VI.
- Peters, J. A., B. Orejas-Miranda.** 1986. Catalogue of the Neotropical Squamata, Estados Unidos, Library of Congress, Smithsonian Institution.
- Prado, Alcides.** 1939. Notas Ofiológicas. Observações sobre os ophidios da fauna amazônica, com descrição de um novo genero e especie. Mem. Inst. Butantan. Tomo XIII: 1-9
- . 1940. Notas Ofiológicas. Observações sobre serpentes da Colombia. Mem. Inst. Butantan. Tomo XIV: 1-5
- & **A.R. Hoge.** 1947. Notas Ofiológicas. 21-Observações sobre serpentes do Perú. Mem. Inst. Butantán. **20**: 283-296.
- Rangel, Ch. O. & col.** 1987. Colombia diversidad biótica I Editor: Inst. de Ciencias Naturales. U. Nal. de Colombia-Bogotá. Editora Guadalupe Ltda.: 277-325.
- Roze, A. J.** 1966. La Taxonomía y zoogeografía de los ofidios en Venezuela, Caracas, Venezuela, Ediciones de la Biblioteca Universidad Central de Venezuela.
- Savage, M.J.** 1960. A revision of the Ecuadorian Snakes of the colubrid genus *Atractus*. Miscellaneous publications Museum of zoology, University of Michigan. March 10 p.p. 5-47.
- Umaña Carrizosa, J.** 1990. La Selva Amazónica. En Selva y Futuro. Bogotá: Sello Editorial p.p. 49-114.

Recibido el 2 de abril de 2004

Aceptado para su publicación el 15 de junio de 2004



Los miembros de la Academia durante la sesión solemne realizada el 21 de abril en el paraninfo de la Academia de la Lengua. De izquierda a derecha y de abajo a arriba: *sentados*: José Luis Fernández, Clara Chamorro, Margarita Perea, Santiago Díaz Piedrahita, Hernando Dueñas, Moisés Wasserman, Mohamed Hassan, Alicia Dussan de Reichel, Ángela Camacho; *de pie primera fila*: Xavier Caicedo; Jaime Lesmes, Eduardo Brieva, Jorge Martínez, Julio Carrizosa, Dimas Malagón, Víctor Albis, Carlos Corredor, Gonzalo Correal, Diógenes Campos, Gonzalo Andrade, José Luis Villaveces, Inés Bernal, Jaime Rodríguez; *de pie segunda fila*: José A. Lozano, José María Rincón, Mariano Ospina, Lorenzo Panizzo, Gerardo Pérez, Alberto Morales, Enrique Forero, Jorge Arias, Gabriel Toro, Hernando Groot, Yu Takeuchi, Jaime George, Juan Manuel Díaz, Eduardo Posada, Jesús Eslava, Jairo Mojica.

PALABRAS PRONUNCIADAS POR EL PRESIDENTE DURANTE LA SESIÓN SOLEMNE ESTATUTARIA CELEBRADA EL 18 DE AGOSTO DE 2004

Es para mí un gran placer saludarlos y agradecerles su asistencia a esta sesión solemne y estatutaria de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Además de la inmensa satisfacción que tendremos de entregar el premio de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo y de nuestra Academia al joven matemático, Oscar Perdomo, tomará posesión la junta directiva, por un periodo de dos años. El señor secretario leerá el informe del periodo. Espero que Ustedes compartan con nosotros la impresión de que la Academia ha cumplido con su misión y se mantiene, ante la sociedad y el gobierno colombiano, como una institución respetable, seria, rigurosa y constructiva.

El ambiente nacional e internacional para la ciencia ha venido sufriendo transformaciones en los últimos años. La Academia no es ajena ni indiferente a esas transformaciones, y por el contrario ha asumido con seriedad la tarea de entenderlas. Quisiera hoy compartir con ustedes algunas de las reflexiones que nos han ocupado.

Nuevas Relaciones entre Ciencia y Sociedad

La preponderancia de los aspectos científicos y tecnológicos en las negociaciones en curso para el Tratado de Libre Comercio (TLC) es nueva en nuestro país, en el que estos temas tradicionalmente ocupaban el lugar de las

curiosidades y de las anécdotas, más que el de asuntos centrales de la sociedad. Es otro indicador de que las relaciones entre la ciencia y la sociedad atraviesan por un periodo de cambios profundos. Las Academias deben ser agentes principales para el entendimiento riguroso de los factores que condicionan los cambios, y tienen la obligación de participar en la construcción de las nuevas relaciones sociales que se deriven de él.

Durante las dos décadas anteriores, las sociedades industriales se transformaron en “sociedades del conocimiento”, en las cuáles la ciencia y la tecnología son el motor principal para los extraordinarios aumentos de productividad, crecimiento económico y bienestar. Infortunadamente ese crecimiento no es uniforme entre las naciones del planeta. Por el contrario, en lugar de que disminuyeran las diferencias, las brechas se han ampliado, y el peso relativo de las riquezas naturales como factor económico disminuyó, y cedió lugar a las riquezas generadas por el conocimiento y por su apropiación social.

Ese hecho por sí sólo ha atraído miradas críticas, de algunos sectores, sobre la ciencia. Pero eso se suma además a dudas fuertes, que han surgido en diversos círculos sociales, relacionadas con los impactos que algunos desarrollos recientes tienen, o podrían tener, sobre asuntos tan importantes como la genética, el origen mismo de la vida y su significado, y la influencia que las actividades humanas ejercen sobre el equilibrio planetario y sobre las demás especies.

El contexto político en el cuál se hace la ciencia también ha cambiado radicalmente en los años recientes. El fin de la guerra fría y la preponderancia de un poder, la explosión de sistemas de comunicación extraordinariamente eficientes e influyentes pero desigualmente distribuidos y dirigidos, el cambio que introdujo la globalización en las relaciones comerciales y culturales, y el surgimiento del terror como instrumento de lucha entre naciones y culturas, son hechos que indudablemente condicionan la forma como se genera y se comunica la ciencia. Quienes tenemos responsabilidades en su manejo, nacional e internacionalmente, no podemos sustraernos a la obligación de estudiar estos cambios y sugerir políticas que nos ayuden a usar las oportunidades que se presentan y a evitar los peligros.

Organismos internacionales multilaterales y no gubernamentales han iniciado algunos acercamientos al tema. Posiblemente el más importante es el del ICSU, Consejo Internacional de la Ciencia, que constituyó este año, por mandato de su asamblea general, un comité ad-hoc para revisión de sus políticas y estrategias. Este comité de 13

miembros, en el cuál nuestra academia tiene el honor de participar, sacará en el futuro cercano un documento de análisis y recomendaciones a la comunidad mundial. Se señalan en él algunos campos en los cuales han habido cambios fundamentales que afectan las relaciones entre la ciencia y la sociedad. En cada uno de éstos han surgido nuevas prácticas, y el sistema de manejo anteriormente establecido, se ha tornado insuficiente. Explicaré muy brevemente a qué me refiero.

1. Cambios en la movilidad y en los flujos de la ciencia y los científicos en el ámbito global. Cambios que constituyen una amenaza al principio de la “Universalidad de la Ciencia”.

Hay varios aspectos especialmente preocupantes en este tema. Uno, sin duda, es la movilidad disminuida de los científicos de países no desarrollados a los centros de producción de conocimiento. Este hecho se ve reflejado en la creciente dificultad para consecución de visas. Dificultad que se fundamenta a veces en una aparente defensa de las sociedades contra la amenaza del terrorismo, pero que evidentemente es también producto de una “defensa”, menos reconocida, contra migraciones no deseadas. Las restricciones están generando una ausencia selectiva de participantes del tercer mundo en los foros de difusión científica y de discusión de resultados, y también una ruptura entre la comunicación de pares.

La diferencia abismal en recursos para la investigación entre Norte y Sur ha producido otras amenazas como la fuga de cerebros, que tal vez justificada por las óptimas condiciones materiales del Norte, se constituye en un factor que retroalimenta el crecimiento de las brechas, y que no es ni conocido en toda su extensión, ni mucho menos compensado con los programas existentes de cooperación científica internacional.

Otro aspecto, no menos importante de este problema está relacionado con los crecientes costos de la información científica, que desbordan las capacidades económicas de las universidades y centros del sur, y hacen, que a pesar de que la información misma sigue estando fundamentada mayoritariamente en el principio de libre acceso y universalidad, en la práctica se constituye en un privilegio de los ricos, y en un factor más de inequidad.

2. Cambios en las formas de producción de conocimiento, que implican nuevas asociaciones y nuevos retos éticos.

Ha surgido con dinamismo una nueva modalidad de investigación que se conoce como “la segunda forma de hacer ciencia”. Esta se refiere a la ciencia que se hace

como respuesta a necesidades específicas sociales, estatales y hasta empresariales, más que como respuesta a interrogantes fundamentales sobre la naturaleza de objetos o procesos. Eso hace que los métodos, los recursos, los objetivos y hasta los resultados estén más en manos de esos agentes que de la comunidad científica (como sucede con la “primera forma de hacer ciencia”). Estos resultados pueden ser usados para tomar decisiones en las cuáles los promotores y auspiciadores de la investigación tienen intereses. La introducción de nuevas drogas y vacunas y los estudios de toxicidad de productos liberados al medio ambiente son apenas unos ejemplos entre muchos en los que decisiones de gran impacto están basadas en investigaciones que son financiadas por una parte interesada.

3. Cambios en la velocidad de innovación, que producen nuevos niveles de riesgo y de incertidumbre.

El riesgo y la falta de certidumbre son inherentes a todos los procesos de consecución del conocimiento. No existe decisión carente de riesgo. Sin embargo, el uso creciente de modelos como instrumentos para análisis de políticas, y que son auxiliares en la toma de decisiones de inmenso impacto, ha generado en grandes grupos de la sociedad inquietudes muy serias con respecto a su validación y al tiempo y a las oportunidades que han tenido para confrontarse con la realidad, y para que sean detectados posibles errores. Este hecho genera nuevas exigencias de estándares éticos en la interpretación de los resultados y en los cálculos de riesgo. Además, la participación de sectores sociales que tienen visiones distintas respecto a los niveles de incertidumbre aceptables para la toma de decisiones, produce también nuevas exigencias que no tenía el investigador científico antes.

4. Cambios en la dirección de las empresas científicas y en sus dueños, que generan demandas éticas nuevas en la “exigibilidad” (accountability) de los resultados.

Los puntos anteriores han generado una demanda creciente para la participación ciudadana en la definición de objetivos y propósitos de la ciencia, y también en las exigencias de la sociedad civil sobre los resultados. Esa demanda ha llevado a nuevas formas participativas en la

investigación científica, que incluyen generación de agendas alternativas por parte de la sociedad, jurados ciudadanos que intervienen en los grandes proyectos, y en general deliberaciones públicas que influyen en las agencias nacionales y multilaterales y en los bancos internacionales que financian la investigación.

5. Cambios en la forma como se comunican los resultados.

Por un lado la comunicación científica se ha visto constreñida por restricciones que han impuesto los sistemas de propiedad intelectual, y ya no es tan libre y universal como antes. Por otro lado, el desborde de los medios y el crecimiento exponencial de los sistemas de comunicación electrónica le han inferido un gran vigor a las exigencias de participación por parte de las sociedades civiles, que no asumen ya resultados sin una interpretación crítica e interesada. Infortunadamente esa avalancha de información ha debilitado la importancia del sistema de revisión, y los medios electrónicos masivos son penetrados por informes de seudo-investigaciones y por teorías sin fundamento en la evidencia, que conquistan audiencias poco expertas, pero con influencia creciente.

Es imposible hacer acá, en estas pocas páginas, un análisis profundo de los cambios antes mencionados, menos aún recomendar acciones que deban tomar las comunidades científicas y las Academias. La intención de estas muy breves palabras es plantear el tema y señalar en forma abierta que nos enfrentamos a cambios muy serios en la forma de hacer ciencia. Si bien hay que reconocer que muchos de estos cambios son ricos en promesas de progreso para la humanidad, se debe reconocer también que algunos de ellos pueden generar amenazas, que son especialmente serias para la comunidad de investigadores del tercer mundo. Pretendo con estas palabras hacer un llamado, para que respondamos como Nación a esos cambios en forma sensata y sopesada, aprovechando las inmensas ventajas que ofrecen. Pero por supuesto al mismo tiempo con la cautela y la osadía necesarias para no quedar, por fuera de esta gran empresa que será la ciencia del siglo XXI.

Moisés Wasserman Lerner

INFORME PRESENTADO POR EL SECRETARIO DE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS DURANTE EL AÑO ACADÉMICO 2003-2004

SESIONES

a.- Junta Directiva

La Junta Directiva tomó las decisiones políticas y administrativas necesarias para el funcionamiento de la Academia, en once reuniones ordinarias y una extraordinaria.

Se firmó el acta de liquidación del contrato No. 27 suscrito con la Universidad Nacional. Está en proceso la liquidación del contrato No. 28.

Se realizó un contrato con la ingeniera Maritza Barandica de la firma Construcciones Barandica, para realizar el levantamiento y conocer el estado de las estructuras e instalaciones hidráulicas, sanitarias y eléctricas, en la edificación que alojará la Biblioteca "Luis López de Mesa".

Se realizó un Convenio de Cooperación con la Universidad del Quindío para llevar a cabo actividades conjuntas. En el marco de este convenio se realizará el proyecto: "Enciclopedia de Desastres Naturales Históricos de Colombia" dirigido por el académico Don Armando Espinosa. Este proyecto quiere compilar y dar a la luz toda la información conocida sobre los desastres naturales históricos de Colombia. Una parte ya ha sido publicada (Historia Sísmica de Colombia 1550-1830).

La Academia Colombiana de Ciencias firmó en el mes de diciembre un contrato con Universia Colombia S.A. El académico Don Jorge Martínez Collantes dirigió el grupo que tuvo a su cargo desarrollar, al interior del portal universia.com, un subportal con hipervínculos y textos que permita a los aspirantes a ingresar a la educación superior y a sus familiares, conocer información completa y actualizada de las opciones y oportunidades que le brindan tanto el sector público como el privado.

El 10 de Junio de 2004 se firmó un contrato de cooperación con CONSERVACIÓN INTERNACIONAL - COLOMBIA para desarrollar el proyecto "Determinación de la localización y magnitud de cambio en la cobertura de bosques en Colombia en la década de los 1990 y comienzos del 2000".

b.- Sesiones ordinarias

En las reuniones ordinarias celebradas, en su mayoría, los terceros miércoles de cada mes, se dictaron las siguientes conferencias:

Septiembre 17: Don Guillermo Páramo, "Frontera y cultura, mito y medio ambiente"

Octubre 22: Don José María Rincón, "Desarrollo de condicionadores orgánicos para la agricultura sostenible a partir de carbón"

Noviembre 19: Don José Luis Fernández, "Ceibas, macondos y zapatillos. Nuevos descubrimientos en las bombacáceas de Colombia"

Marzo 17: Don Humberto Rodríguez Murcia, "Últimos estudios desarrollados por el grupo de la Academia sobre gases de efecto invernadero".

Abril 28: Presentación a cargo del Subdirector de Colciencias, Don Felipe García sobre políticas de la institución.

Junio 16: Don José Luis Fernández, "Panorama de la familia Cactaceae en Colombia y aportes a la Taxonomía y Biogeografía del género Melocactus"

Junio 23: Charla a cargo del Viceministro de Ambiente Doctor Don Juan Pablo Bonilla Arboleda, "Política Ambiental del Gobierno Colombiano"

En las sesiones ordinarias de Febrero 18 y Mayo 26 se discutieron y aprobaron los nuevos estatutos de la Academia. La modificación más importante fue la eliminación del requisito de residir en Bogotá para poder ser elegido como miembro de número.

En la sesión del 28 de Julio, de acuerdo con los estatutos, se eligió la Junta Directiva para el periodo 2004-2006, que quedó constituida así:

PRESIDENTE	Don Moisés Wasserman Lerner
VICEPRESIDENTE	Don Jaime Rodríguez Lara
SECRETARIO	Don José A. Lozano Iriarte
TESORERO	Doña Inés Bernal de Ramírez
DIRECTOR DE PUBLICACIONES	Don Santiago Díaz Piedrahita
DIRECTOR DE BIBLIOTECA	Don Diógenes Campos Romero
EX PRESIDENTE	Don Jorge Arias de Greiff

c. Sesiones solemnes

Durante la sesión Solemne Estatutaria del 21 de agosto de 2003, Don Santiago Díaz Piedrahita presentó el estudio de fondo titulado: “El observatorio Astronómico 200 años de historia”.

En sesiones solemnes se posesionaron siete Académicos Correspondientes, quienes presentaron los respectivos trabajos científicos preparados especialmente para la ocasión:

Septiembre 10: Don Jaime Ricardo Cantera Kintz, “La gestión ambiental de espacios acuáticos, desafío a la investigación cooperativa y a la planeación interinstitucional: el caso del río de la Plata y su frente marítimo”

Octubre 29: Don Juan Manuel Díaz Merlano, “Esquemas espaciales de zonación ecológica y geomorfología de las lagunas arrecifales de los atolones y complejos arrecifales de un archipiélago oceánico del Caribe: San Andrés y Providencia (Colombia)”

Noviembre 26: Don Roberto Martínez Martínez, “Las teorías reduccionistas versus la complejidad o las interacciones fundamentales”

Febrero 11: Don Germán Moreno Ruiz, “Utilización de la diversidad genética en la producción de variedades mejoradas”

Febrero 25: Don Alex Enrique Bustillo, “El papel del control biológico en el manejo integrado de la broca del café, *Hypothenemus hampei* Ferrari (Coleoptera: Scolytidae).”

Marzo 10: Doña Elizabeth Hodson de Jaramillo, “Plantas transgénicas con resistencia a virus”.

Mayo 12: Don Gabriel Cadena Gómez, “Desarrollos científicos de CENICAFE en la última década”.

Creación y consolidación del Capítulo de Antioquia

En sesión solemne extraordinaria celebrada en la ciudad de Medellín los días 12 y 13 de noviembre se creó el capítulo de Antioquia y se posesionaron cuatro nuevos miembros correspondientes quienes presentaron sus respectivos trabajos de posesión así:

12 de noviembre

Lugar: Aula Máxima - Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Don Jorge Iván Cossio Betancur, “Algunos aspectos del análisis no lineal”

Don Germán Poveda Jaramillo, “El clima de Colombia: desde la escala decadal hasta la escala diaria”.

13 de noviembre

Lugar: Bloque 6 Aula 35 Universidad de Antioquia

Don Alvaro L. Morales Aramburo, “La ciencia de simular propiedades de materiales”

Don William A. Ponce Gutiérrez, “El principio de Maupertuis. un ensayo para una academia”.

En las horas de la tarde el 13 de noviembre, en sesión solemne que tuvo lugar en el Paraninfo de la Universidad de Antioquia, se entregaron diplomas a los nuevos miembros correspondientes.

El 20 de mayo se realizó la sesión extraordinaria en la cual la Academia Colombiana de Ciencias fue la anfitriona del Colegio Máximo de Academias y Don Armando Espinosa presentó la conferencia titulada: “Sismicidad histórica de Colombia”

En sesión solemne extraordinaria, realizada el 21 de abril fue entregado el diploma de miembro honorario a Don Mohamed Hassan, quien dictó la conferencia “Scientific capacity building in developing countries”. Como homenaje póstumo se entregó a Doña Alicia Sánchez vda. de Mora el diploma de miembro honorario de Don Luis Eduardo Mora Osejo.

Aprovechando la visita del Dr. Mohamed Hassan, director ejecutivo de la TWAS y presidente de la Academia de Ciencias de Africa, en la semana del 20 al 25 de abril se programaron entre otras actividades: reunión con la Directora y los jefes de programas de Colciencias, reunión con el Director de la Fundación Gaia; visitas al Centro Internacional de Física, al Instituto de Inmunología, a MALOKA y a la Universidad Nacional, a las minas de sal en Zipaquirá y al centro histórico de Bogotá.

Participación en actividades nacionales e internacionales

La Academia Colombiana de Ciencias continuó su afiliación y participación en el Consejo Internacional para la Ciencia (ICSU), el Programa Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP), La Evaluación Mundial de Ecosistemas del Milenio (M.A.) la Red de Derechos Humanos de las Academias de Ciencias y Sociedades Científicas, la Federación Latinoamericana de Academias de Ciencias (FELAC), el Comité sobre Ciencia y Tecnología en países en Desarrollo y Red Internacional de Biociencias (COSTED-IBN), la Academia de Ciencias del Tercer Mun-

do (TWAS), la Comunidad Científica del Caribe (CCC), la Fundación Internacional para la Ciencia (IFS), la Unión Internacional para la Investigación del Cuaternario (INQUA), la Unión Internacional de Historia y Filosofía de la Ciencia (IUHPS), el Consejo Internacional de Ciencias (ICS), el Panel Internacional de Academias de Ciencias (IAP) y la Red Interamericana de Academias de Ciencias (IANAS).

A nivel nacional es miembro del Colegio Máximo de Academias, de la Fundación Pro- Sierra Nevada de Santa Marta, miembro de la Junta Directiva de la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia, es aliado estratégico del Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología (OcyT), miembro afiliado de la Asociación Colombiana de Facultades de Ciencias (ACOFACIEN) y preside el Comité Directivo de la Red Colombiana de Formación Ambiental (RCFA).

La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales cuenta con comités y grupos de trabajo internos, participa en comités y grupos externos a través del Presidente o sus delegados. Estos y otros grupos permanentes u ocasionales propenden por el mejoramiento del nivel de la investigación y de la calidad de la enseñanza de las ciencias y participan en el cumplimiento de su función como órgano consultivo del gobierno.

La Academia participó a través de su presidente, Don Moisés Wasserman, o sus delegados en numerosos eventos y reuniones, entre otros:

VII Congreso de Investigación - La ciencia al servicio del País, de la Universidad Javeriana en donde dictó (el 27 de agosto) la conferencia: "Investigación: la espina dorsal de la Universidad".

Conferencia internacional sobre "La Internacionalización de la Ciencia y la Tecnología y su Integración Regional" que organizó la ACAC (4 de septiembre).

El 13 de septiembre en la cuarta sesión de la Cátedra Manuel Ancizar, que tuvo como tema central "Ciencia, medicina y ética", dictó la conferencia "Reflexiones sobre las bases cognitivas de la ética".

Asamblea de TWNSO / TWAS (del 13 al 21 de octubre) que se realizó en Beijing-China. Es de destacar el interés y la participación del gobierno chino en este evento. La reunión fue abierta por el Presidente de China. El ministro de Ciencia y Tecnología asistió a la asamblea e informó que durante los últimos cinco años el porcentaje dedicado a Ciencia y Tecnología pasó del 0.7 al 1.5% del PIB.

Participó en el Comité ad-hoc de la ICSU sobre Ciencia Tecnología y Sociedad, del cual es miembro: En París del 29 de octubre al 1 de noviembre de 2003 y entre el 25 y 28 de febrero de 2004; en México entre el 1 y el 4 de diciembre. Este comité está próximo a presentar su informe final.

En la reunión del mes de diciembre en México la Academia avaló las declaraciones que presentó el IAP (el texto de las cinco declaraciones se publicó en la GACETA) y copia de ellas se envió a varias entidades del gobierno colombiano. Hubo dos simposios simultáneos: uno sobre agua y otro sobre educación, asistió al de educación. Dictó la conferencia "La libre circulación de científicos: presentación de caso". En la que propuso procurar pasar del eslogan a la realidad. Incluyó la proposición de hacer un estudio sobre el impacto económico que tiene el "brain-drain" o fuga de cerebros sobre los países en desarrollo. Esta propuesta fue acogida por el pleno. Se aprobó la propuesta de crear la Red Interamericana de Academias y se encargó al Comité Organizador producir una propuesta de estatutos. En este comité participó la Academia Colombiana de Ciencias.

Las Academias de América firmaron en México una carta de intención de crear la Asociación Interamericana de Academias de Ciencias. La Comisión de Estatutos, a la que perteneció, trabajó por Internet y produjo un documento borrador que se aprobó durante la reunión del mes de mayo, en Santiago de Chile.

Participó en el Comité de Ciencia y Política con la ACAC.

La Academia, respaldó la comunicación de apoyo a la creación de IPSO (Organización Científica Israelí-Palestina).

Trabaja con el Colegio Máximo de Academias en una propuesta para impulsar la ciencia y tecnología en el país con motivo de los 200 años de la independencia el 20 de julio del 2010.

Participó en el Foro sobre Ciencia y Tecnología realizado, el 1 de junio, en el recinto de la plenaria del Senado de la República (Capitolio Nacional).

Envío una comunicación conjunta con la ACAC sobre la propuesta de modificación de la Ley 29 del 90.

Escribió a la oficina de Derechos Humanos para que intervinieran en el caso de la propuesta de la Secretaría de Estado de los Estados Unidos de restringir la colaboración de artículos científicos de autores de países con embargo. La restricción cayó, seguramente, por la presión conjunta de muchas entidades.

Participó, el 7 de mayo, en “La Tertulia de Crecimiento Económico” sobre los temas de ciencia, tecnología e innovación, realizada en la Casa de Nariño,

Dentro de sus actividades como Secretario Don José A. Lozano participó en la reunión semestral de la Asociación Colombiana de Facultades de Ciencias, que se realizó en Medellín, los días 15, 16 y 17 de octubre.

Asistió a la Asamblea general de la Comunidad Científica del Caribe, realizada en la ciudad de Panamá entre el 20 y 21 de noviembre de 2003.

Participó, en Medellín, en la primera reunión que programaron los Académicos que integran el capítulo de Antioquía

El 7 de mayo se llevó a cabo la reunión de creación del InterAmerican Net of Academies of Sciences (IANAS). La Academia participa en los proyectos de Educación representada por Don José A. Lozano y en el proyecto de Agua, representada por Don Gabriel Roldán, que serán los primeros en los que trabajará la Red. Nuestra Academia propuso como futuros proyectos IANSA, la Sismicidad Histórica de Sudamérica y TROPICANDES.

Entre otras dictó, el 30 de abril, en Tunja, la conferencia “Cambio global y su influencia en los Andes Tropicales (proyecto TROPICANDES)”, en la Fundación Universitaria Juan de Castellanos.

Asistió a la reunión del 17 de junio, convocada por el Instituto Humboldt con el fin de hacer la presentación de la iniciativa Evaluación de Ecosistemas del Milenio y del avance de la propuesta sub global para el eje cafetero.

La Academia participó el 20 de abril y el 13 de mayo en el Taller de Expertos para la revisión de los desafíos Ambientales en Colombia y el 29 de abril en la reunión del comité nacional de humedales que convocó el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Participó en la reunión del 18 de mayo, convocada por Colciencias, con el objeto de sentar las bases para un proceso de definición concertada de prioridades de investigación sobre biodiversidad.

Asistió el 13 de mayo, el 17 y 18 de junio a los talleres del proyecto “Autoevaluación de Necesidades de Fortalecimiento de Capacidad para el manejo Ambiental global”, en cumplimiento de los compromisos adquiridos por Colombia con la convención marco de cambio climático y las convenciones de biodiversidad-bioseguridad y desertificación.

Don José Luis Fernández, participó como conferencista magistral en el IV Congreso Mexicano y III Latinoamericano y del Caribe de Cactáceas y Suculentas, que se realizó en Guadalajara del 3 al 9 de mayo.

Don Hernando Dueñas recibió del Instituto Cubano de Petróleos una carta de agradecimiento porque su trabajo permitió abrir una nueva provincia petrolera en Cuba.

Doña Inés Bernal participa en las reuniones del Comité de Evaluación de la “Oferta Bibliográfica de FUNDALECTURA” y representa a la Academia en el Comité “Colombia Foods”,

Don Gonzalo Correal participó en el trabajo de investigación “Exploraciones arqueológicas en la inspección de Policía de Pubenza, municipio de Tocaima-Cundinamarca.

Don Germán Poveda representará a la Academia en el programa del IAP de fortalecimiento de la ciencia en la región Amazónica “Strengthening Science - Based Decision Making in the Amazon Region”.

Colaboró con el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en la reconstrucción del archivo histórico de los parques de Iguaque y Pisba y de la Reserva nacional Natural Nukak.

Se apoyó la realización de los siguientes eventos:

- VI Seminario Internacional Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, del 9 al 11 de Octubre de 2003.
- XIII Congreso Colombiano de Química del 15 al 17 de octubre de 2003.
- XXXI Congreso de la Sociedad Colombiana de Entomología.
- VI Semana Técnica de Geología e Ingeniería Geológica, del 19 al 23 de abril de 2004.
- Encuentro ALTENCOA -2004. (Álgebra, Teoría de Números, Combinatoria y Aplicaciones), del 19 al 23 de julio de 2004.
- VII Seminario Internacional del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, que se realizará entre el 29 de septiembre y el primero de octubre de 2004, en Bucaramanga.
- Algunas de las reuniones del Consejo Profesional de Geología y de la Red Colombiana de Formación Ambiental se programan en las instalaciones de la Academia.

- Se cofinanció la impresión de un número de la Revista de Educación en Ciencias.

Comités

Durante este año las reuniones de los comités se han reanudado. La coordinación de estos comités quedó a cargo de Don Humberto Rodríguez el de Física; Don José María Rincón el de Química; Don Jaime Lesmes el de Matemáticas, Don Luis Alejandro Barrera el de Ciencias Bioquímicas y Don Julio Carrizosa el de Asuntos Ambientales.

El Comité de Educación participó en la discusión sobre los estándares de ciencias naturales para la educación pre-escolar, básica y media. A través de la Asociación de Facultades de Ciencias, viene participando activamente en las discusiones sobre competencias y la elaboración de los exámenes (ECAES) para programas de educación superior en ciencias, especialmente en Geología y Química.

El Comité de Asuntos Ambientales asumió el proceso de evaluación de los documentos producidos por el Millenium Ecosystem.

Con el liderazgo del comité de Bioquímica, todos los comités están participando en la preparación para el foro sobre el TLC que auspiciará el Colegio Máximo de Academias, en la última semana de septiembre.

DEFUNCIONES

La Academia lamenta el fallecimiento de los académicos correspondientes Don Josué Quintero Quintero; Don José Fernando Escobar y Don Jean Tricard quienes fallecieron en el transcurso del mes de enero.

Cuando se preparaba un homenaje en su honor, para su posesión como Miembro Honorario, falleció en la ciudad de Bogotá, el 11 de marzo, Don Luis Eduardo Mora Osejo, quien ocupó el cargo de Presidente durante veinte años continuos.

PREMIOS

Con el objetivo de premiar la consagración de una vida a la investigación científica y de promover las vocaciones de jóvenes científicos, se convocó a concurso nacional para los premios. Premio a la Obra Integral de un Científico y Premio Academia de Ciencias del Tercer Mundo (TWAS) para científicos jóvenes colombianos.

Estos premios fueron entregados en la Sesión Solemne, realizada el 21 de agosto, a Doña Angela Restrepo Moreno de la Corporación para Investigaciones Biológicas,

el Premio a la Obra Integral de un Científico y a Don Jesús Olivero Verbel, profesor de la Universidad de Cartagena, el Premio Academia de Ciencias del Tercer Mundo (TWAS) para científicos jóvenes colombianos en el área de Química. este último, de acuerdo con las normas establecidas por la TWAS.

BIBLIOTECA LUIS LÓPEZ DE MESA

La Academia mantiene su biblioteca "Luis López de Mesa". Sus volúmenes se incrementan principalmente a través del canje que recibe por las publicaciones propias. La Academia adquiere, por compra, únicamente tres títulos de revistas científicas. Se pueden consultar en la página electrónica de la Academia 4.557 registros de libros y las referencias bibliográficas de los 1354 artículos publicados hasta ahora en la Revista de la Academia.

Se adquirió un lector de microfichas.

La Academia participó del 15 al 23 de octubre, con un Stand, en EXPOCIENCIA-EXPOTECNOLOGÍA en donde expusieron las colecciones de libros y la Revista de la Academia.

PUBLICACIONES

Don Santiago Díaz es el Director de Publicaciones de la Academia. Se publicaron y distribuyeron los números 104, 105, 106 y 107 de la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

La lista de canje cuenta con 497 direcciones así: 160 en Colombia, 188 en América y 149 en Europa y resto del mundo.

Se publicó en la colección Jorge Alvarez Lleras, el libro "Propagación de ondas sísmicas y atenuación de ondas coda en el territorio colombiano", de Carlos Vargas Jiménez.

En formato electrónico se publicó "Historia Sísmica de Colombia 1550-1830", del académico Don Armando Espinosa

Gaceta

Se publicaron 8 números sencillos y 2 dobles del órgano divulgativo "Gaceta", editada por Don Víctor Albis, quien además, supervisa la página electrónica de la Academia que contiene la información de la Biblioteca, seis libros en versión digital y otros datos y noticias de la Academia.

José A. Lozano
Secretario