

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXV

DICIEMBRE DE 2001

NÚMERO 97

DIRECTOR DE LA REVISTA: SANTIAGO DÍAZ-PJEDRAHITA



CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
Botánica (Botany)		- Los elementos orbitales postnewtonianos de la solución analítica de Damour & Duruelle para el problema relativista de los dos cuerpos. (The post-Newtonian orbital elements of the analytical solution due to Damour & Duruelle in order to resolve the differential of the two body problem). <i>José Gregorio Portilla & Juan Manuel Tejeiro</i>	537
- <i>Acalypha infesta</i> Poepp. (Euphorbiaceae) novedad para la flora colombiana. (<i>Acalypha infesta</i> Poepp. (Euphorbiaceae) a novelty in the Colombian flora). <i>José María Cardiel</i>	463	Matemáticas (Mathematics)	
- <i>Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae</i> V. Novedades en <i>Pseudobombax</i> Dugand y sinopsis de las especies colombianas. (<i>Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae</i> V. Taxonomic novelties in <i>Pseudobombax</i> Dugand and a synopsis of the Colombian species). <i>José Luis Fernández-Alonso</i>	467	- Modular sums of squares. (Sumas modulares de cuadrados). <i>Pablo A. Acosta Solarte & Víctor S. Albis</i>	553
- Dos nuevas especies de <i>Schwartzia</i> (Marcgraviaceae) de Colombia. (Two new species of <i>Schwartzia</i> (Marcgraviaceae) from Colombia). <i>Diego Giraldo-Cañas</i>	477	Química (Chemistry)	
Ciencias de la Tierra (Earth Sciences)		- Influencia de la cantidad de óxido de titanio sobre la textura y estructura de soportes de sílica para la fabricación de catalizadores para la polimerización de olefinas. (Influence of the amount of titanium oxide on the texture and structure of silica supports for the manufacture of catalyzers for polymerization of alkanes) <i>Rodolfo Alejandro Castillo Córdoba</i>	563
- El suelo: maravilloso teatro de la vida. (Soil: wonderful theatre of Life). <i>Clara Chamorro Bello</i>	483	- Ambrosinosterol: un nuevo 5 α , 8 α - epidioxiesterol citotóxico aislado de la esponja marina <i>Axinyssa ambrosia</i> . (Ambrosinosterol: a new 5 α , 8 α - epidioxiesterol citotóxico isolated from the marine sponge <i>Axinyssa ambrosia</i>). <i>Natalia V. Petrichcheva, Carmenza Duque & Yoshinori Fujimoto</i>	569
Ecología (Ecology)		Zoología (Zoology)	
- Ecología de las macroalgas del plano arenoso contiguo al talud de los sistemas coralinos con énfasis en el Caribe. (Ecology of macroalgae from the sand plain contiguous to the reef slope of the coralline systems, with emphasis in the Caribbean sea). <i>Germán Bula-Meyer</i>	495	- Patterns of sponge (Porifera, Desmospongiae) distribution in remote, oceanic reef complexes of the southwestern Caribbean (Patrones de la distribución de esponjas [Porifera, Desmospongiae] en complejos de arrecifes del Caribe sudoccidental). <i>Sven Zea</i>	579
- Design of a sampling network for an estuary in the Colombian Caribbean. (Diseño de una red de muestreo para un estuario en el Caribe colombiano). <i>Ramón Giraldo Henao, Néstor Méndez & David Ospina</i>	509	Notas (Notes)	
- Un nuevo modelo estratégico y otras perspectivas sobre el manejo de recursos bióticos tropicales en zonas de conservación y desarrollo. (A new strategic model for management of tropical biotic resources from integrated and development areas) <i>John James Pipoly III</i>	519	- Investigación en salud a principios del siglo XXI. Las limitaciones de la "tecnología apropiada". (Health investigation in XXI Century.) <i>Moisés Wassermann</i>	593
Física (Physics)		Vida Académica (Academic Life)	603
- Átomo alcalino unidimensional forzado por un tren de Dirac. (Highly excited alkali atom kicked for a Dirac Train). <i>Arcesio Castañeda & Diógenes Campos</i>	529	Índice general de volumen XXV, Año 2001 (General Index of volume XXV).....	605
		Índice de autores (Author index)	607
		Constitución de la Academia (Members of the Academy)	609

ACALYPHA INFESTA POEPP. (EUPHORBIACEAE), NOVEDAD PARA LA FLORA DE COLOMBIA

por

José María Cardiel ¹

Resumen

Cardiel, J.M. : *Acalypha infesta* poepp. (Euphorbiaceae), novedad para la flora de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **25**(97): 463-465, 2001. ISSN 0370-3908.

Se registra una nueva especie de *Acalypha* L. para la flora de Colombia. *A. infesta* Poepp., conocida hasta ahora sólo de Perú y Ecuador. Se comentan las principales diferencias con las especies afines y se incluye también una clave de identificación.

Palabras clave: *Acalypha*, Euphorbiaceae, Colombia, Neotrópico.

Abstract

A new species of *Acalypha* L. from the Colombian flora is reported. *A. infesta* Poepp. known only from Ecuador and Peru. Comments on the systematics of related species are included and a key is also provided.

Key words: *Acalypha*, Euphorbiaceae, Colombia, Neotropics.

Introducción

En el volumen 15 de la *Flora de Colombia*, dedicado al género *Acalypha* (Cardiel 1995b) se reconocen 24 especies para este país. Desde entonces, he continuado la revisión del género para Venezuela (Cardiel 1999), Guayanas y Ecuador (Cardiel 2000); además, hemos estudiado nuevo material colombiano. Un resultado de este trabajo ha sido el hallazgo de una especie de *Acalypha* desconocida hasta ahora para Colombia, *A. infesta* Poepp.

Acalypha infesta Poepp. es una especie andina muy poco conocida. Fue descrita para Perú y está incluida en la Flora de este país (Macbride 1951). Pax & Hoffmann (1924) mencionan una colección de las proximidades de Quito, en Ecuador. No existen citas posteriores. Recientemente, al revisar el género para este país andino hemos encontrado nuevas colecciones ecuatorianas de las provincias de Bolívar y Chimborazo, entre 1000 y 2500 m de altitud. Encontramos también tres colecciones colombianas, en los departamentos de Cauca y Nariño, entre 500 y

1900 m de altitud. Con ello que se amplia de forma considerable el área de distribución conocida de esta especie.

Acalypha infesta Poepp. in Poepp. & Endl., Nov. Gen. Sp. Pl. 3: 22 (1841). Figura 1.

Tipo: PERÚ, "crescit in cultis ad Cuchero", Poeppig 1701 (W!).

Ricinocarpus infestus (Poepp.) Kuntze, Revis. Gen. Pl. 2: 617 (1891).

Acalypha infestans Müll. Arg. var. *stenoloba* Müll. Arg. Linnæa 34: 23 (1865).

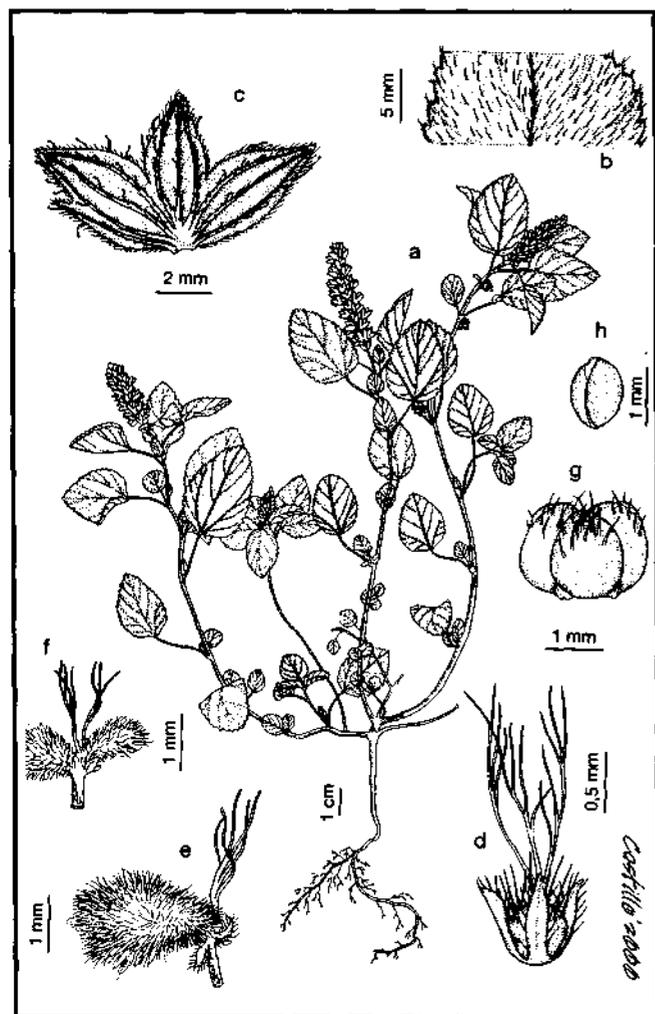


Figura 1. *Acalypha infesta* Poepp. A, hábito; B, detalle del haz foliar; C, bráctea de la flor femenina; D, flor femenina; E y F, flores alomórficas; G, cápsula; H, semilla. A, B, C, D, G, y H de Asplund 15443(S); E y F de Asplund 20331(S).

Hierba anual o sufrutice de hasta 50 cm de altura, monoica; ramas jóvenes densamente pubescentes o velutino-pubescentes, glabrescentes, con pelos curvados, a veces mezclados con pelos glandulíferos. Estípulas diminutas, de 1–2 mm de largo, lanceoladas o triangular-lanceoladas, ciliadas, caducas. Peciolos (0.5–) 1–2 (–3) cm de largo, con indumento similar al de las ramas jóvenes. Láminas foliares de (1.5–) 2–3.5 (–5) × (1–) 1.5–2.5 (–4) cm, de ovadas a ovado-lanceoladas, a veces subrómicas, membranáceas; base de redondeada a obtusa, a veces subtruncada; ápice de obtuso a subagudo; margen aserrado, dientes profundos y obtusos; haz de hispídulo a subglabro, con pelos de ca. 1 mm de largo y pelos curvados en los nervios; envés de laxamente pubescente a subglabro; nerviación palmada, con (3)–5 nervios basales y 2–3 pares de nervios secundarios. Inflorescencias generalmente unisexuales, espiciformes. Inflorescencias masculinas axilares, situadas en los nodos inferiores, inconspicuas, de 5–7 mm de largo; pedúnculos de 3–5 mm de largo; flores en glomérulos terminales; brácteas diminutas. Inflorescencias femeninas axilares y terminales, las terminales mucho más largas, de hasta 6 cm de largo, sésiles o con pedúnculos de hasta 1.5 cm de largo; brácteas inconspicuas en la antesis, acrescentes y foliáceas en el fruto, de 5–8 mm de largo, laxamente pubescentes, con pelos cortos la mayoría en el margen, y pelos glandulíferos de hasta 1 mm de largo, margen con 3–6 lóbulos oblongos o triangular-lanceolados, agudos u obtusos, de ca. 2/3 de la longitud de la bráctea; flores 1–2 en cada bráctea. Flores masculinas diminutas, inconspicuas. Flores femeninas sésiles; cáliz con 3 sépalos lanceolados de ca. 1 mm de largo, ciliados; ovario de 0.5–0.8 mm de diámetro, con pelos hialinos aplanados de ca. 0.5 mm de largo; estilos filiformes, de hasta 4 mm de largo, libres, con 2–4 ramas cada uno, glabros. Cápsulas de ca. 2 mm de diámetro, hispidas o hispídulas, con pelos hialinos aplanados, cocas carinadas; semillas de ca. 1.2 mm de largo, ovoides, picudas en el ápice, con diminutas foveolas; carúncula obsoleta. Con frecuencia aparecen flores alomórficas, con 1–2 carpelos densamente lanosos.

Especímenes estudiados

COLOMBIA. CAUCA: Municipio de Bordo, km 118. Carretera Panamericana. Patía, 500 m, 30-V-1984, *De Benavides 4846* (COL, PSO). NARIÑO: Municipio de Consacá - Bomboná, 1900 m, 3-III-1985, *De Benavides 5105* (COL, PSO); Municipio de Consacá, Corregimiento de Bomboná, alrededores población, 1500 m, 22-X-1989, *Ramírez 1757* (COL, PSO).

ECUADOR. PICHINCHA: Perucho, 2000 m, 15-II-1955, *Asplund 15443* (S). BOLÍVAR: Atio de Telimbela, 1500 m, 18-XI-1943, *Acosta-Solis 6870* (F). CHIMBORAZO: Between Huigra and Naranjapata, 600-1200 m, 17-VII-1923, *Hitchcock 20658* (GH, NY, US); Huigra, 17-VI-1956, *Asplund 20331* (S); Sibambe, canyon of río Sabambe, 2460-2550, 28-I-1945, *Fosberg 22627* (NY, US). PROVINCIA DESCONOCIDA: Vicinity of Ventura, X-1918, *Rose & Rose 23511* (GH, NY, US).

Discusión

El número de especies herbáceas de *Acalypha* es muy escaso en el trópico americano y con frecuencia son plantas de carácter adventicio o arvense (Cardiel 1995a). *Acalypha infesta* sólo podría confundirse en Colombia con *Acalypha arvensis* Poepp. o con *A. alopecuroides* Jacq., especies de amplia distribución en el Neotrópico. Con ellas comparte el hábito herbáceo o sufruticoso y las inflorescencias femeninas elipsoides o cilíndricas, densifloras, que no dejan ver el eje. *Acalypha infesta* se puede diferenciar con facilidad por presentar las brácteas femeninas con dientes triangulares, sin las largas aristas que caracterizan a las otras dos especies mencionadas.

La siguiente clave permite identificar las tres especies citadas y completa la clave del género *Acalypha* publicada en la correspondiente monografía de la Flora de Colombia (Cardiel 1995b).

1. Brácteas femeninas con dientes triangulares, sin arista *A. infesta*
- 1'. Brácteas femeninas con dientes terminados en una larga arista 2

2. Ramas jóvenes y hojas sin pelos glandulíferos; lámina foliar con ápice agudo; estilos ramificados *A. arvensis*
- 2'. Ramas jóvenes y hojas con pelos glandulíferos; lámina foliar con ápice acuminado; estilos no ramificados *A. alopecuroides*

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado gracias a la concesión de una beca postdoctoral de la Comunidad de Madrid. También se ha beneficiado de cierta ayuda por parte del proyecto *Flora Ibérica*. Agradezco también a Santiago Castroviejo, la revisión del manuscrito y a Juan Castillo, la ilustración.

Bibliografía

- Cardiel, J. M. 1995a. Las especies herbáceas de *Acalypha* (Euphorbiaceae) de Colombia. *Anales Jard. Bot. Madrid* 52(2): 151-157.
- _____ 1995b. Flora de Colombia. Monografía nº 15. *Acalypha* (Euphorbiaceae). Universidad Nacional de Colombia y Real Jardín Botánico de Madrid. C.S.I.C.
- _____ 1999. Contribuciones a la Flora de Venezuela: Revisión del género *Acalypha* L. (Euphorbiaceae). *Acta Bot. Venez.* 22(2): 255-324.
- _____ 2000. Nuevas especies y sinónimos de *Acalypha* L. (Euphorbiaceae) de Ecuador. *Novon* 10: 360-365.
- Macbride, J. F. 1951. *Acalypha* in Flora of Peru. *Publ. Field Mus. Nat. Hist., Bot. Ser.* 8 part. 3A(1): 121-145.
- Pax, F. A. & K. Hoffmann. 1924. Euphorbiaceae - Crotonoideae - Acalypheae - Acalyphinae in A. Engler, *Pflanzenreich* IV, 147, XVI (Heft 85): 1-231.

BOMBACACEAE NEOTROPICAE NOVAE VEL MINUS COGNITAE V. NOVEDADES EN PSEUDOBOMBAX DUGAND Y SINOPSIS DE LAS ESPECIES COLOMBIANAS

por

José Luis Fernández-Alonso*

Resumen

Fernández-Alonso, J. L.: *Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae* V. Novedades en *Pseudobombax* Dugand y sinopsis de las especies colombianas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **25**(97): 467-476, 2001. ISSN 0370-3908.

Se describe una nueva especie del género *Pseudobombax* Dugand (Bombacaceae) proveniente de los andes peruanos. Se presenta una sinopsis de las especies colombianas del género y se dan a conocer algunas novedades corológicas para Colombia, Ecuador y Perú.

Palabras clave. Bombacaceae, Claves, Colombia, Distribución, Ecuador, Neotrópico, Perú, *Pseudobombax*, Taxonomía.

Abstract

A new species of *Pseudobombax* Dugand (Bombacaceae) from the Peruvian Andes is described. A synopsis of the Colombian species of this genus is presented and some chorologic novelties for Colombia, Ecuador and Peru are reported.

Key words: Bombacaceae, Colombia, Distribution, Ecuador, Keys, Neotropic, Peru, *Pseudobombax*, Taxonomy.

* Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Apartado Aéreo 7495 Bogotá D. C., Colombia. E-mail: jlfern@ciencias.unal.edu.co

Introducción

El género neotropical *Pseudobombax*, cuenta actualmente con 21 especies reconocidas y fue establecido por Armando Dugand, para separar y caracterizar un grupo de especies del complejo *Bombax* L. s. l. (Dugand, 1943; Robyns, 1963; Hutchinson, 1967), que presentaban una particularidad morfológica única dentro del grupo y dentro de la tribu Adansonieae Benth., la presencia de hojas digitadas con foliolos no articulados.

Como parte del trabajo que actualmente se adelanta en la familia Bombacaceae (Fernández, 2001a, 2001b), se revisaron abundantes colecciones del género *Pseudobombax*, principalmente de Colombia, Perú y Ecuador, provenientes de los herbarios: COAH, COL, FMB, GUAY, HUA, JAUM, MA, MO, PSO, QCNE, SURCO y TULV. Como resultado, se localizó una nueva especie originaria de regiones montañosas de Perú, y algunas novedades corológicas para Ecuador o Perú, que complementan la información recientemente publicada sobre el género *Pseudobombax* en Perú y Ecuador (Brako & Zarucchi, 1993; Alverson, 1999). Se presenta también una sinopsis detallada de las especies colombianas del género *Pseudobombax*, que incluye información sobre distribución, hábitat, nombres vernáculos y abundante material revisado. También se incluye una clave dicotómica para la identificación de todas las especies tratadas en el trabajo.

Dos especies del Perú

Pseudobombax cajamarcanus Fern.-Alonso sp. nov.
Fig. 1a-b.

Affinis *Pseudobombax millei* (Standl.) A. Robyns et *P. guayasense* A. Robyns, sed differt foliola late elliptica vel obovato-elliptica, basi generaliter rotunda vel leniter cordata; flores breviores ad 7,5-9 cm longis, calyce ad 1,5 x 2 cm, tubus stamineus glaber ad 7-9 mm longis, basi filamenta (c. 1 cm, parte basalis) albo pilosis, et parte distalis (reliquum, c. 5 cm) glabris.

Typus: PERÚ. CAJAMARCA. Carretera entre Huamachuco y Tayabamba, tramo Chagual - Aricapamba, 2000-3000 m, 24 oct 1986; árbol 8-10 m, fl., fr., C. Díaz 2189 (Holotypus COL-467852,467853 (2/2), Isotypus MO).

Árboles pequeños y ramosos de hasta 8-10 m; ramas jóvenes y yemas verdosas, generalmente blanco-pruinosas. Hojas con peciolas de 6-10 cm de longitud y con 3-5 foliolos; peciólulos de 1-1,5 cm de longitud, laminas de 8-11 x 6-8 cm, de anchamente elípticas a obovado-elípticas, redondeadas o cordadas en la base,

raramente cuneadas; ápice agudo o acuminado, con (12) 13-16 nervios secundarios a cada lado del nervio medio; glabras por el haz y finamente lepidotas o subglabras por el envés. Botones florales finamente ferrugíneo-pubescentes; flores de 7,5 a 9 cm de longitud, pedicelo floral de 1,8-2 cm x 0,3-0,4 cm de grosor, subglabro o con pubescencia muy corta, dispersa; con dos bractéolas escuamiformes dispuestas a distinto nivel en el pedicelo; cáliz truncado, de 1,3-1,5 cm de longitud y c. 2 cm de anchura, ligera y finamente piloso o subglabro en la cara externa y seríceo en la cara interna; pétalos blancos, de 7-9 x 1,5 cm, glabros en la base (uña), en el resto, densa y finamente estrellado-pilosos en la cara externa y con pelo fino aracnoide en la cara interna; estambres de 7-8 cm de longitud, tubo estaminal de 7-9 mm de longitud x 6-7 mm de anchura, glabro, filamentos de 6-6,5 cm de longitud, blanco-pilosos en la zona basal (c. 1/6 de la longitud), y glabros en el resto de su longitud; anteras reniformes, de 1,5-2 mm de longitud; Pedicelo fructífero de c. 2 cm de longitud x 5,5 mm de grosor, blanco-pruinoso; cáliz persistente, glabro, pruinoso; frutos estrechamente fusiformes, de 15-17 cm de longitud, agudos en el ápice; valvas subleñosas de 15-17 cm de longitud, 1,8-2 cm de anchura y c. 4 mm de grosor, glabras, brillantes, uniformemente marrones (en seco), sin manchas más oscuras; lana marrón claro. Semillas no vistas.

Nombres vernáculos: En la provincia de Luya (Amazonas), se denomina a este árbol "baldaco", fitónimo empleado en Ecuador y Sur de Colombia para otras especies del género como *Pseudobombax millei* y *P. munguba*. En la localidad típica (Cajamarca), se emplea el nombre de "chocollo" (c. Díaz 2189, in sachaedis).

Paratypus: PERÚ. AMAZONAS. Provincia de Luya, Camporredondo, Fundo Cedro, 2450-2550 m, 24 may 1989, fl. (botón), C. Díaz & al. 3466 (MO 4574117).

Hábitat y distribución. Especie restringida a dos enclaves secos de los andes peruanos, entre los 2000 y 3000 m, en la vertiente amazónica.

Observaciones. *P. cajamarcanus*, se asemeja a *P. millei* y *P. guayasense*, de los que se separa por presentar foliolos anchamente obovado-elípticos, redondeados o levemente cordados en la base, flores de menor tamaño (7,5-9 cm), androceo con tubo estaminal glabro y porción basal de los filamentos blanco-lanosa. A diferencia de las especies mencionadas, *P. cajamarcanus* vive en zonas más elevadas (2000-3000 m) en la cordillera de los Andes.

Pseudobombax marginatum (A. St.-Hill., Juss. & Camb.) A. Robyns, Bull. Jard. Bot. Etat 33: 73. 1963. Fig. 1c.

Pachira marginata St.-Hil., Juss. & Camb., Fl. Bras. Mer., 1: 260, tab. 51. 1827.

Bombax marginatum (St. Hil., Juss., & Cambess.) K. Schum. in Mart., Fl. Bras., 12(3): 223, tab. 44. 1886.

Iconografía publicada: (Schumann, 1886):

Material revisado: PERÚ. JUNÍN. Provincia de Chanchamayo, Camino La Merced-Satipo, 650 m, 75° 15' W, 10° 56' S, 14 abr 1984, arbusto 1-1,5 m, fl., *D. N. Smith & W. Brack-Egg* 6940 (COL-408941, MO).

Observaciones: Especie ampliamente distribuida en Brasil, Paraguay y Bolivia pero muy pobremente documentada en Perú (Robyns, 1963; Brako & Zarucchi, 1993). Las poblaciones peruanas de Junín, crecen en zonas secas del piedemonte amazónico a 600-1000 m, a mayor altitud que en el resto del área de distribución de la especie, presentan escaso porte (arbustos de 1-1,5 m) y hojas densamente piloso-tomentosas en el envés.

Sinopsis de las especies colombianas

Al publicarse la última revisión del género *Pseudobombax* (Robyns, 1963), se registraron tres especies en Colombia: *P. septenatum*, *P. munguba* y *P. maximum*. En la sinopsis que ahora se presenta se incluye además amplia documentación sobre la distribución de dos especies adicionales: *P. croizatii* en la orinoquia colombiana y *P. millei* en el pacífico del departamento de Nariño. Asimismo se amplía notablemente la distribución conocida de *P. munguba* y *P. maximum* en territorio colombiano.

En el apartado de material revisado, además de las colecciones colombianas, se incluyeron muestras representativas de otros países limítrofes, que en algunos casos, como las colecciones ecuatorianas de *P. munguba*, representan novedades corológicas.

Pseudobombax croizatii A. Robyns, Bull. Jard. Bot. Etat 33: 67. 1963. fig. 1d

Iconografía publicada: (Alverson & Steyermark, 1997).

Material revisado: COLOMBIA. VICHADA. Puerto Carreño, Cerro al N del centro administrativo del INDERENA, afloramiento granítico, 5° 21' N, 67° 51' W, 4 abr 1995, *M. P. Córdoba & al.* 1269 (COL-417337); ibídem, *M. P. Córdoba & al.* 1359. (COAH-14941); ibídem, cerca de Casuarito, 5° 40' N, 67° 40' W, 100 m, 3 abr 1984, fr., *A. Gentry & B. Stein* 46293 (COL-342241, MO); margen derecha del río Orinoco, c. Casuarito, 100 m, 18 mar 1971, fr., *P. Pinto & C. Sastre* 1398 (COL-

152760); Territorio Faunístico El Tuparro, 100 m, 15 ago 1979, *P. Vincelli* 992 (FMB-2175, 2186, 2190); Tuparro, afloramientos graníticos, 120 m, 13 feb 1980, arbusto 2 m, fl, fr., *P. Vincelli*, 1277 (COL-204378, 204379, FMB-2187); ibídem, 25 feb 1985, *J. L. Zarucchi & al.* 3388 (FMB-4635).

VENEZUELA. BOLÍVAR. Río Parguaza, Piedra Mapollos, 110-250 m, 2 ene 1956, arbusto 3 m, fl., *J. J. Wurdack & J. V. Monachino* 41084 (COL-122566, NY).

Hábitat y distribución. Especie caducifolia propia de afloramientos graníticos, que crece tanto en bosquetes de sabana donde alcanza su mayor porte (8-15 m), como en matorrales rupícolas, donde se asienta directamente en grietas de rocas y suele presentar porte arbustivo 2-5 m. En Colombia crece entre los 100-250 m. La distribución de ésta especie se encuentra restringida al Escudo guayanés, en Venezuela (Amazonas, Bolívar) y Colombia (Vichada).

Aunque es bien conocida en Venezuela (Robyns, 1963, 1967, Alverson & Steyermark, 1997), no se habían citado como tal colecciones colombianas hasta la fecha.

Observaciones. Aunque *P. croizatii* generalmente presenta hojas con 5 foliolos, entre las colecciones de Colombia se encuentran plantas que presentan sólo tres foliolos. Con respecto a los colores de las diferentes partes florales, se presenta información descriptiva complementaria a la publicada a partir de las escasas colecciones de Venezuela, tomando como base plantas colombianas: pedicelo floral, botón y cáliz floral, de marrón a púrpura; pétalos marrones en la cara externa, y de marrón-verdoso a blanco-crema en la cara interna; estambres con filamentos blancos, con la parte basal rosada; anteras crema; ovario blanquecino; estilo rojo; fruto verde, tornándose marrón al secarse; lana que acompaña a las semillas color crema oscuro.

En la flora del Parque Nacional Natural El Tuparro (Barbosa, 1992), se incluye información descriptiva y reproductiva sobre especímenes de *P. croizatii* (sub. *Rhodognaphalopsis* cf. *minor*, det. tentativa).

P. maximum A. Robyns, Bull. Jard. Bot. Etat 33: 71. 1963; Dugand, *Caldasia* 10(48): 277-280. 1969 Fig. 2a-b

Nombres vernáculos y usos: "ceiba botella", "ceibo barrigón" (Magdalena); "majagó" (La Guajira); "majagua", "majagua colorada" (Magdalena). En la Guajira, con el xilema machacado se obtiene fibra para hacer lazos, (*Fonnegra* 1444, in schedis).

Material revisado: COLOMBIA. LA GUAJIRA. Mpio. de Barrancas, Tajo Oeste, 2 mar 1980, árbol 8 m, fl.,



Figura 1. A-B. *Pseudobombax cajamarcanus* Fern.-Alonso: A- Fotografía del tipo, con flor y fruto (C. Díaz 2189). B- Detalle de la flor: B1: cáliz con el pedicelo floral, B2: pétalo; B3: androceo mostrando el anillo piloso en la base de los filamentos estaminales (a partir de C. Díaz 3466). C.- *P. marginatum* (St. Hill.) Robyns (Fotografiado de D.N. Smith 6940). D.- *P. croizatii* Robyns, Detalle de hoja y flor (a partir de J. J. Wardack & J. V. Monachino 41084).

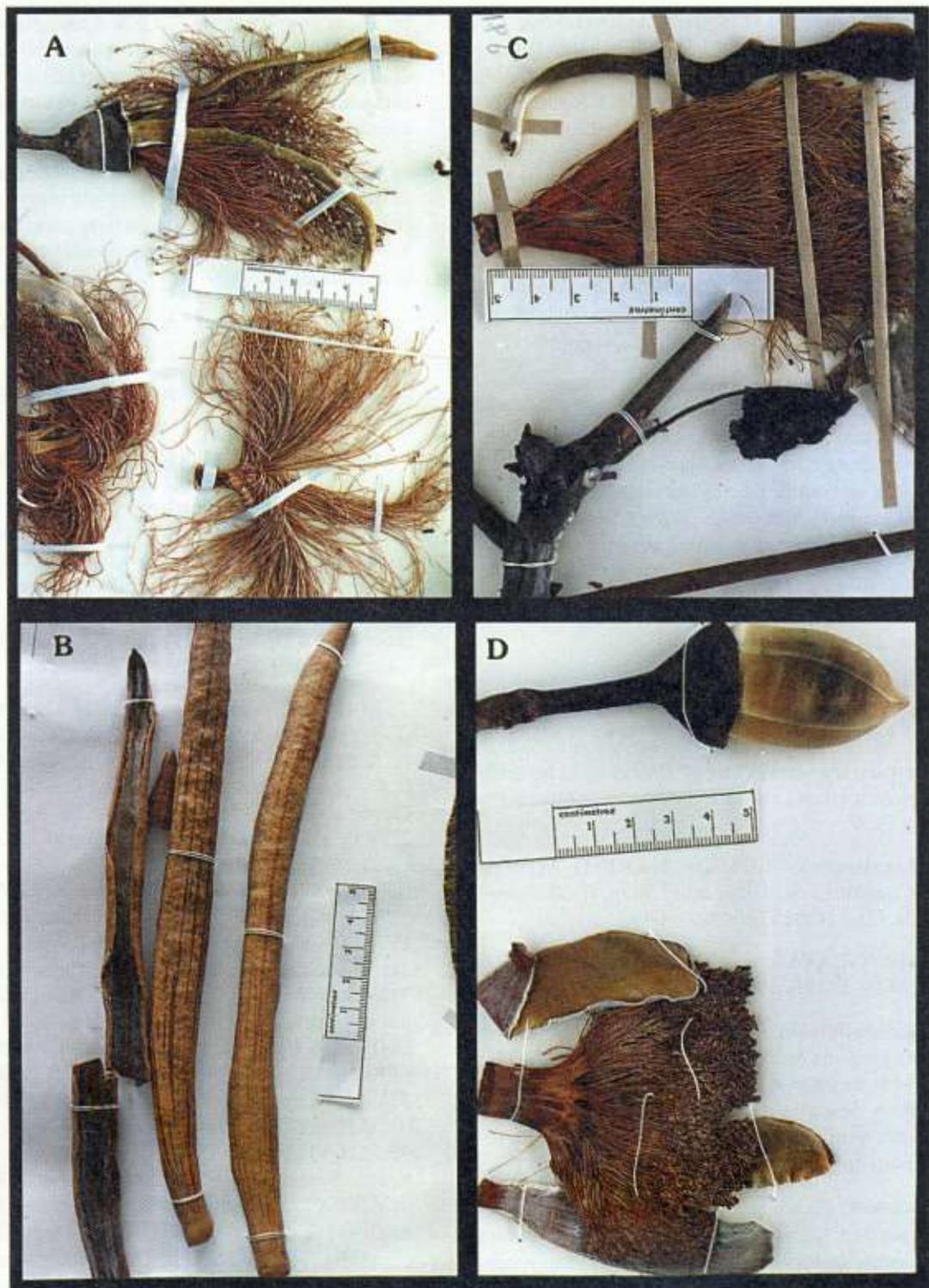


Figura 2. A-B. *Pseudobombax maximum* Robyns. Detalles de flor y valvas del fruto (a partir de A. Dugand 5668). C- *Pseudobombax millei*. (Standl.) A. Robyns. Detalles de pétalo y androceo. (A partir de Romero-Castañeda 5360). D. *Pseudobombax munguba* (Mart. & Zucc.) Dugand. Detalle de un botón antes de la apertura (izq.) y de la corola y androceo (der.) (Fotografiado de Pinto 6427).

fr., *R. Fonnegra 1444* (HUA-11892). **MAGDALENA.** Valle del Río Ariguani, cerca de Caracolicito, 100-150 m, 21 ene 1940, bosque subxerofítico, árbol 10 m, fl., A. Dugand & al. 2507 (COL-15303); Valle del Río Cesar, 60 m, 15 abr 1961, matas de monte, árbol 8-10 m, fr., A. Dugand 5668 (COL-88527, 88573); Mpio. de Santa Marta, alrededores de Don Jaca, 3 mar 1970, árbol 12 m, fl., fr., N. de López s/n. (COL-119163, 119164); ibídem, Don Jaca, 20 sep 1969, árbol 18 m, hojas, N. de López 2 (COL-119165, 119166, 119167); ibídem, Chengue, P.N.N. Tayrona, 29 dic 1974, árbol caducifolio, N. de López 827 (COL-217948); Mpio. de Santa Marta, Don Jaca, 9 dic 1966, fl., R. Romero-Castañeda 10597 (COL-105691).

Hábitat y distribución: Especie caducifolia, reconocible por sus troncos en forma de botella y flores blancas de gran tamaño, con androceo enteramente glabro. Con el registro que ahora se hace de La Guajira, su distribución conocida abarca un amplio sector del norte de Colombia (Magdalena, Guajira) y Venezuela (Zulia), donde crece en ambientes subxerofíticos, en sabanas abiertas y matas de monte.

P. millei (Standl.) A. Robyns, Bull. Jard. Bot. Etat 33: 69. 1963. Fig. 2c

Bombax Millei Standl., Trop. Woods 45: 16. 1936.

Iconografía publicada: (Little & Dixon, 1969).

Nombres vernáculos: "beldaco" (Nariño), es también utilizado para esta misma especie y para otras congéneres en Ecuador y Perú.

Material revisado: COLOMBIA. NARIÑO. Al sur de Tumaco, El Congal, 12 oct 1955, árbol 20 m, fl., R. Romero-Castañeda 5360 (COL-760442, 76043).

ECUADOR: GUAYAS. Región tropical cálida, sept 1929, fl., L. Mille 868 (Fototypus COL).

Hábitat y distribución. *P. millei*, que era conocido solo de la vertiente pacífica de Ecuador y Perú (Robyns, 1963; Alverson, 1999; Santiana, 2000), se registra como novedad para la flora de Colombia. Crece preferentemente en ambientes con cierta humedad, aunque también se ha registrado en Ecuador en el bosque litoral xerofítico.

Observaciones: En lo que respecta a las plantas colombianas, que son las poblaciones más septentrionales conocidas en esta especie, probablemente representan también un extremo de variación morfológica en algunos caracteres. A continuación se señalan algunos caracteres de las plantas estudiadas: Árboles c. 20 m; troncos con corteza gris-verdosa; hojas generalmente con 6 folíolos, cá-

liz verde (en vivo), de 2 x 2,8-3 cm, glándulas del cáliz crema, pétalos oliváceos por fuera con puntos negros, blancos por dentro; androceo enteramente blanco, tubo estaminal de c. 1,5 x 1,3-1,5 cm; estilo blanco, estigma crema, ovario amarillo.

Esta especie guarda relación con *P. septenatum*, pero se diferencia por presentar flores de mayor tamaño (13-15 cm de longitud), tubo estaminal de mayor tamaño c. 1,5 x 1,3-1,5 cm y subglabro, con pubescencia muy dispersa en la zona media.

P. munguba (Mart. & Zucc.) Dugand, Mutisia 9: 4, 1952. Fig. 2d.

Bombax munguba Mart. & Zucc. in Mart., Gen. Sp. Pl. 1: 93, tab. 99. 1826.

Iconografía publicada: (Martius & Zuccarini, 1826).

Nombres vernáculos: "algodón" (Amazonas), "bolador" (Caquetá); "ceiba" (Vaupés); "jaadico"-Huitoto (Amazonas); "maadico", "moadico"-Miraña (Amazonas); "munguba", "palo de algodón" "punga" y "volador" (Amazonas). En las colecciones revisadas de Ecuador se recogían los siguientes nombres: "beldaco" (Morona-Santiago) y "muende" (Zamora-Chinchipec).

Material revisado: COLOMBIA. AMAZONAS. Corregimiento de Araracuara, Río Caquetá, 13 sep 1977, fl., L. E. Aguirre 1116 (COL- 179187, 426160); ibídem., fr., L. E. Aguirre 1116-A (COL-426054); Mpio. de Leticia, río Caquetá, 120 m, abr 1994, D. Cárdenas 4589 (COAH-22585); ibídem, D. Cárdenas 4663 (COAH-22701); Río Caquetá, Isla Yarumal, feb 1988, J. Duivenvoorden 81 (COAH-5764); ibídem, R. Jaramillo 7885 (COAH-1730, 13664); La Rotta, C. 241 (COAH-589); Leticia, 5 ago 1975, G. Mahecha 1842 (FMB); Puerto Nariño, Lago Tarapoto, 100 m, ago 1996, A. Posada 1926 (COAH-34093); ibídem, Tarapacá, P.N.N. Amacayacu, 100 m, 19 jun 1991, árbol 12 m, fr., A. Rudas & al. 2120 (COL-408214, FMB); Río Caquetá, may 1988, M. Sánchez 276 (COAH-6140, 6141); ibídem, M. Sánchez 1327 (COAH 12651, COL-421790); Laguna de Tarapoto, ago 1996, M. Torres 1877 (COAH- 32718); ibídem, Abr 1990, L. E. Urrego 1710 (COAH-13236). **CAQUETÁ.** Río Caquetá-río Ortegua, bosque húmedo tropical, 200 m, 11 mar 1945, fr., E. Little jr. & al. 9775 (COL-61546); Araracuara, 150-200 m, 28 nov 1991 A. Matapí 662 (COAH); ibídem, D. Restrepo 662 (COAH-17884). **META.** P.N.N. Tinigua, Serranía Chamusa, 350 m, feb 1994, árbol 18 m, fl., P. Stevenson 921 (COL-400645, COAH-18888). **VAUPÉS.** Puerto Cajaró, márgenes del Río Guayabero, 250 m, 9 nov 1939, árbol 10-15 m, fl., fr., J. Cuatrecasas 7568 (COL-10258).

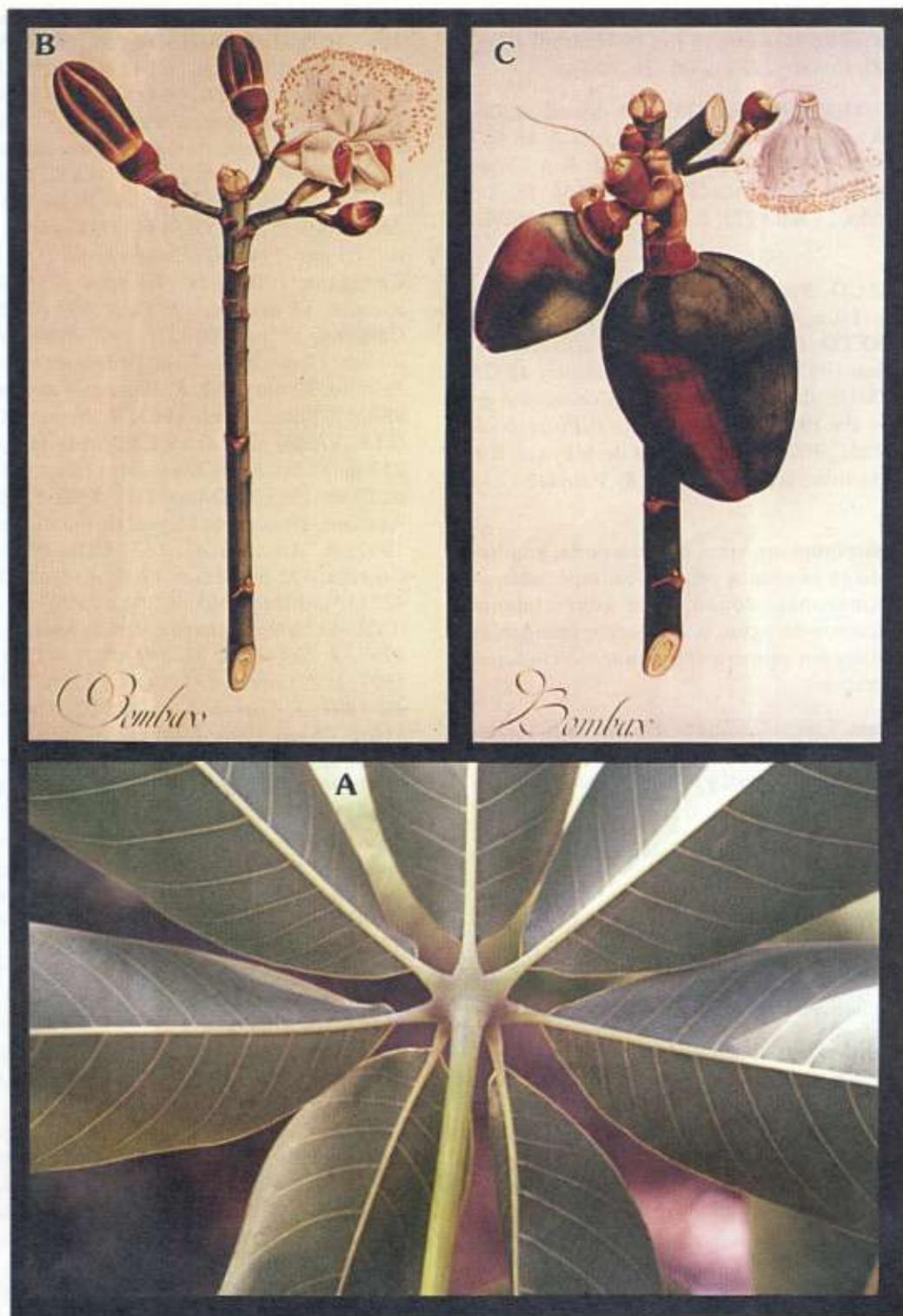


Figura 3. A-C: *Pseudobombax septenatum* (Jacq.) Dugand. A- Detalle de una hoja mostrando la inserción no articulada de los foliolos (Fotografía de J. L. Fernández & al. 19540) . B- Detalle de una rama con flores. (Lámina de Mutis 2165, Archivo histórico del Real Jardín Botánico de Madrid) C- Detalle de una rama con frutos (Lámina de Mutis, íbidem., n° 2166).

BRASIL. AMAZONAS. Río Solimoes, Lago de Janauari, cercanías de Manaus, 16 jun 1977, árbol 12 m, fl., M. Silva & D. Cohelo 2120 (COL-267656).

ECUADOR. MORONA SANTIAGO. Sucua, 1200-1500 m, bosque húmedo, 7 oct 1975, E. Little & al. 667 (COL-57484). **ZAMORA CHINCHIPE.** 6 Km SE de Gualquiza, Misión de Bomboiza, 3° 27' S, 78° 34' W, 700 m, bosque húmedo, 15 sep 1975, E. Little & al. 368 (COL-149408).

PERÚ. CUZCO. Provincia de Quispicanchis, Río Araza, 643 m, 10 ago 1991, P. Núñez 14071 (MO 4574128). **LORETO.** Provincia de Maynas, río Amazonas, 120 m, 29 jun 1983, árbol 20 m, fr., A. Gentry 42328 (COL-408932, MO); desembocadura del Cochiquiná en el Amazonas, 14 abr 1987, árbol 10 m, fr., P. Pinto & al. 6427 (COL-307501, 307502); Provincia de Maynas, Río Itaya, cerca de Iquitos, árbol 25 m, fl., R. Vásquez 1733 (COL-408940).

Hábitat y distribución. Árbol de gran porte, ampliamente distribuido en la cuenca amazónica, especialmente en el alto Amazonas, donde crece generalmente asociado a los cursos de agua, o a bosques inundables (varzea). Se registra por primera vez para territorio ecuatoriano en éste trabajo.

Observaciones. Las colecciones del sur de Ecuador, que provienen de zonas más altas que el resto (700-1200 m), presentan peciolóculos cortos, y sus hojas recuerdan a *P. septenatum*.

P. septenatum (Jacq.) Dugand, *Caldasia* 2: 65. 1943. Figuras 3a-c.

Bombax septenatum Jacq., *Enum. Syst. Pl.*, p. 26. 1760.

Pachira barrigon Seem., *Bot. Boy. Herald* 83. 1853.

Iconografía publicada: (Robyns, 1963).

Nombres vernáculos: "barrigón" (Casanare-Yopal); "cartageno" (Chocó-Katfos; Santander-Carare); "ceiba" (Bolívar, Casanare, Huila); "ceiba boba" (Casanare-Aguazul); "ceibo" (Casanare, Tolima); "ceibo blanco" (Casanare); "guarabilla" (Bolívar); "lano" (Chocó-Katfos); "majagua" (Atlántico, Bolívar, Sucre); "majagua colorá" "majagua colorada" (Bolívar); "majaguó", "mahauo" (Tolima); "majao" (Cundinamarca-Tocaima); "papayote" (Chocó).

Material revisado. COLOMBIA. ANTIOQUIA. J. Brand 580 (JAUM); Bolombolo, 600-700 m, 6 ene 1979, fl., fr., A. Gentry & al. 23685 (COL-206505, HUA); Arboletes, 0 m, 11 abr 1992, árbol 18-20 m, fr., A. Gómez

& al. 562 (HUA 81343); Urabá, Dabeiba, 600 m, 21 ene 1947, fl. fr., L. Uribe-Uribe 1535 (COL-51830); Venecia, 920 m, árbol 10 m, fl., fr., 12 mar 1987, J. Zarucchi & B. Echeverri 4655 (COL-364263, HUA-38669). **ATLÁNTICO.** Malambo, 30 m, 29 dic 1932, A. Dugand 283 (COL-7694); Alrededores de Galapa y Barbanoa, 27 jul 1943, A. Dugand & R. Jaramillo 3277 (COL-14400,14401). **BOLÍVAR.** Región de Cartagena, 28 jul 1943, A. Dugand & Jaramillo. 3319 (COL-14437); Corozal, Correg. Palmitas, 25 ago 1944, G. Gutiérrez 68 (COL-20632,20633); Cartagena, 100 m, H. Mendoza 1733 (FMB); Islas del Rosario, 14 oct 1963, P. Pinto 695 (COL-98528); Santa Catalina, 17 jul 2000, fr., G. Rodríguez 311 (COL); ibídem, 17 ene 2001, fl., G. Rodríguez 625 (COL); Corozal, Palmito, 20 dic 1962, R. Romero-Castañeda 9350 (COL-98026); Sincé, 7 sep 1963, R. Romero-Castañeda 9809 (COL-97386). **CALDAS.** La Dorada, bosque muy húmedo, 250 m, 11 feb 2000, hojas, M. V. Bustos 400; ibídem, 200 m, 23 abr 1963, S. Espinal 1207 (PSO-8338). **CASANARE.** Aguazul, vereda San Miguel de Farallones, 535 m, 17 oct 1997, A. Ayala & al. 162 (COL-422808); Yopal, La Guatilla, 495 m, 12 nov 1997, A. Ayala & al. 379 (COL-422813); ibídem, 665 m, 30 nov 1997, A. Ayala & al. 659 (COL-422809); Aguazul, Vereda Mesitas, 410 m, 21 oct 1997, J. Correa & al. 291 (COL-422810); ibídem, dic 1997, L. J. Correa 455 (COAH 32964); ibídem, 455 m, 1 dic 1997, J. Correa & al. 835 (COL-422811); Nunchia, 510 m, 28 ene 1998, J. Correa & al. 1070 (COL-422812); Yopal, A. Viña 1197 (FMB). **CHOCÓ.** Acandí, 100 m, 16 oct 1996, S. Márquez 132 (JAUM-31881), 236 (JAUM-31984); P.N.N. Los Katfos, Sautatá, 13 ago 1981, S. Zuluaga 245 (COL-293231, FMB); ibídem, Alto del Limón, 300 m, 19 mar 1983, fl., S. Zuluaga 1364 (COL-293288); ibídem, Sautatá, S. Zuluaga 1683 (FMB). **CÓRDOBA.** San Andrés, 100 m, mar 1996, L. F. Prado 36 (FMB). **CUNDINAMARCA.** Tocaima, 17 jul 1934, fl., fr., H. García-Barriga 3081 (COL-7695,7697); Puerto Bogotá, 550 m, 5 mar 1977, fr., A. Gentry & al. 18109; (COL-3848); Tocaima, ene 1933, fl., E. Pérez-Arbeláez 2468 (COL-7696, 7698). **HUILA.** Neiva, Quebrada Avichente, 427 m, 16 ago 99, fl., fr., J.L. Fernández-A. 18563 (COL-438104,438105); Algeciras, 4 may 1944, fl., E. Little Jr. 7806 (COL-61953); Neiva, 1600 m, 18 jun 1944, fl., E. Little Jr. 8069 (COL-61570); Colombia, Río Blanco, 1200 m, 30 sep 1990, fl., F. Llanos & al. 1902 (COL-406825,427170, SURCO). **MAGDALENA.** Santa Marta, P.N.N. Tayrona, 110 m dic 1977, C. Barbosa 3456 (COL); ibídem, 17 sep 1976, hojas, G. Lozano & al 2864 (COL-198236); Santa Marta, Tucurínca, dic 1947, fl., R. Romero-Castañeda 551 (COL-32572); Alrededores de Fundación, 200 m, 31 mar 1959, fr., R. Romero-Castañeda 7666 (COL-80100). **SANTANDER.** Piedecuesta,

Pescadero, 450 m, bosque de galería, 3 jun 2001, J.L. Fernández & al. 19540 (COL); Cimitarra, Puerto Olaya, 160-190 m, 5 ago 99, J. Pérez & al. 1104 (COL-439963); Río Opón, Quebrada La India, 200 m, 22 sep 1954, fl., R. Romero-Castañeda 4883 (COL-48355,48604); entre Aratoca y Piedecuesta, 1005-1805 m, 16 jun 1962, est., C. Saravia & al. 952 (COL-227636). **SUCRE.** Tolú, 100 m, árbol 22 m, fl., 27 feb 1973, P. Warner 176 (COL-171443). **TOLIMA.** Mpio. Guamo, vía Saldaña, 400 m, fl., H. García-Barriga 13486 (COL-36938); 1500 pies, 10 feb 1944, fl., E. Little 7172 (COL-61552); Mpio. Payandé, 650 m, ene 1990, fl., M. Torres & al. 1134 (COL-397812); Mariquita, 1300 m, ago 1833, J. Triana s/n (COL-7699). **VALLE.** San Fernando - Río Pance, 1000 m, 13 jul 1945, fl., J. Cuatrecasas 19663 (COL-38947); Cali, 900 m, W. Devia 1566 (TULV).

ECUADOR. LOJA. Bosque de Puyango, 350 m, 20 jun 95, hojas, X. Cornejo & al. 4179 (COL-455393, GUAY).

PANAMÁ. COLÓN. Portobelo, 28 mar. 1998, fl., J.L. Fernández-A. 15360 (COL-413653). **VERAGUAS.** Isla Jicarón, 19 ene 1994, S. Castroviejo & al. 12891 (COL-413240); Isla de Coiba, Playa Hermosa 150 m, 25 mar 1998, fr., S. Castroviejo & al. 14733 (COL-413638).

PERÚ. MADRE DE DIOS. Tambopata, 280 m, 14 ago 1990, C. Reynel & al. 5137 (MO 4574125); Ibídem, 20 ago 1990, C. Reynel & al. 5298 (MO 4574124). **PUNO.** Río Candamo, 800 m, 26 may 1992, A. Gentry & al. 77267 (MO 4572632). **UYACALI.** NE de Tucalipa, 300-400 m, 24 jun 1987, A. Gentry & al. 58477 (MO 3483788).

Hábitat y distribución. Ampliamente distribuida en Centroamérica (desde Nicaragua hasta Panamá) y en Suramérica desde Colombia y Venezuela hasta Bolivia (Killeen & al., 1993), presentando cierta amplitud ecológica. En Colombia es muy frecuente en los valles interandinos, caribe y algunos sectores del pacífico y del piedemonte orinoco-amazónico; desde el nivel del mar hasta los 1300 (1800) m.

Observaciones. Existe una cita antigua de *Pseudobombax grandiflorum* (Cav.) A. Robyns, del valle del Magdalena (Triana & Planchon, 1862), bajo el nombre uno de sus sinónimos actualmente reconocidos, (*Pachira alba* Loddg.) y el nombre vernáculo "majagua", cita que no había sido verificada ni desmentida hasta la fecha. Se trata sin lugar a dudas de la especie *P. septenatum*, ampliamente distribuida en el valle del Magdalena y conocida bajo el fitónimo citado. *P. grandiflorum*, es considerada hasta la fecha como especie endémica del centro y sur de Brasil.

Especies excluidas:

-*Pseudobombax subandinum* Dugand, *Caldasia* 3: 296. 1943. = *Pachira subandina* (Dugand) Fern. Alonso (Fernández, 1998).

-*Pseudobombax squamigerum* Cuatrec., *Phytologia* 4: 471, 1954 = *Eriotheca squamigera* (Cuatrec.) Fern. Alonso (Fernández, 1999).

Clave para las especies tratadas del género *Pseudobombax*

- 1- Hojas densamente hirsuto-tomentosas por el envés, pedicelo, receptáculo y cáliz (cara externa), densamente pubérulo *P. marginatum*
- 1- Hojas glabras o con indumento lepidoto poco conspicuo (envés), pedicelo, receptáculo y cáliz (cara externa), glabros, lepidotos o dispersamente pubérrulos 2
- 2- Peciólulos de hasta 2 mm de longitud, cáliz de 0.5-0.6 cm de longitud, androceo con 180-250(275) estambres, tubo estaminal de 0,3 cm de longitud, con bandas longitudinales pilosas *P. croizatii*
- 2'- Peciólulos de 2 a 33 mm de longitud, cáliz de 0.8-2 cm de longitud, androceo con más de 500 estambres, tubo estaminal de 0,8-2 cm glabro o con indumento no dispuesto en bandas longitudinales 3
- 3- Flores de más de 12 cm de longitud 4
- 3'- Flores de menos de 12 cm de longitud 6
- 4- Flores de 15 a 22,5 cm de longitud, c. 550 estambres, tubo estaminal y filamentos glabros, lana del fruto blanco-amarillenta *P. maximum*
- 4'- Flores de 13-15 cm de longitud, 1200-1500 estambres, tubo estaminal subglabro, con indumento aracnoideo en su zona media, poco conspicuo y filamentos glabros, lana del fruto marrón *P. millei*
- 5- Hojas con 3-5 foliolos, cáliz de 1,9-2 cm de ancho, androceo con menos de 900 estambres, filamentos con una zona pilosa (de c. 1 cm) en la base *P. cajamarcanus*
- 5'- Hojas con 5-9 foliolos, cáliz generalmente de más de 2 cm de anchura, androceo con más de 1000 estambres, filamentos glabros 6
- 6- Árboles de 6-20 m, peciólulos de 0.4-1.2 cm de longi-

tud, receptáculo con glandulas conspicuas, tubo estaminal de 0.8-1.3 cm de longitud, seríceo-viloso ...

..... *P. septenatum*

6- Árboles de hasta 40 m, peciólulos de 1-3.3 cm de longitud, receptáculo sin glándulas, tubo estaminal de 1.5-2 cm de longitud, glabro o glabrescente

..... *P. munguba*

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional de Colombia y al Instituto de Ciencias Naturales, las facilidades dadas para el desarrollo del presente trabajo, con la concesión de un año sabático. A los curadores de los herbarios COAH, COL, FMB, GUAY, HUA, JAUM, MA, MO, PSO, QCNE, SURCO, TULV la invaluable colaboración recibida para la consulta de colecciones y para el préstamo de colecciones para estudio. A Marfa del Pilar San Pfo y Santiago Castroviejo, del Real Jardín Botánico de Madrid, por el acostumbrado apoyo con la consulta del Archivo Mutis y el envío de la literatura solicitada.

Bibliografía

- Alverson, W. S. 1999. Bombacaceae. Pp. 326-329, in: P.M. Jorgensen & S. León-Yañez (eds.) Catalogue of the Vascular Plants of Ecuador. Monogr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard. 75: 1-1181.
- & J.A. Steyermark. 1997. Bombacaceae. Pp. 496-527, in: P. E. Berry, B. Holst & K. Yatskievych (eds.) Flora of the Venezuelan Guayana 3. Missouri Bot. Garden. St. Louis.
- Barbosa Castillo, C.E. 1992. Contribución al conocimiento de la Flórla del Parque Nacional Natural El Tuparro. Biblioteca Andrés Posada Arango 3 - INDERENA. Bogotá.
- Brako, L. & J. L. Zarucchi. 1993. Catalogue of the Flowering Plants and Gymnosperms of Perú. Monogr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard. 45: 1-1251.
- Dugand, A. 1943. Revalidación de *Bombax Ceiba* L. como especie típica del género *Bombax* L. y descripción de *Pseudobombax* gen. nov. *Caldasia* 2: 47-68.
- Fernández-Alonso, J. L. 1998. Novedades taxonómicas, nomenclaturales y corológicas en el género *Pachira* Aubl. (Bombacaceae). *Anales Jard. Bot. Madrid* 56(2): 305-314.
- 1999. Sobre la identidad de *Pseudobombax squamigerum* y de *Eriotheca gentryi* (Bombacaceae). *Anales Jard. Bot. Madrid* 57(1): 162-164.
- 2001a. *Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae I*. Novedades taxonómicas y corológicas en *Matisia*, *Quararibea* y *Spirotheca*. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 25(95): 183-206.
- & S. Castroviejo 2001b. *Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae IV. De Matisis et Quararibeis nonnullis in provincia chocovana regni novogranatensis provenientibus*. *Anales Jard. Bot. Madrid* 59(1): 18-21.
- Hutchinson, J. 1967. The genera of Flowering Plants, Dicotyledones, vol. 2. Oxford Univ. Press, London.
- Killeen, T. J. E. García & S.G. Beck. 1993. Guía de árboles de Bolivia. Herbario Nacional de Bolivia. La Paz. Bolivia.
- Little Jr., E.L. & R.G. Dixon. 1969. Árboles comunes de la provincia de Esmeraldas. I-XII, 1-536 pp. FAO, Roma.
- Martius, K.F.P. von & J. G. Zuccarini. 1826. Bombacaceae. In: K.F.P. von Martius (ed.) *Nova genera et species plantarum* 1: 83-95, tab. 56-59 y 99.
- Robyns, A. 1963. Essai de monographie du genre *Bombax* s.l. (Bombacaceae).- *Bull. Jard. Bot. Etat Brux.* 33: 1-315.
- 1967. Bombacaceae. Pp. 190-201, in: B. Maguire et al., *The Botany of the Guyana Highland*, part. 7. *Mem. New York Bot. Gard.* 17: 190-201.
- Schumann, K. 1886. Bombacaceae. in: Martius, K. F. P. von. *Flora Bras.* 12(3): 201-250, tab. 40-50.
- Triana, J. J. & J. E. Planchon. 1862. Sterculiaceae. Pp. 191-216. en: *Prodromus Florae Novogranatensis*. Victor Masson et fils. Paris.
- Santiana, J. 2000. Bombacaceae, pp. 131-132 en: Valencia, R., N. Pitman, S. León-Yañez & P. M. Jorgensen (eds.). *Libro rojo de las plantas endémicas del Ecuador*. Publicaciones Herbario QCA. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito.

DOS NUEVAS ESPECIES DE *SCHWARTZIA* (MARCRAVIACEAE) DE COLOMBIA

por

Diego Giraldo-Cañas¹

Resumen

Giraldo-Cañas, D.: Dos nuevas especies de *Schwartzia* (Marcgraviaceae) de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 25(97) 477-482, 2001. ISSN 0370-3908.

Se describen dos nuevas especies de *Schwartzia* Vell.: *S. chocoensis* Giraldo-Cañas y *S. diaz-piedrahitae* Giraldo-Cañas, endémicas del Chocó biogeográfico (departamentos del Chocó y Valle del Cauca).

Palabras clave: Flora de Colombia, Marcgraviaceae, *Norantea*, *Schwartzia*.

Abstract

Two new species of *Schwartzia* Vell., are described: *S. chocoensis* Giraldo-Cañas and *S. diaz-piedrahitae* Giraldo-Cañas. The new species are endemic to the Biogeographic Chocó Region (Colombian departments of Chocó and Valle del Cauca).

Key words: Colombian Flora, Marcgraviaceae, *Norantea*, *Schwartzia*.

Introducción

El género *Schwartzia* Vell., constituido por ca. 13 especies, se distribuye desde Costa Rica hasta el sur de Brasil y se caracteriza por presentar inflorescencias racemosas y flores largamente pediceladas con un nectario reproductivo (bráctea nectarífera) ubicado en la porción medial a proximal del pedicelo (Picca & Giraldo-Cañas, 1999a; Giraldo-Cañas, 2001a; 2001b). El género *Schwartzia* (Vellozo, 1825) fue considerado por mucho

tiempo como parte del género *Norantea* Aubl. (Delpino, 1869a, 1869b citados por Ferreira, 1995; Wittmack, 1878; Szyszlowicz, 1893; Gilg & Werdermann, 1925; De Roon, 1970), hasta que fue revalidado recientemente por Bedell (1989).

Ambos géneros presentan inflorescencias racemosas y se diferencian básicamente por la longitud del pedicelo, siendo las flores largamente pediceladas en *Schwartzia* (pedicelo de 16-75 mm de longitud), mientras que en

¹ Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Apartado 7495, Bogotá, D. C., Colombia. Correo electrónico: giraldoc@ciencias.unal.edu.co

Norantea son cortamente pediceladas (pedicelo de 3-7 mm de longitud). Por otra parte, en *Schwartzia* los nectarios reproductivos pedicelares (= nectarios nupciales extraflorales), los cuales son cortamente peciolados (pecíolo de 1-7 mm de longitud), se ubican en la porción medial a proximal del pedicelo y en *Norantea* se localizan en el tercio medio o hacia su porción distal, presentando un pecíolo de 5-20 mm de longitud. *Norantea* s. l. ha sido dividido en 4 géneros: *Norantea* s. str., *Schwartzia*, *Sarcopera* Bedell y *Marcgraviastrum* (Wittm. ex Szyszyl.) De Roon & S. Dressler (véase De Roon & Dressler, 1997).

Como resultado del estudio de la familia Marcgraviaceae y en especial de las especies colombianas (véanse Giraldo-Cañas, 1999, 2001a, 2001b; Giraldo-Cañas & Picca, 1999; Picca & Giraldo-Cañas, 1999a, 1999b), se describen a continuación dos nuevas especies del género *Schwartzia*. La terminología de las estructuras morfológicas está basada en Font Quer (1993), excepto en lo que tiene que ver con la clasificación de los nectarios, siguiéndose en este caso a Schmid (1988). Las medidas de las estructuras florales están dadas antes de la anthesis, pues sólo se conocen dos ejemplares (uno por especie de las aquí detalladas) con flores totalmente abiertas. Dado que la revisión del género se encuentra en ejecución y varias especies de éste se hallan en proceso de descripción (especies nuevas) y otras en proceso de combinación, las afinidades de las especies aquí propuestas no se mencionan. No obstante, éstas se darán a conocer prontamente en la revisión del género en su totalidad.

Schwartzia chocoensis Giraldo-Cañas, sp. nov. (Fig. 1).

Typus. COLOMBIA, CHOCÓ: carretera Ansermanuevo-San José del Palmar, 8.4 km del Alto del Galápagó, 1600 m, 19 feb 1977, E. Forero et al. 3000 (holotipus COL).

Frutex foliis spiralter alternantibus, petiolis (0,3-) 0,4-0,6 (-1) cm longis, laminis (13-) 15-22 cm longis et (4,4-) 5,5-7,8 (-8,2) cm latis, 4-12 hidatodiis donatis. Racemus multiflorus. Flores (16-) 20-54, pedicellis 4-5,8 (-7) cm longis; bracteolae 2, oppositae, orbiculatae, verruculosae; bractea floralis tubuloso-sacciformibus vel globosa, 2-3,3 cm longa et 0,5-1 cm lata; sepalis 5, orbiculatis, verruculosis; petalis 5; stamina 50, antheris oblongis, basi subcordatis, filamentis applanatis, verruculosis; ovario conico. Fructu globoso, stylo apiculato.

Arbustos escandentes, epífitos a hemiepífitos, profusamente ramificados; tallos cilíndricos, huecos o fibrosos, entonces las fibras lanuginosas, fuertemente estriados y rugosos, las estrías transversales; corteza castaño a

ferrugínea. Hojas espiraladas, cortamente pecioladas; pecíolo recurvado, canaliculado (el canal muy angosto y poco profundo, ca. 1 mm de ancho), levemente estriado a más comúnmente liso, castaño oscuro, de (3-) 4-6 (-10) mm de longitud x 5-6 (-7) mm de ancho; láminas elípticas a oblongas, de base levemente cordada y ápice cortamente apiculado, de (12-) 15-22 cm de longitud x (3,5-) 5,5-7,8 (-8,2) cm de ancho, enteras, con márgenes ligeramente revolutos y engrosados, coriáceas, glabras, pruinosas en la haz (muy raramente sin pruina); nervio medial conspicuo en ambas caras (aunque poco notorio hacia la porción distal de la haz), plano a levemente hundido en la haz y abultado en el envés, liso, de 1-2 mm de ancho; venación secundaria débil en ambas caras, broquidódroma; 2-6 pares de glándulas laminales en la superficie abaxial, submarginales, localizadas a 0,5-1,5 (-3) mm de la margen, circulares, levemente elevadas, de ca. 0,8 mm de diámetro, con su orificio circular, negruzco, de ca. 0,15 mm de diámetro, distanciadas entre sí 1,5-6 (-7) cm. Inflorescencia terminal, racemosa, multiflora [(5-16-) 20-54 flores], densa; pedúnculo de (5-13-) 22-30 cm de longitud; pedicelos de 4-5,8 (-7) cm de longitud, rectos a ligeramente sinuosos, lisos a levemente estriados, castaño oscuros. Nectarios (brácteas nectaríferas) sacciformes, tubulares a globosos, péndulos, rojizos, uno por pedicelo, estriados longitudinalmente, ligeramente verruculosos, pecíolos de los nectarios 1-2 mm de longitud, urnas de (15-) 20-33 mm de longitud x 5,5-10 mm de ancho, con los orificios circulares, de 1,5-3 mm de diámetro, dispuestos hacia el eje de la inflorescencia y ocupando una posición oblicua respecto a su eje, el orificio con un pequeño apéndice en forma de espolón (rostrado) de 0,5-2,5 mm de longitud o sin el mismo; los nectarios naciendo en el tercio o cuarto inferior del pedicelo. Flores dispuestas en forma espiralada, inserción pedicelo-flor horizontal a levemente oblicua; bractéolas 2, sepaloideas, opuestas, orbiculares, verruculosas, carnosas, breves, de 2,5-5 mm de longitud; sépalos 5, imbricados en dos series, orbiculares, verruculosos, carnosos, de 5-7 mm de longitud; pétalos 5, connatos basalmente ca. 1/6 de su longitud, ovados, reflexos, de 6-12 (-13) mm de longitud x 3,8-6 mm de ancho, carnosos, verde claros a rojizos; estambres 50, filamentos de 1-3 mm de longitud x ca. 0,5 mm de ancho, aplanados, levemente verruculosos, adnatos a la base de los pétalos, anteras introrsas, oblongas, basifijas, subcordatas, blanquecinas, 3-5 mm de longitud x 0,5-1 mm de ancho; ovario súpero, cónico, ligeramente estriado, 3-8 mm de longitud x 2,5-6 mm de ancho. Fruto globoso, carnoso, apiculado, liso, de 14-17 mm de diámetro, verde claro; semillas reniformes, rugosas, negruzcas, brillantes, numerosas (ca. 30 por fruto), 3-4 mm de longitud x ca. 1,5 mm de ancho.



Figura 1. *Schwartzia chocoensis* Giraldo-Cañas. A. Rama florífera; B. Flor y nectario [Forero et al. 3000 (COL)].

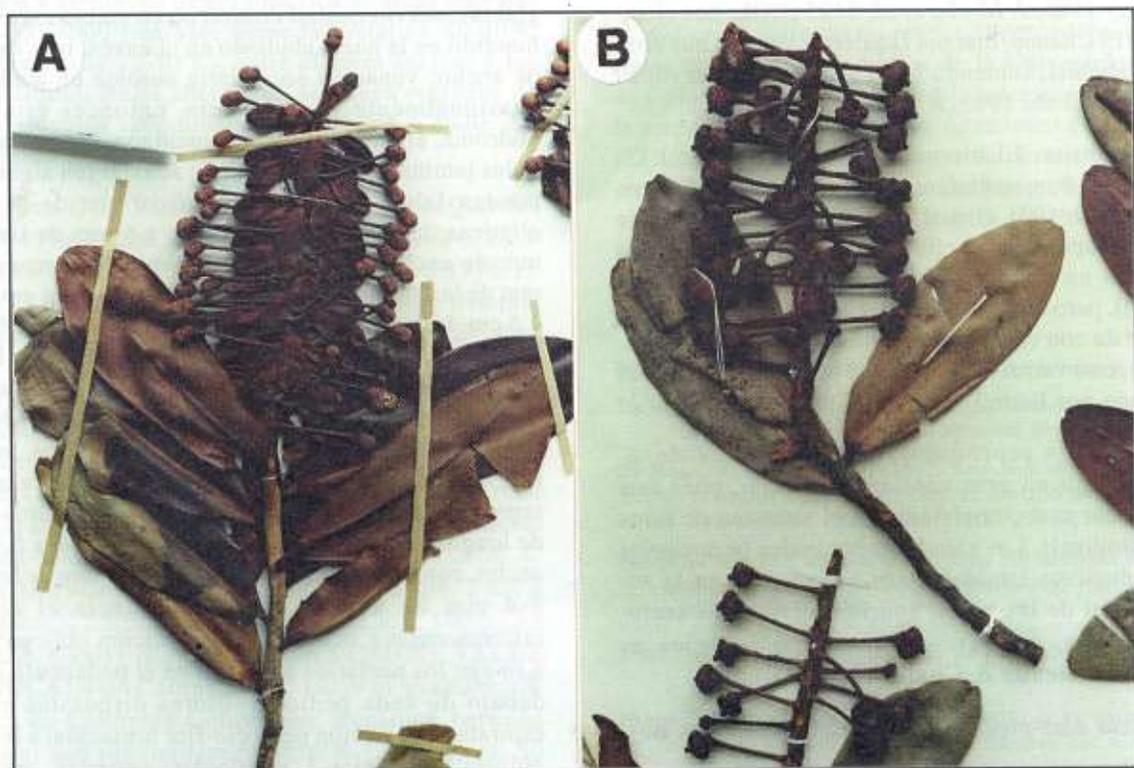


Figura 2. *Schwartzia diaz-piedrahítae* Giraldo-Cañas. A. Rama florífera [Monsalve 484 (COL)]; B. Rama fructífera [Forero et al. 1175 (COL)].

Etimología. *Schwartzia chocoensis* sólo se conoce de la región del Chocó Biogeográfico, de donde fue tomado el epíteto específico.

Distribución geográfica y ecológica. *Schwartzia chocoensis* crece en bosques maduros, en manglares, en bosques secundarios, en riberas de grandes ríos y en bordes de bosques de áreas muy húmedas a pluviales, entre el nivel del mar y los 1600 m de altitud. Hasta ahora sólo se tienen registros de los departamentos colombianos del Chocó y Valle del Cauca (región del Chocó Biogeográfico).

Paratypus. COLOMBIA. CHOCÓ: 4 km de Quibdó hacia Guayabal, al lado de la carretera, junto al río Hugó, ca. 50 m, 9 ago 1982, L. Albert de Escobar et al. 2229 (HUA). Carretera Quibdó-Guayabal, Duatá, margen derecha del río Duatá, 40 m, 27 abr 1975, E. Forero et al. 1293 (COL). VALLE DEL CAUCA: Bajo Calima, ca. 100 m, 25 mar 1961, I. Cabrera 440 (COL). Bajo Calima, ca. 10 km due N of Buenaventura, Cartón de Colombia Concession, transition between tropical wet and pluvial forest, 3°56'N-77°08'O, ca. 50 m, 7 dic 1981, A. Gentry 35421 (COL). Bahía Málaga, mangroves, mouth of Quebrada Sierpe, 4°0'N-77°15'O, sea level, 17 feb 1983, A. Gentry et al. 40423 (COL). Bajo Calima, Dindo area, 3°59'N-76°58'O, ca. 100 m, 11 jul 1984, A. Gentry et al. 47886 (COL). Mun. Buenaventura, quebrada San Joaquín, Concesión Pulpapel, 100 m, 7 may 1968, J. Idrobo et al. 6195 (COL, dos ejemplares). Río El Chanco, margen izquierda, camino que conduce a Aguabonita, subiendo hacia la cabecera del río El Chanco, 400 m, 3 abr 1985, R. Ruiz et al. 94 (COL).

Observaciones. El binomio *Schwartzia foreroi* De Roon & Bedell, *nomen nudum*, aparece citado en Forero & Gentry (1989: 103), el cual hace referencia a la especie que aquí se propone, pues cita dos de los ejemplares que se consideran en esta contribución [Forero et al. 1293, 3000 (COL)], pero este nombre nunca fue publicado. Igual situación se da con el binomio *Schwartzia foreroi* Bedell, el que aparece en varios ejemplares de herbario, pero nunca fue publicado por Bedell.

Los nectarios reproductivos pedicelares de *S. chocoensis* producen gran cantidad de néctar, pues éste alcanza a llenar casi completamente el volumen de éstos (corte longitudinal). Las glándulas laminales (= nectarios extra-reproductivos laminales), presentes sólo en la superficie abaxial de las hojas, podrían servir en la secreción de resinas, aunque su función fisiológica es desconocida (Metcalf & Chalk, 1950: 200).

Schwartzia diaz-piedrahitae Giraldo-Cañas, sp. nov. (Fig. 2).

Typus. COLOMBIA. VALLE DEL CAUCA: Bajo Calima, Concesión Pulpapel/Buenaventura, 3°55'N-77°O, 100 m, 17 oct 1984, M. Monsalve 484 (holotypus COL, isotypus JAUM).

Frutex foliis spiraliter alternantibus, petiolis (0,2-) 0,3-0,5 (-0,6) cm longis, laminis (3-) 5-12,5 cm longis et (1,3-) 1,8-4,5 cm latis, 0-8 hidatodiis donatis. Racemus multiflorus. Flores 28-46, pedicellis (1,6-) 2,2-2,8 (-3,5) cm longis; bracteolae 2, oppositae, orbiculatae, verruculosae; bractea floralis sacciformibus, ad basin pedicellorum insertis, 1,1-2,2 cm longa et 0,5-0,9 cm lata; sepalis 5, orbiculatis, verruculosis; petalis 5, sub anthesi findens petalis deinde reflexis; stamina 14, antheris oblongis, filamentis appanatis, verruculosis; ovario globoso-conico. Fructu globoso, stylo apiculato.

Arbustos escandentes, epífitos a hemiepífitos, profusamente ramificados; tallos cilíndricos, levemente estriados a lisos; corteza castaño, ocasionalmente escamosa. Hojas espiraladas, cortamente pecioladas; pecíolo recurvado, canaliculado (el canal muy angosto y poco profundo, ca. 1 mm de ancho), castaño claro a negruzco, de (2-) 3-5 (-6) mm de longitud x 2 (-4) mm de ancho; láminas elípticas a oblongas, de (3-) 5-12,5 cm de longitud x (1,3-) 1,8-4,5 cm de ancho, enteras, con márgenes ligeramente revolutos y engrosados, coriáceas, glabras; nervio medial conspicuo en ambas caras, plano a hundido en la haz y abultado en el envés, liso, de 1-3 mm de ancho; venación secundaria ausente en ambas caras, ocasionalmente poco notoria, entonces ésta broquidódroma; ápice ligeramente apiculado; 0-4 pares de glándulas laminales en la superficie abaxial (en algunas hojas pueden faltar), localizadas a 6-10 mm de la margen, elípticas, levemente elevadas, de 1,5 mm de largo x 0,8 mm de ancho, con su orificio ovoide, negruzco, de 0,7 mm de largo x 0,4 mm de ancho, distanciadas entre sí 1,5-4,5 cm. Inflorescencia terminal, racemosa, multiflora (28-54 flores), densa; pedúnculo de (7-) 8-11 cm de longitud; pedicelos de (1,6-) 2,2-2,8 (-3,5) cm de longitud, rectos, lisos a levemente estriados, castaño oscuros. Nectarios (brácteas nectaríferas) sacciformes, péndulos, verde claros, uno por pedicelo, estriados longitudinalmente, ligeramente verruculosos, pecíolos de los nectarios 1-2 mm de longitud, urnas de 11-22 mm de longitud x 5-9 mm de ancho, con los orificios ovoides, de 4-7 mm de longitud x 3-4 mm de ancho, dispuestos hacia el eje de la inflorescencia y ocupando una posición oblicua respecto a su eje; los nectarios naciendo en el pedúnculo justo por debajo de cada pedicelo. Flores dispuestas en forma espiralada, inserción pedicelo-flor horizontal a levemente oblicua; bractéolas 2, sepaloides, opuestas, orbiculares,

verruculosas, carnosas, breves, de 1.8-3 mm de longitud; sépalos 5, imbricados en dos series, orbiculares, verruculosos, carnosos, de 2-2.5 mm de longitud; pétalos 5, connatos basalmente ca. 1/5 de su longitud, ovados, reflexos en la anthesis, de 5-7 mm de longitud x 4-5 mm de ancho, carnosos, verde claros; estambres 14, filamentos de 2.4-2.7 mm de longitud x ca. 1 mm de ancho, aplanados, levemente verruculosos, adnatos a la base de los pétalos, anteras introrsas, oblongas, basifijas, ca. 2 mm de longitud x ca. 0.5 mm de ancho; ovario súpero, globoso a cónico, ligeramente estriado, 4-5 mm de longitud x 3-3.5 mm de ancho. Fruto globoso, carnoso, apiculado, liso a levemente rugoso, de 5.5-10 mm de longitud x 8-11 mm de ancho, verde claro; semillas reniformes, profusamente reticuladas, castaño oscuras, brillantes, numerosas (10-15 por fruto), 2-3 mm de longitud x ca. 0.9 mm de ancho.

Etimología. Esta nueva especie la dedico al Prof. Santiago Díaz-Piedrahita (COL), destacado botánico colombiano, estudioso de la familia Asteraceae, quien con sus numerosos y valiosos aportes ha contribuido significativamente al conocimiento de la rica flora colombiana y de la historia de la Ciencia en Colombia.

Distribución geográfica y ecológica. *Schwartzia diaz-piedrahitae* crece en bosques maduros, en bosques secundarios y en riberas de grandes ríos de áreas muy húmedas (6000-8000 mm/año, humedad relativa 80-90%, temperatura media 22-30°C), entre el nivel del mar y los 400 m de altitud. Hasta ahora sólo se tienen registros de los departamentos colombianos del Chocó y Valle del Cauca (región del Chocó Biogeográfico).

Paratypus. COLOMBIA. CHOCÓ: carretera Quibdó-Guayabal, 40 m, 24 abr 1975, *E. Forero et al. 1175* (COL). Carretera Yuto-Lloró, 1 km de Yuto, 70 m, 8 sep 1976, *E. Forero & R. Jaramillo 2696* (COL, HUA). Mun. Itsmina, quebrada Raspadura, entre Raspadura y Quiadó, divorcio de aguas de las hoyas del río Atrato y del río San Juan, 5°15'N-76°38'O, 18 abr 1979, *E. Forero & R. Jaramillo 5296* (COL, dos ejemplares). Mun. Quibdó, carretera Quibdó-Yuto, km 8-9, ramal hacia El Real de Tanandó, 80 m, 29 jun 1983, *E. Forero et al. 9594* (COL). New road being built from S of Yuto to Lloró, mature pluvial forest being semi-selectively logged, 100 m, 17 ago 1976, *A. Gentry & M. Fallen 17812* (COL). Road to Lloró, 2 km S of Yuto, pluvial forest, mostly on lateritic soil, 100 m, 13 jun 1982, *A. Gentry & J. Brand 36815* (JAUM). VALLE DEL CAUCA: Bajo Calima, ca. 15 km N of Buenaventura, Cartón de Colombia Concession, transition between tropical wet and pluvial forest, 3°56'N-77°08'O, ca. 50 m, 16 feb 1983, *A. Gentry et al. 40385* (COL, JAUM), 18

feb 1983, *A. Gentry & A. Juncosa 40463* (COL, JAUM). Bajo Calima, road to Juanchaco Palmeras, pluvial forest, 3°55'N-77°02'O, ca. 50 m, 10 jul 1984, *A. Gentry et al. 47818* (JAUM); 18 jul 1984, *A. Gentry et al. 48302* (COL, JAUM). Mun. Buenaventura, community of San Isidro, secondary vegetation along unpaved road from San Isidro to Juanchaco and in dense secondary forest of treelets and shrubs dominated by *Vismia* spp., Rubiaceae, and Melastomataceae with dense understory, 4 years after cutting of primary forest, 3°59'N-76°57'O, ca. 230 m, 15 nov/6 dic 1979, *J. van Rooden et al. 446* (COL).

Observaciones. *Schwartzia diaz-piedrahitae* es la única especie dentro del género con los nectarios reproductivos nacidos en el pedúnculo, justo por debajo de cada pedicelo, mientras que en las demás especies del género los nectarios siempre nacen en el pedicelo. Por la posición del nectario reproductivo en la inflorescencia, *S. diaz-piedrahitae* se acerca al género *Sarcopera*, pues en éste los nectarios están insertados en la base de las flores (naciendo en el pedúnculo). No obstante, ambos géneros se diferencian fácilmente, pues en *Sarcopera* las flores son sésiles, mientras que en *Schwartzia* son largamente pediceladas.

Agradecimientos

Quiero manifestar mi profundo reconocimiento al Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia por todas las facilidades que me brindó para la preparación de este trabajo. Agradezco a C. Parra Osorio (COL), a O. Rivera (COL) por su permanente colaboración y a S. Dressler (FR) por facilitarme bibliografía muy valiosa. Al comité editorial y a los jurados por sus valiosos comentarios.

Literatura citada

- Bedell, H. 1989. Marcgraviaceae. Fl. Lesser Antilles 5: 300-310.
- De Roon, A. 1970. Family 121. Marcgraviaceae. En: R. Woodson et al. (eds.), Fl. Panamá. Ann. Missouri Bot. Gard. 57(1): 29-50.
- De Roon, A. & S. Dressler. 1997. New taxa of *Norantea* Aubl. s.l. (Marcgraviaceae) from Central America and adjacent South America. Bot. Jahrb. Syst. 119(3): 327-335.
- Ferreira, G. 1995. Estudo taxonômico das espécies brasileiras do gênero *Norantea* Aublet (Marcgraviaceae). Arq. Jard. Bot. Rio Janeiro 33(2): 9-53.
- Font Quer, P. 1993. *Diccionario de Botánica*. Ed. Labor. S. A., Barcelona.
- Forero, E. & A. Gentry. 1989. *Lista anotada de las plantas del departamento del Chocó, Colombia*. Biblioteca José Jerónimo Triana Nro. 10, Instituto de Ciencias Naturales-Museo de Historia Natural, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. D. E.

- Gilg, E. & E. Werdermann. 1925. Marcgraviaceae. En: A. Engler & K. Prantl (eds.), *Die Natürlichen Pflanzenfamilien*, ed. 2, 21: 94-106.
- Giraldo-Cañas, D. 1999. Las Marcgraviaceae de la Amazonia colombiana: estudio preliminar sobre su diversidad, distribución y fitogeografía. *Darwiniana* 37(1-2): 15-24.
- _____. 2001a. *Schwartzia brasiliensis* (Marcgraviaceae), nueva combinación. *Caldasia* 23(1): 341-342.
- _____. 2001b. Una nueva especie de *Schwartzia* (Marcgraviaceae) de la vertiente occidental andina de Colombia y Ecuador. *Caldasia* 23(2): en prensa.
- Giraldo-Cañas, D. & P. Picca. 1999. Tres nuevos registros de *Marcgravia* (Marcgraviaceae) para la flora mexicana. *Hickenia* 2(62): 289-292.
- Metcalf, C. & L. Chalk. 1950. *Anatomy of the dicotyledons*, vol. I. Clarendon Press, Oxford.
- Picca, P. & D. Giraldo-Cañas. 1999a. Los nectarios de las Marcgraviaceae: morfología, posición, relevancia taxonómica e implicancias evolutivas. Págs 138-139 en: O. Rangel, A. Rudes & J. Aguirre (eds.), *Libro de resúmenes Primer Congreso Colombiano de Botánica*, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D. C.
- _____. & _____. 1999b. Una nueva especie de *Marcgravia* (Marcgraviaceae) de la Amazonia colombiana. *Hickenia* 2(63): 293-298.
- Schmid, R. 1988. Reproductive versus extra-reproductive nectaries: Historical perspective and terminological recommendations. *Botanical Review* 54(2): 179-232.
- Szyszyłowicz, I. 1893. Marcgraviaceae. En: A. Engler & K. Prantl (eds.), *Die Natürlichen Pflanzenfamilien* 3: 157-164.
- Vellozo, J. 1825. *Schwartzia*. *Fl. Flumin.* 5: 221-222.
- Wittmack, L. 1878. Marcgraviaceae. *Fl. Brasiliensis* 12: 212-258.

EL SUELO: MARAVILLOSO TEATRO DE LA VIDA

por

Clara Chamorro Bello*

Resumen

Chamorro Bello C.: El suelo: maravilloso teatro de la vida. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **25**(97): 483-494, 2001. ISSN 0370-3908.

El suelo es el componente básico de los ecosistemas terrestres y en él, especialmente los filos Arthropoda, Annelida y Mollusca se asocian en comunidades de productores, consumidores y transformadores orgánicos de los materiales edáficos, como soporte físico para las plantas.

La edafofauna en Colombia está agrupada en cinco filos, 11 clases, 54 órdenes y 274 familias. En la Orinoquia la clase Insecta alcanza la máxima distribución; en el Bosque Amazónico Insecta y Arácnida y en la Zona Andina, especialmente en los páramos, Diptera, Collembola y Acarina. Annelida frecuenta suelos intervenidos para mejorar sus características físico-químicas y promover la fertilidad del suelo mediante la formación del humus.

Palabras clave: Biología del suelo, comunidades bioedáficas, Arthropoda, Annelida.

Abstract

Soil is an essential part of terrestrial ecosystems. The biological components of soil conform communities of producers, consumers and transformers of the edaphic materials.

Colombian edaphofauna is constituted by five phyla, 11 classes, 54 orders and 274 families. In the Orinoquia, the class Insecta is widely distributed; in the Tropical Rain Forest it is Insecta and Arachnida, while in the Andes (Paramo areas) Diptera, Collembola and Acarina are the most represented taxa; even though Annelida is the phylum most frequently found. It is noteworthy the importance of earthworms as they naturally improve the fertility of Colombian soils.

Key words: Bioedaphology, soil communities, Arthropoda, Annelida.

Introducción

Llego ante ustedes, Honorables Miembros de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, con la humildad de una bióloga que aún persiste en la búsqueda del saber y con el orgullo de una maestra que ha tenido el privilegio de participar en programas de formación avanzada en universidades colombianas y alemanas y el honor de haber ingresado a la Universidad Nacional, en cuyo seno me he realizado como profesional y como académica, formando juventudes para el desarrollo del país.

Cincuenta y seis años de existencia, un poco más de la mitad de ellos dedicados a la noble misión de la docencia y la investigación científica, me han colocado ante situaciones contradictorias en las que cada día me asombran más las invenciones de los científicos o la creatividad de los artistas; pero me aterra no solo la destrucción de tantos componentes bióticos y el agotamiento de los recursos abióticos de nuestro planeta, sino la pérdida de los valores y el desconocimiento de los principios que han hecho posible el desarrollo de las civilizaciones desde el neolítico hasta lograr la conquista del espacio y la lectura del genoma humano. Multitud de personas mueren de hambre, de soledad y abatimiento, víctimas de enfermedades aún incurables o de la violencia indiscriminada; miles y miles de hectáreas de bosques y suelos labrantíos son arrasados y con ellos la fauna y la flora; el agua y el aire son contaminados y todo, aunado a una gran indiferencia colectiva, contribuye a deteriorar la calidad de la vida de los seres humanos.

Seguimos impotentes ante los factores ancestrales de la pobreza sin haber hecho un alto en el camino para reflexionar sobre las flaquezas del mundo que a diario vivimos y padecemos o cuando lo hemos hecho, el remedio ha sido peor que la enfermedad como lo atestiguan, entre cientos de ejemplos, la crueldad de las guerras que se libran a nombre de la paz, la injusticia y la desigualdad social. Continuamos teniendo una visión reduccionista de la problemática y, como estudiosos de las ciencias naturales, hacemos pocos esfuerzos por sumergirnos en las fuentes del humanismo para comprender la complejidad de la condición humana y de los componentes del sistema cultural en aras a internalizar el paradigma ambientalista, como paso fundamental hacia la comprensión de las crisis que en lo emocional, en lo ecológico, en lo social y en lo económico hacen cada vez más difícil alcanzar la utopía del desarrollo sostenible y del mandato bíblico de amarnos los unos a los otros.

Entramos al tercer milenio de la era cristiana navegando entre el azar, la necesidad y la incertidumbre, a

sabiendas de que no es posible penetrar en el significado de la vida sin entender primero o, por lo menos, sin haber pretendido conocer los factores responsables del funcionamiento de un mundo tan complejo en el que los hombres convulsionan entre jolgorios y masacres, entre amores y homicidios o entre la retórica democrática y religiosa y los amargos desfiles fúnebres.

Han pasado cuatrocientos años desde la revolución científica sin dejar de contraponer al extraordinario avance del conocimiento y de la tecnología el avasallador incremento de un mundo absurdo, caótico y desbordado. ¿Cómo han podido consolidarse dos eventos completamente opuestos? ¿Cuál es nuestra responsabilidad ante tan disímiles expresiones de la conducta humana que comparten nuestra cotidianidad en los diferentes rincones del planeta?

Las consideraciones que he hecho y las preguntas que he formulado constituyen el origen del problema de carácter científico que, desde hace casi tres décadas, planteé y trato de resolver echando mano de la experiencia vivida no solamente como bióloga especializada en el campo de los suelos, sino como orientadora asidua del quehacer investigativo de quienes fueron mis alumnos y hoy son mis colegas. Son algunos de los resultados más relevantes de esta tarea los que deseo compartir con ustedes, honorables y distinguidos académicos, no solo para ajustarme al protocolo que el acto demanda, sino como la expresión simbólica de mi agradecimiento a la benemérita institución que decidió acogerme como uno de sus miembros.

Pretendo, en el tiempo que los reglamentos me conceden, presentar el suelo como un maravilloso teatro de la vida deteniéndome un poco en el factor biótico como actor principal de su función y en las particularidades de la fauna del suelo en los distintos ambientes edafogenéticos del país, para finalizar mi disertación mostrando la función que cumplen los organismos del suelo en su conservación y en la recuperación de las áreas que, por distintos motivos, han sido sometidas a fenómenos de destrucción o de disminución de su calidad.

El suelo: teatro de la vida amenazado

El suelo es el componente básico de los ecosistemas terrestres, donde, mediante procesos emergentes, se suceden eventos fundamentales tanto para el sostenimiento de la vida en el planeta, como para la preservación de la diversidad biológica. Sin embargo, el concepto SUELO como un sistema biológico, no siempre está claro en la mente de quienes, de una u otra forma, tienen que ver con

el conocimiento de ese cuerpo natural y con el diseño e implementación de prácticas de manejo para su desarrollo sostenible.

Algunos edafólogos definen al suelo como "un teatro maravilloso de la vida", no sólo por la diversidad que alberga sino porque funciona como reciclador de la materia orgánica y controlador, tanto de la dinámica de la circulación de nutrientes como de los flujos de energía. La optimización de estas interrelaciones bioedáficas depende de un buen equilibrio entre la acumulación y la liberación de los nutrientes y su evolución, así como de otros factores naturales o aquellos inducidos por el hombre.

En los ecosistemas, los procesos mencionados son controlados por sistemas biológicos que magnifican tanto la economía de los nutrientes, como la preservación y la conservación de los suelos. En condiciones naturales se obtiene una estructura clímax entre el suelo y los organismos animales y vegetales.

Para los biólogos, comprender el papel de los organismos del suelo implica conocer su clasificación taxonómica, su desarrollo biológico, su ubicación en el perfil del suelo y sus necesidades alimentarias. Desafortunadamente, hay con frecuencia quienes definen el suelo como un componente abiótico de los ecosistemas e, inclusive, quienes mencionan la existencia de suelos infértiles o estériles. Los primeros olvidan o ignoran que el suelo es un teatro de vida en el que actúa una gama amplia de organismos en su calidad de habitantes temporales o permanentes. Quienes afirman que el suelo puede ser estéril, desconocen que la capa superficial de la corteza terrestre sólo alcanza la condición de suelo si contiene materia viviente y si soporta o es capaz de soportar plantas (Fig. 1).

Los organismos animales y vegetales no sólo son parte esencial del suelo, sino que juegan un papel fundamental en su formación, no importa que se trate de bacterias microscópicas o de grandes mamíferos, incluido el hombre. Cada uno de los organismos que viven en la superficie, o dentro del suelo, marca su ingerencia en el desarrollo de este cuerpo natural. Sin duda, los procesos más importantes durante la génesis de un suelo, tienen que ver con la captura de energía y de sustancias a través de la fotosíntesis, con el proceso contrario o sea' el de la descomposición de los residuos de las plantas, con el intercambio de nutrientes y con la formación de complejos orgánico-minerales.

Entre la enorme variedad de características del suelo producidas por la presencia de la edafobiota, vale la pena resaltar el espacio poroso, la concentración de sustancias

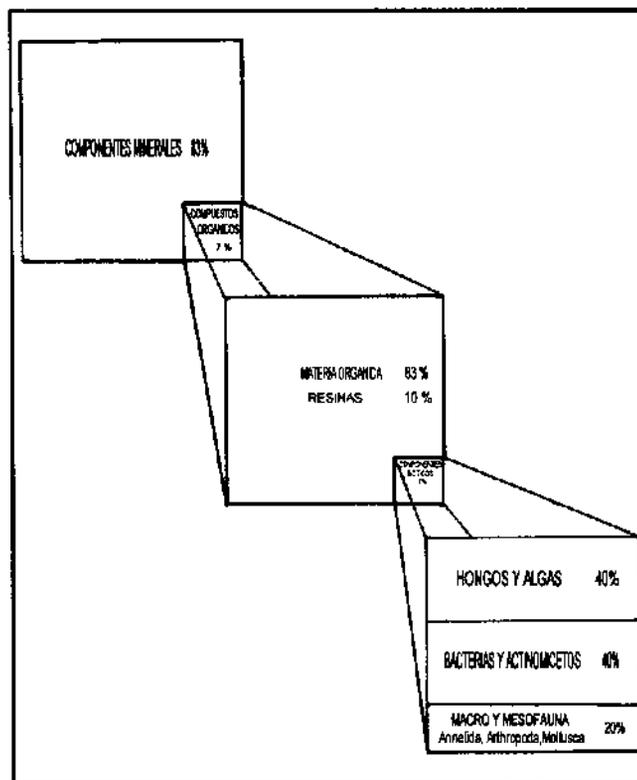


Figura 1. Composición general del ecosistema suelo.

orgánicas y minerales, ciertas irregularidades en la superficie del terreno y la formación de la estructura, la cual ejerce funciones de vital importancia para el uso y la preservación del humus. La estructura granular de los horizontes superficiales oscuros del suelo, por ejemplo, es atribuida al trabajo metabólico y digestivo de la comunidad de animales del suelo, especialmente de los insectos y las lombrices de tierra.

El reordenamiento de los materiales del suelo como resultado de la actividad realizada por las plantas y los animales, induce modificaciones en la superficie del terreno, produce canales que posteriormente son llenados y que, junto con otras huellas, ayudan a caracterizar los horizontes que conforman el perfil del suelo. Los componentes minerales liberados durante la descomposición de la materia orgánica son, en gran parte, reabsorbidos por los organismos; los ritmos y ciclos de esta actividad biológica y de las transformaciones que se producen en el suelo son de índole diaria, estacional, anual y multianual.

Es indudable que la vida en el planeta ha dependido y continuará dependiendo del suelo porque, a su vez, la vida que allí se desarrolla es creadora de humus que es

sinónimo de productividad; lastimosamente, la vida en el suelo está constantemente amenazada por múltiples factores entre los cuales vale la pena destacar la fumigación masiva con funguicidas, insecticidas, matamalezas y agroquímicos, de efectos desastrosos. Razón tuvo el naturalista **Enrique Pérez Arbeláez** (1953), cuando afirmó que "las avionetas fumigadoras son el quinto caballo del Apocalipsis".

La destrucción de los bosques húmedos tropicales, la expansión de las ciudades sobre las mejores tierras agrícolas, los conflictos de uso del suelo, la quema indiscriminada, la contaminación por basuras y desechos de la industria a cambio del reciclaje racional de los residuos biodegradables, y la erosión que decapita preferencialmente las capas con mayores contenidos de humus y organismos, son otros fenómenos que atentan contra el mantenimiento de los sistemas vitales y la diversidad biológica en el suelo.

Además de las consideraciones anteriores, es importante anotar que un bajo nivel de educación ecológica y ambiental, así como el afán de enriquecimiento fácil y rápido, hoy característico de diversos niveles de la sociedad colombiana, unido al incumplimiento de las disposiciones legales sobre conservación y utilización racional de los recursos naturales, constituyen barreras infranqueables para el buen manejo del suelo.

No se puede olvidar que el destino de los hombres está irremediamente atado al del suelo, y que éste es el resultado de su inteligencia creadora o de su instinto destructor. El suelo manejado convenientemente es, a no dudarlo, un maravilloso teatro de la vida; sin embargo, ésta solo florece en medio de la paz y el bienestar de la familia humana; si se persiste en la acción irracional, que todo lo destruye en aras del enriquecimiento rápido y en contra del país y de las generaciones venideras, el suelo se convierte, tal como lo estamos viendo, en doloroso escenario de la muerte.

Los organismos del suelo: actores principales de la edafogénesis

Los ecosistemas terrestres difieren claramente de una localidad geográfica a otra; las diferencias sistémicas se manifiestan por las variaciones climáticas, geomorfológicas, orogénicas y, muy especialmente, por la presencia temporal o permanente de organismos vivos, incluida la fauna edáfica.

Casi todos los grupos de plantas y animales que viven en el suelo actúan modificando su composición y su es-

tructura y alterando o regulando su funcionamiento y sus ciclos biológicos. Esta es la razón principal por la cual se considera que el suelo es el componente básico de los ecosistemas terrestres, en donde funciona no solamente como soporte físico y de niveles tróficos para las plantas, sino como reciclador de los materiales orgánicos y de los residuos biodegradables; tales funciones son el resultado del trabajo organizado entre asociaciones de micro- meso- y macroorganismos, asociaciones que varían de acuerdo a las características del suelo, flujos de energía y participación del hombre en el uso y manejo de este sistema abierto.

Los componentes biológicos del suelo constituyen además una comunidad organizada y muy bien balanceada entre productores, consumidores y transformadores; el tamaño de sus poblaciones depende del espacio disponible en la fase porosa del suelo, del alimento primario y de las condiciones climáticas que rigen su tasa de crecimiento, duración del ciclo de vida y cumplimiento de sus nichos (actividad específica a cada una de las poblaciones presentes en el ecosistema).

Las comunidades bioedáficas están conformadas generalmente por protistas de la microfauna y microflora, y además por organismos de los filos Arthropoda, Annelida y Mollusca; estas comunidades ocupan hábitats de bosques, selvas y praderas, donde encuentran humedad y alimento necesario para subsistir, gracias a la sinergia desarrollada entre los diferentes organismos, el clima y el material parental, sobre un relieve específico y en un tiempo determinado para preservar y, cuando es necesario, recuperar el sistema suelo a través de su proceso evolutivo.

El desarrollo de procesos y metodologías, específicas para la recolección de muestras representativas de la biota edáfica ha hecho posible cultivar estos organismos en cautiverio para medir su biomasa y su capacidad de asimilación de alimento, su respiración y crecimiento, así como para analizar la dinámica poblacional y perfeccionar la taxonomía de los mismos en aras de relacionar todos estos parámetros con las características del medio donde habitan. Mediante estas estrategias, hoy se sabe con certeza que en el suelo existen organismos de diverso tamaño corporal en hábitats diferentes y apropiados para desempeñar las actividades propias de su desarrollo y para el mantenimiento del sistema (**Chamorro, 1995**).

Los organismos vivos se caracterizan con fines taxonómicos, ecológicos, económicos o categóricos. La comunidad de animales del suelo ha sido clasificada por diversos investigadores, según su disciplina de trabajo, en términos de hábitos alimenticios, tamaño de sus cuer-

pos y ubicación en el perfil del suelo para el desarrollo de nichos ecológicos, específicos a cada población de individuos.

En 1970, **Wallwork** estableció un sistema de clasificación de la fauna edáfica, de acuerdo con su tamaño, en micro- meso y macrofauna (Figura 2). Los organismos del suelo de tamaño superior a un centímetro, especialmente los correspondientes a los filos Annelida, Arthropoda y Mollusca hacen parte de la macrofauna edáfica, aspecto principal de interés de este trabajo. Posteriormente, en el año de 1979, se agregó a la propuesta anterior el nivel de la megafauna, para involucrar los animales cuyo tamaño es mayor de dos centímetros y que establecen de alguna manera relación con el suelo.

Los organismos del suelo desarrollan diversos hábitos de alimentación; algunos son saprófagos, es decir, se alimentan de tejidos vegetales en avanzado estado de descomposición o son necrófagos cuando consumen animales muertos; otros son coprófagos y utilizan como fuente nutricional excrementos de otros animales; los consumidores o heterótrofos obtienen su alimento de organismos vivos animales o vegetales tanto como los depredadores que toman como presa a otros animales vivos. Algunos de ellos, los geobiontes, habitan permanentemente en el suelo

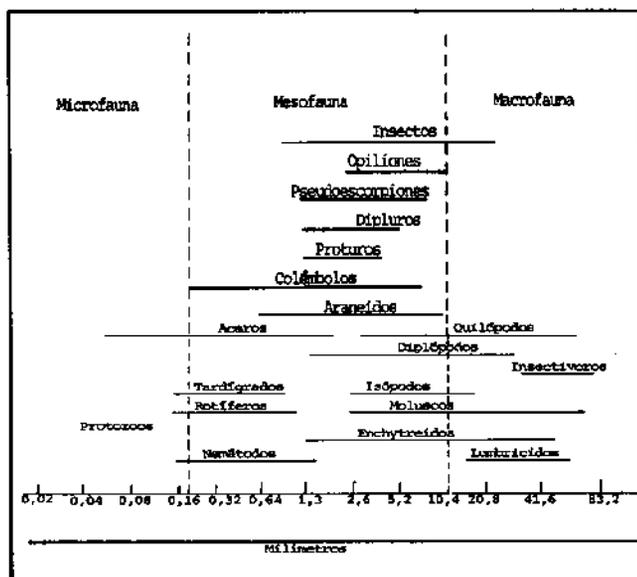


Figura 2. Clasificación de la fauna del suelo según su tamaño.

y otros, los geófilos, pasan solo parte de su vida dentro de éste (Figura 3).

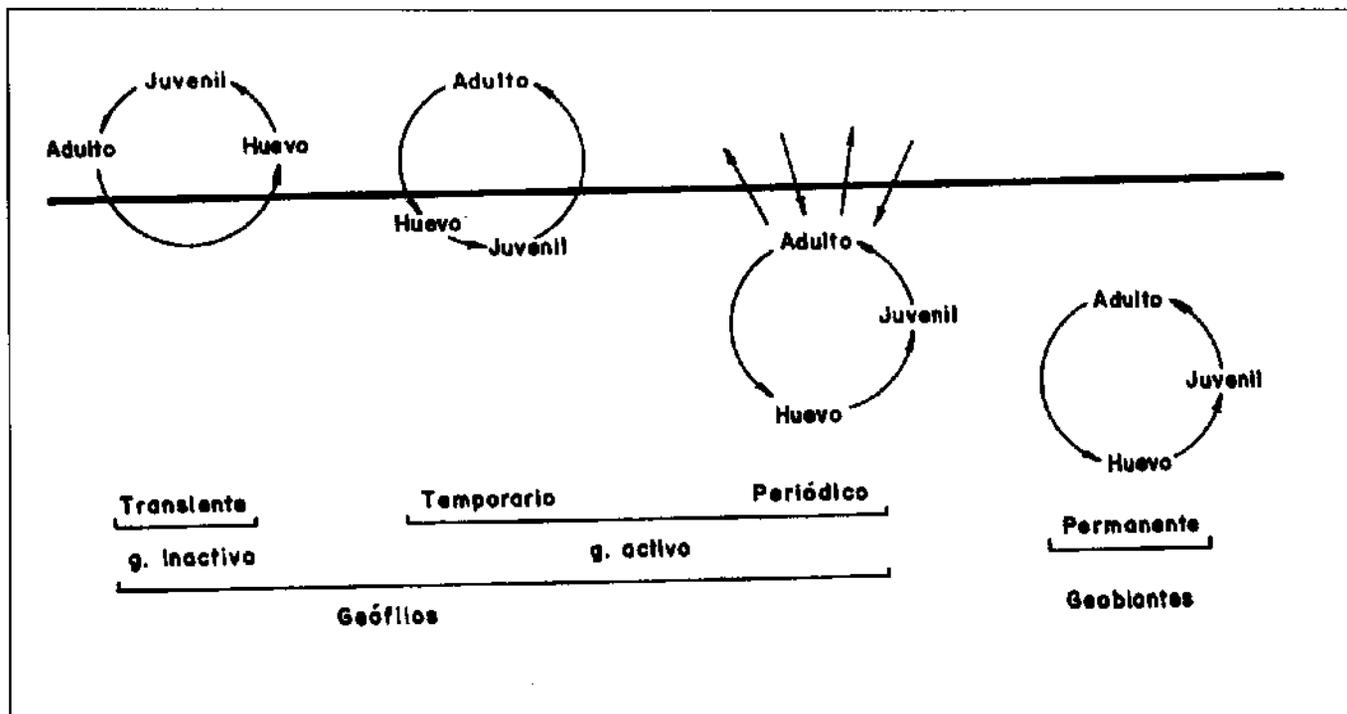


Figura 3. Clasificación de la edafofauna de acuerdo a su permanencia en el suelo.

Cada tipo de suelo tiene su propia población de organismos vivos, determinada por las condiciones edáficas y ecológicas del medio; los factores más condicionantes para su desarrollo son la presencia o ausencia de oxígeno, la disponibilidad de alimentos, el contenido de humedad y la acidez del suelo. La fauna edáfica de un suelo bien drenado es muy diferente a la de uno de drenaje pobre; los suelos de las regiones áridas presentan organismos vivos que difieren en sus características de aquellos de suelos en zonas húmedas; así, se podrían continuar enumerando medios edáficos contrastantes para enfatizar en la diversidad biológica que existe en este exuberante teatro de la vida.

Analizar la composición orgánica de un suelo determinado, a través de su edafofauna requiere determinar su organización taxonómica y, además establecer claramente sus nichos, hábitos alimenticios y ciclos biológicos. Sería interminable caracterizar cada una de las 274 familias taxonómicas de organismos encontrados en suelos colombianos, y por ello, a continuación solo esbozaré los principales parámetros que caracterizan los grupos bioedáficos más representativos en los suelos tropicales, estudiados durante los últimos veinte años como punto central del Programa "*Biología de los suelos colombianos*" bajo mi orientación, y con la participación de biólogos, agrólogos, zootecnistas y agrónomos en su mayoría tesisistas de pre y posgrado de la Universidad Nacional. (IGAC 1990, 1993, 1996, 2000).

Filon arthropoda

Los organismos más representativos tanto de la mesofauna como de la macrofauna edáfica pertenecen a los filones Arthropoda y Annelida. Ellos contribuyen con su trabajo, al desarrollo del suelo y la conservación de su fertilidad. Es especialmente significativa la participación de los colémbolos y los ácaros, ya que constituyen las mayores poblaciones de artrópodos del suelo. Otros grupos importantes son Myriapoda dentro del cual se destacan los Quilópodos, junto con los Sínfilos y los Diplópodos; en Insecta es importante resaltar la actividad de los Isópteros (termites), Dípteros, Himenópteros (hormigas), algunos Lepidópteros y, muy especialmente los Coleópteros (cucarrones).

Clase insecta

Brown (1991) tomado de Camero (1998), calcula que aproximadamente la tercera parte de los insectos del mundo se encuentra en el Neotrópico, especialmente en Brasil, Perú y Colombia; la mayoría son especies endémicas aún no estudiadas, que ocupan microhábitats muy diná-

micos donde las perturbaciones menores no causan grandes extinciones; sin embargo, las comunidades de grandes biomas son demasiado frágiles aún en ecosistemas regionales maduros.

Orden Hymenoptera

Galvis & Valencia, establecieron en el año de 1975 que, tanto las hormigas como los termites seleccionan por tamaño las partículas del suelo –arena, limo y arcilla– para transportarlas desde los horizontes inferiores hasta la superficie del perfil del suelo, donde construyen sus nidos o montículos, pero también pueden organizar sus habitats, a manera de galerías, hasta seis metros por debajo de la superficie del suelo. Estas actividades favorecen además las características físicas, químicas y biológicas del suelo, facilitando e incrementando el flujo del agua y aire en la fase porosa del mismo. La penetración del sistema radicular de las plantas, junto al incremento de micro y macro-organismos, reduce en mayores contenidos de materiales orgánicos; estos procesos y la concentración de cationes intercambiables propician la mineralización de la materia orgánica, con lo que se mantiene la fertilidad del suelo y se garantiza la relación suelo-planta-animal-hombre.

Orden Collembola

Del orden Collembola se conocen más de 6.000 especies, lo cual significa la mayor distribución en el medio edáfico e importancia para la comunidad de organismos, ya que son alimento de otros artrópodos carnívoros. Los collembola habitan especialmente las capas orgánicas del suelo, debido a que allí se encuentra la mayor actividad de descomposición y una mejor disponibilidad de alimentos y espacio poroso para su alojamiento, condiciones que disminuyen a mayor profundidad del suelo. La actividad de los collembola en el suelo contribuye a liberar NH₄ y aumentar los niveles de calcio en el suelo.

Orden Coleoptera

Este grupo, con más de 6000 especies clasificadas taxonómicamente es, al igual que Diptera, el más diverso y abundante de la clase Insecta. La presencia de Coleoptera en el suelo deriva en la transformación de residuos biodegradables, especialmente estiércol depositado sobre la superficie, el cual al ser transformado es posteriormente incorporado al sistema edáfico en forma de crotovinas, a través de los túneles y canales que los coleópteros excavan con lo que se facilita la infiltración del agua del suelo y el proceso de aireación.

Según Camero & Chamorro (1999), los coleópteros representan en Colombia el 10% de la entomofauna del suelo, equivalente a 45% de las familias de coleópteros del mundo. En las regiones naturales de Colombia, con excepción del Caribe, se han identificado 51 familias taxonómicas; la mayoría de ellas –mayor diversidad– habita los bosques altoandinos, pero es en los bosques húmedos tropicales donde se encuentran las poblaciones de mayor riqueza. Diferencias tan significativas en diversidad y riqueza se deben a las características propias de los suelos de cada región, así como al uso y manejo de los ecosistemas.

Durante los diferentes estadios del ciclo biológico, estos organismos, característicos del suelo, depositan además de sus exuvias todo su cuerpo, o parte de él, incrementando así la fase orgánica del sistema edáfico; así mismo, los residuos metabólicos excretados por los escarabajos o coleópteros aumentan los niveles de fósforo y potasio, esenciales en la relación suelo – planta.

Orden Isoptera

Se conocen aproximadamente 2500 especies de termitas, organismos sociales descubiertos en 1781 en la Costa de Guinea por un navegante holandés, y registrados como "hormigas blancas" en la Royal Society de Londres por el naturalista Henry Smeathmann (Wendt, 1980). Estos animales se distribuyen geográficamente entre los 45 grados norte y los 45 grados sur, siempre y cuando el suelo no presente ni acidez ni saturación de agua extremas, como tampoco ausencia de cobertura vegetal. Los isópteros se encuentran siempre a alturas inferiores a los 2000 msnm.

Los termitas construyen sus propios hábitats o termiteros hasta de nueve metros de altura y con posibilidades de funcionamiento máximo de 60 años. Esta característica ecológica hace de los termitas grupos dominantes en suelos tropicales, donde introducen modificaciones físicas a través de la selección y redistribución de las partículas minerales; dichos cambios se reflejan en las texturas finas dominantes de los horizontes superficiales y en los materiales para la construcción de sus nidos.

El material, transformado física y químicamente en el tracto digestivo de los termitas y utilizado como producto residual para la construcción de sus nidos, tiene contenidos altos de carbono y nitrógeno orgánicos, importantes concentraciones de cationes intercambiables y materia orgánica, comparados éstos con los contenidos en suelos adyacentes no trabajados por estos organismos del suelo.

Orden Lepidoptera

Solamente los estados larvales y pupales de las mariposas tienen relación directa aunque pasiva con el ambiente edáfico, a través de sus hábitos alimenticios de tipo fitófago.

Clase arachnida

Los escorpiones, las arañas, los opiliones, los pseudoescorpiones y los ácaros conforman el mayor grupo depredador del suelo; generalmente, habitan el horizonte orgánico cuando existe y la vegetación superficial.

Orden Acari

Los ácaros colonizan ambientes terrestres de cuevas, grietas, nidos de invertebrados y de aves y además madrigueras de mamíferos. Sus hábitos alimenticios pueden ser tanto predadores, como saprófagos y omnívoros. Su acomodación en el perfil del suelo varía con la profundidad de éste y con el tamaño de los organismos, así: los ácaros de cuerpos grandes son frecuentes en la porción orgánica del suelo; los de tamaños corporales medianos o muy pequeños, se distribuyen indiscriminadamente a lo largo y ancho del perfil edáfico, es decir, tanto en los horizontes con mayores contenidos de materiales orgánicos como en los de naturaleza predominantemente mineral.

Filon Annelida

Los filones Annelida (annellus = anillo) y Arthropoda son quizá los habitantes del suelo más conocidos. Su existencia se remonta a la era Paleozoica temprana, hace aproximadamente 600 millones de años. Inicialmente, se describieron con las características de los Poliquetos, como formas muy primitivas, pero con la probabilidad de que el anélido ancestral hubiese sido un organismo marino, con una cabeza seguida por muchos segmentos iguales.

Se conocen alrededor de 4500 especies de lombrices de tierra identificadas taxonómicamente; el 92% son endémicas o de distribución restringida y solamente el 8% son peregrinas o de amplia distribución en el globo terráqueo; las zonas desérticas y los nevados son prácticamente las únicas limitantes naturales para su migración.

Se presume que los anélidos, de amplia distribución geográfica, han sido transportados por el hombre accidentalmente o con fines de recuperación o mejoramiento de suelos, ya que una de sus características es justamente la de colonizar suelos alterados por mal uso y manejo. Las especies endémicas o nativas requieren para su adaptación y permanencia sistemas edáficos equilibrados, los

cuales generalmente están preservados geográficamente por cuerpos de agua (lagos, ríos) y relieves montañosos (Figura 4).

Las lombrices de tierra se adaptan y soportan sin mayores dificultades alteraciones climáticas y de alimentación, pero son sensibles a cambios de humedad del suelo ya que ésta es esencial no solamente para mantener el equilibrio fisiológico del organismo, sino también como medio para evitar y prevenir lesiones epiteliales (Chamorro, 1983).

En Colombia, la década de los años setenta marcó el inicio de una etapa promisoriosa para el desarrollo de la Biología del Suelo, gracias al interés mutuo y al trabajo mancomunado de entes académicos y estatales como el Departamento de Biología de la Universidad Nacional, la Universidad de Bogotá "Jorge Tadeo Lozano" y la Subdirección Agrológica del Instituto Geográfico "Agustín Codazzi". Los estudios intensivos, inicialmente sobre la biología de la lombriz de tierra, sus aspectos ecológicos y taxonómicos, motivaron e incentivaron a más de una treintena de biólogos tesisistas o jóvenes investigadores por conocer las relaciones ecológicas no sólo de las lombrices de tierra con su hábitat, sino con los otros miembros de la comunidad bioedáfica y con los hombres que labran la tierra; estos organismos desarrollan funciones de transformación y transporte de materiales a lo largo y ancho de los suelos, especialmente los agrícolas, para la fertilización, la conservación y, cuando es necesario, para la recuperación del medio edáfico (Chamorro, 1981).

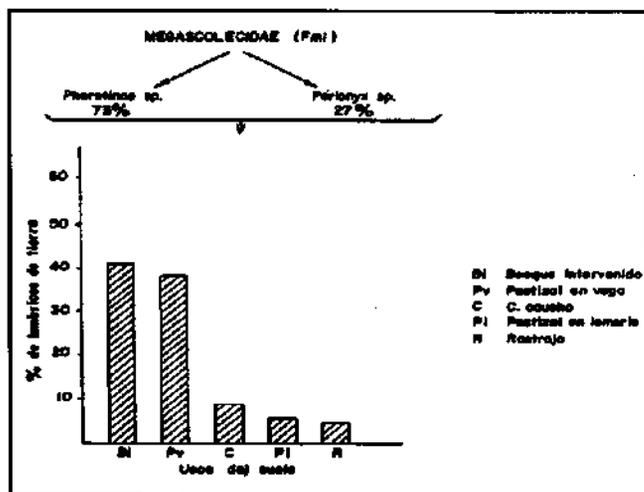


Figura 4. Distribución de las lombrices de tierra bajo diferentes usos del suelo. (Caquetá-Colombia).

Además de las funciones atribuidas a las lombrices de tierra, éstas son consideradas indicadores biológicos de alta sensibilidad ante la presencia de contaminantes, especialmente agroquímicos. Ante la agregación de fertilizantes orgánicos, las poblaciones de lombrices se incrementan significativamente y gracias a su metabolismo ejercen un efecto positivo sobre las poblaciones de microorganismos.

Los pesticidas, especialmente los organofosforados así como los metales pesados, aún en pequeñas dosis, suelen ser altamente agresivos para las lombrices las cuales sucumben rápidamente; tras las aplicaciones, tales sustancias y elementos también se acumulan en los tejidos grasos de estos animales que, de esa forma transportan los pesticidas desde la superficie del suelo hacia la profundidad, donde se concentran las mayores poblaciones de plagas; así, contribuyen a degradar en sus organismos los agroquímicos asimilados, a aumentar el efecto de los plaguicidas y, al mismo tiempo, gracias a su metabolismo liberan de contaminantes el medio edáfico (Rodríguez, Velásquez, Chamorro & Martínez, 1992).

Filon Mollusca

La importancia edáfica de estos organismos, catalogados como fauna edáfica secundaria, radica en el aporte de grandes cantidades de residuos vegetales desmenuzados, macerados y pre-digeridos, como un preámbulo al desarrollo de los ciclos bioedafológicos. Los gasterópodos omnívoros y zoófagos contribuyen a enriquecer las cadenas alimenticias del sistema, en tanto que los carroñeros incorporan materia orgánica al suelo; la producción de sus abundantes secreciones mucosas propicia la formación de agregados del suelo muy bien estructurados y estables a la acción del viento y del agua; en estas condiciones el material mucoso se convierte en un medio propicio para el asentamiento y desarrollo de la microflora del suelo.

Muchos caracoles y babosas depositan sus huevos a 15 centímetros de profundidad en el suelo, como una forma de preservar su prole de la mortalidad causada por las bajas temperaturas, especialmente en épocas de abundantes lluvias. La distribución de estos macroorganismos está relacionada con el pH del suelo, inducido por la disponibilidad del calcio asimilable por las plantas; ellos seleccionan como hábitat ideal profundidades entre 15 y 40 centímetros de suelos porosos y ricos en contenidos de calcio.

La macrofauna en el mosaico edáfico colombiano

La capacidad productiva del suelo como recurso natural, biótico y renovable, se pone de manifiesto a través de los organismos que intervienen en su composición y que

actúan junto con el material parental, en un relieve determinado y bajo factores climáticos específicos.

Cada una de las cinco regiones naturales del país—Amazonia, Orinoquia, Caribe, Andén, Pacífico y la Zona Andina— con factores formadores de suelos diferentes, alberga comunidades edafofaunísticas diversas.

A finales de de los años ochenta, biólogos de la Universidad Nacional y Agrólogos del Instituto Geográfico "Agustín Codazzi" unieron sus intereses, experiencias y esfuerzos para emprender el trabajo de caracterización bioedáfica en trece sitios representativos de las diferentes regiones del país. Estos sitios son:

La Sabana de Bogotá y los páramos de Chisacá, Chingaza, Neusa, Monserrate y la Regadera en la Región Andina; las localidades de Marandúa, Puerto Carreño y Caño Limón en la Orinoquia; el Parque Natural de Amacayacu, entre Leticia y Puerto Nariño, el piedemonte caqueteño en inmediaciones de Florencia, Cartagena del Chaira y San Vicente del Caguán, y la zona central del Vaupés, en inmediaciones del municipio de Mitú en la Amazonia, y la isla de Gorgona en el Pacífico.

Los muestreos se realizaron en suelos vírgenes y bajo circunstancias de intervención *antrópica*, teniendo en cuenta las recomendaciones de los edafólogos. En cada sitio se tomaron, generalmente, seis unidades de muestreo, utilizando para la captura de la fauna edáfica en el campo metodologías Barber y Nelson o extracción manual, siem-

pre en dos estaciones climáticas contrastantes: húmeda y seca (Figura 5).

Diversidad bioedáfica

Las comunidades de animales que habitan permanentemente el ecosistema suelo, pertenecen taxonómicamente a los filones Arthropoda, Annelida, Mollusca, Nematoda y Chordata.

Arthropoda con las clases Insecta, Symphyla, Arachnida, Malacostraca, Pauropoda, Chilopoda y Diplopoda; *Annelida* con la clase Oligochaeta, los órdenes Ophistopora, Plesiopora, e Hirudinea y las familias representativas Glossoscolecidae, Lumbricidae, Megascolecidae del orden Ophistopora y Enchytraeidae del orden Hirudinea; *Mollusca* con la clase Gasteropoda, familia Stilommatophora; *Nematoda* y *Chordata*.

El total de individuos analizados por el Programa "Bioedafología de las Regiones Naturales de Colombia" corresponde taxonómicamente a cinco filones, once clases, 52 órdenes y 274 familias (Tabla 1).

Arthropoda es el filon más diverso y de mayor distribución geográfica en Colombia; le sigue en importancia y por las mismas circunstancias, el filon *Annelida*. La presencia de estos dos grupos de organismos en los suelos es favorable, ya que su participación en los procesos edáficos mejora el equilibrio en la fase aire-agua para la relación suelo-planta-animal, a través de la porosidad del suelo; además, incrementan la fase orgánica, la estabilidad estructural y contribuyen a la formación de estructuras granulares en los horizontes superficiales del suelo.

Tabla 1. Diversidad edafofaunística (Taxones) en Colombia.

Filones	Clases	Órdenes	Familias
Arthropoda	7	47	269
Annelida	1	3	4
Mollusca	1	1	1
Nematoda	1	0	0
Chordata	1	1	0
TOTAL 5	11	52	274

Los órdenes taxonómicos más representativos del filon Arthropoda, según el número de familias hasta ahora estudiadas son: *Coleoptera*, *Diptera*, *Hymenoptera*, *Hemiptera*, *Lepidoptera*, *Arachnida*, *Homoptera*, *Orthoptera*, *Chilopoda*, *Diplopoda* y *Oligochaeta*.

Los mayores índices de diversidad corresponden a las comunidades del bosque húmedo tropical, por lo cual se

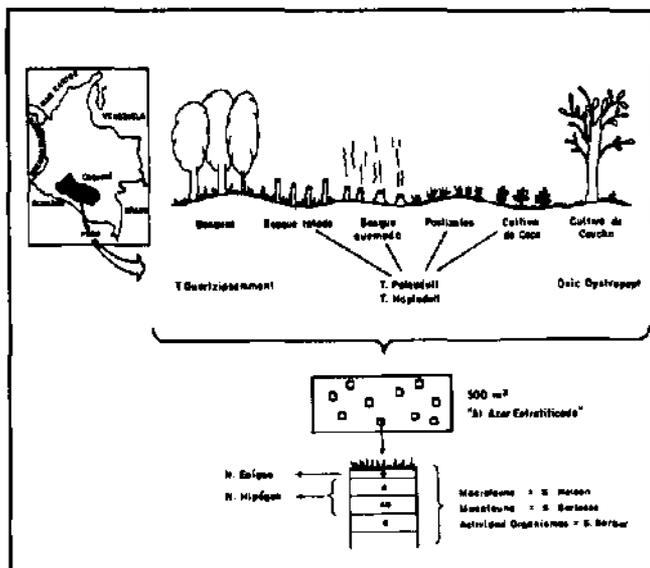


Figura 5. Metodologías de trabajo de campo en biología del suelo.

lo cataloga como la región natural de mayor riqueza edafofaunística (0.78); le siguen en importancia, y en su orden los biomas del Páramo (0.72), la Orinoquia (0.52) y los bosques altoandinos (0.49). Las diferencias en cuanto a índices de diversidad denotan la presencia de taxa específicos en cada una de las regiones señaladas.

Distribución altitudinal

La fauna edáfica de las regiones amazónica y Andén Pacífico habita límites altitudinales entre 0 y 450 metros; en la Orinoquia se ubica entre 75 y 350 metros; en los valles y las montañas de la región Andina aparece entre 400 y 3500 metros.

Coleoptera alcanza su máxima representación en los suelos de la región Andina, por encima de los 2.800 metros, así como en los bosques húmedos tropicales; *Diptera*, *Hymenoptera* y *Hemiptera* son frecuentes en las regiones Andina y Orinocense (Caño Limón); *Lepidoptera* en el Parque Natural de Amacayacu (Amazonas); *Arachnida* en la zona de Puerto Carreño (Orinoquia); *Homoptera* en las zonas altas de la región Andina, así como en la amazónica, y *Orthoptera* y *Oligochaeta* en las regiones Andina, Amazónica y Pacífica.

La mayoría de los órdenes distribuidos altitudinalmente en las regiones estudiadas pertenecen a la clase Insecta, lo cual es significativo si se tiene en cuenta la participación de los organismos del suelo como factores edafogenéticos en su recuperación y conservación a través de ganancias, especialmente de materiales orgánicos, en la transformación de elementos minerales y la translocación de los mismos en el perfil del suelo. El resultado de dichas acciones mejora las características físicas, químicas, mineralógicas y biológicas del ambiente edáfico.

Organismos de los órdenes *Collembola*, *Malacostraca*, *Dermaptera* e *Isoptera*, con un número de familias inferior a diez, son tan importantes como los anteriores. Con respecto a su ubicación altitudinal, se distribuyen en regiones bajas, donde llegan incluso a ser dominantes, como en el caso de los *Isoptera*.

Niveles tróficos

Los predadores, representados especialmente por *Arachnida* y *Coleoptera* de la clase *Arachnida* y de las familias *Staphylinidae*, *Carabidae* y *Scydmaenidae*, controlan la densidad poblacional de la comunidad bioedáfica; su presencia oscila entre el 37.3% en los páramos y el 41.4% en los suelos de la Orinoquia.

Los herbívoros –*Orthoptera*, *Coleoptera* y *Homoptera*– constituyen el 32.1% de las poblaciones de macroorganismos edáficos en los bosques húmedos del trópico y el 36.6% en los bosques altoandinos.

Los saprófagos, responsables de la humificación y mineralización de los materiales orgánicos, están representados por individuos de las familias *Poduridae*, *Entomobryidae*, *Hypogasturidae* y *Collembola* del suborden *Arthropleona*; *Coleoptera* del suborden *Scarabaeidae*, *Arachnida* y, casi todos los representantes de *Oligochaeta*. El rango de variación de los saprófagos oscila entre el 18.6% en la Orinoquia y el 23% en los bosques húmedos.

Los omnívoros son los organismos más abundantes y de mayor incidencia en la circulación de nutrientes en el suelo; están representados, especialmente por especímenes de *Isoptera* e *Hymenoptera* y gregarios como *Blatidos* e *Isopodos*; su presencia varía desde el 41.1% en los páramos hasta el 6.1% en el bosque húmedo tropical (Tabla 2).

Tabla 2. Abundancia (%) de organismos de varios niveles tróficos y diversidad en distintas regiones de Colombia.

Biotopos	Predadores	Herbívoros	Saprófagos	Omnívoros
Páramo	37,3	36,3	22,2	41,1
Bosque alto andino	41,2	36,6	16,1	6,2
Orinoquia	41,4	32,4	18,6	7,6
Bosque húmedo tropical	38,8	32,123	6,1	
Abundancia %	39,6	34,4	20	6
Nº de Familias	115	111	52	15

El análisis de los resultados de la tabla anterior destaca a las poblaciones de predadores como las más abundantes y diversas, seguidas por los herbívoros, los saprófagos y en última instancia por los omnívoros.

Frecuencia y abundancia

El análisis de la frecuencia indica que las familias *Staphylinidae*, *Phoridae*, *Carabidae*, *Chrysomelidae* y *Formicidae* son las más frecuentes e importantes debido a su carácter cosmopolita. Los grupos altamente frecuentes se adaptan muy bien a diferentes tipos de suelos y usos, y soportan diferentes condiciones físicas, determinadas por las características altitudinales de la geografía colombiana.

Collembola, *Acari*, *Hymenoptera*, *Coleoptera*, *Diptera* e *Isoptera* son los más abundantes del suelo; *Collembola*

y *Acari* se destacan en los páramos, en las sabanas y llanuras de la Orinoquia, y en los bosques de la Amazonia. Los *ácaros* son de gran importancia en los procesos bioedáficos. *Collembola*, *Hymenoptera Formicidae* e *Isoptera* generan las bioestructuras de más claro origen edáfico, así como de las modificaciones texturales, las alteraciones en los contenidos de carbono, fósforo y nitrógeno y también el incremento en la concentración catiónica, todo lo cual enriquece la productividad de los ecosistemas naturales.

Edafofauna productividad y fertilidad

Los horizontes orgánicos de los suelos que sustentan bosques albergan mayores poblaciones animales que los horizontes subyacentes, pero es en el horizonte A donde se aloja la mayor riqueza de organismos del suelo. Esta característica bioedáfica presenta fluctuaciones, especialmente marcadas en los valores de sus densidades poblacionales y en la composición de las comunidades, cuando los ecosistemas son intervenidos por el hombre. Este es el caso de los suelos sometidos a cambios de uso y manejo, como ocurre por ejemplo cuando el bosque nativo es sustituido por monocultivos comerciales legales e ilícitos.

La disminución de la edafofauna con la profundidad del suelo está bien representada en grupos taxonómicos como *Collembola* y *Acari* y es, según Sánchez, Arenas & Zuluaga (1992), aplicable a la mayoría de comunidades orgánicas, en condiciones normales (Tabla 3).

Tabla 3. Distribución porcentual de los principales taxones en los horizontes de un perfil de suelos en Caño Limón (Arauca, Colombia).

TAXA	HORIZONTES		
	O	A	B
ACARI	97.84	1.46	0.70
HYMENOPTERA	70.75	25.21	4.03
DIPLOPODA	97.63	2.18	0.19
COLEOPTERA	89.14	8.86	2.00
COLLEMBOLA	95.90	1.88	2.32
GASTEROPODA	96.75	1.26	0.36

Las lombrices de tierra y las hormigas son los macroorganismos que mejor soportan los cambios y se adaptan fácilmente a las condiciones de suelos disturbados; las primeras, debido tanto a su carácter cosmopolita como de ubicación restringida, son mejoradoras del suelo mediante labores de transformación de residuos biodegradables; así mismo, las hormigas, contribuyen donde se encuen-

tren, a facilitar e incrementar los procesos de transformaciones orgánicas en el suelo, tendientes, tanto en suelos disturbados como no disturbados a conformar complejos órgano-minerales. Estos organismos del suelo son componentes promisorios para los sistemas de producción agropecuaria sustentable.

Fuentes (1997), estableció que *Pheretima* sp. alimentada con productos residuales biodegradables, del bosque húmedo tropical, sintetiza lombríabonos con altos contenidos de calcio, potasio, magnesio, fósforo, nitrógeno, carbono y materia orgánica que, incorporados posteriormente al medio edáfico, surten beneficios para la relación suelo - planta - hombre. El mismo efecto ha sido observado y evaluado, especialmente en cuanto a incrementos de la fracción orgánica se refiere, en pequeñas parcelas sometidas a labores agrícolas constantes y en forma intensiva en sabanas y zonas de ladera, de climas fríos y medios.

La actividad biológica de los sistemas edáficos en la Zona Andina muestra diferencias en el aporte de biomasa y, por lo tanto, en la constitución de las comunidades bioedáficas correspondientes a cada uno de los dos flancos, oriental y occidental, de la Cordillera Central. Se atribuyen tales diferencias a las variables climáticas, también específicas, en cada flanco de la cordillera; las diferencias en clima producen cambios en el comportamiento de los organismos y también en sus interrelaciones con otros factores formadores del suelo. Este es otro ejemplo de la participación activa de los organismos sobre la génesis y la evolución de las características físico-químicas de los suelos.

Infante (1987), evaluó los elementos del suelo más afectados por actividades antrópicas como la quema y el pastoreo, y encontró, que además de la remoción de la cobertura vegetal disminuyen los tamaños poblacionales, las abundancias, los niveles de dominancia y la diversidad de la mayoría de las familias taxonómicas de los suelos del páramo de Chingaza. Estos cambios en la comunidad animal de los suelos son inducidos por oscilaciones fuertes de la temperatura y la humedad en los horizontes subsuperficiales del suelo.

Los organismos que habitan los horizontes minerales del suelo dependen para su asentamiento tanto de las propiedades físicas como de las químicas; algunos investigadores consideran de mayor importancia, en este caso, las primeras, pero las observaciones y los resultados de la experimentación realizada durante los últimos quince años mediante el programa de Investigación "Las comunidades Bioedáficas en las Regiones Naturales de Colombia",

bajo mi responsabilidad y con el apoyo económico del Instituto de Estudios Ambientales IDEAM, permiten afirmar que tanto las características físicas, como las químicas y biológicas, son igualmente importantes para propiciar el mantenimiento y la evolución constante de las comunidades bioedáficas (Chamorro, 1995).

Es oportuno recordar que las características del medio edáfico varían de un suelo a otro, ya que en cada región los factores formadores del mismo cambian y, por lo tanto, en unas zonas geográficas tales factores actúan como determinantes y en otras como limitantes para la evolución del mismo. Sin embargo, en términos generales se puede afirmar que la densidad aparente, la porosidad y la microporosidad son características físicas de gran influencia en la edafofauna; así mismo, desde el punto de vista químico se catalogan en iguales circunstancias la saturación de bases, especialmente calcio y magnesio, el valor del pH y el contenido de materiales orgánicos.

En cuanto al horizonte orgánico, es conveniente hacer énfasis en la necesidad de implementar procedimientos de uso y manejo del sistema suelo, tendientes a conservarlo como amortiguador y regulador de los factores climáticos drásticos, que influyen en el establecimiento de los macroorganismos del suelo.

Considero que con la exposición de los resultados de mi trabajo he cumplido con el objetivo de despertar en los asistentes y, particularmente, en los honorables académicos, el interés por las expresiones de la vida que se dan en el suelo y por la importancia que los organismos de todos los tamaños, diversidad y formas, tienen para la conservación, la recuperación y el mejoramiento de uno de los recursos naturales fundamentales para la supervivencia del hombre en el planeta.

Bibliografía

Bachelier, G. 1963. *La vie animale dans les sols*. Orstom, Paris.

Camero, R. E. 1998. Caracterización de la fauna de carabidos en un transecto altitudinal de la Sierra Nevada de Santa Marta-Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Tesis M.Sc. en Biología. Bogotá. 123 p.

Camero, E.; C. Chamorro. 1999. La fauna edáfica en bosques y plantaciones de coníferas de la estación San Lorenzo. Sierra Nevada de Santa Marta. *Acta Biológica Colombiana*, vol 4(1): 35-45.

Cortés, A.; C. Chamorro y A. Vega. 1985. Cambios en el suelo por la implantación de praderas, coníferas y eucaliptus en un área aledaña al Embalse del Neusa. Centro de Investigaciones Científicas, UJTL. Bogotá. 95 p.

Chamorro, C. 1981. Correlación entre poblaciones de lombrices de tierra y las características físico-químicas de tres suelos seleccionados de la Sabana de Bogotá. Tesis. Mag. Sc. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 185 p.

_____. 1983. Características químicas y su relación con las lombrices de tierra en suelos del Páramo de Chisacá. *Rev. Acta Biológica Colombiana*. Universidad Nacional de Colombia.

_____. 1989. Estudio bioedafológico de la Isla de Gorgona. *Acta Biológica Colombiana*. Vol. 1(5): 23-26.

_____. 1995. Organismos del Suelo. En: Malagón, D.; C. Pulido; R. Llinás; C. Chamorro. *Suelos de Colombia*. IGAC. Bogotá, Edit. Canal Ramírez Antares Ltda. pp. 241-286.

Domínguez, C.; L. A. Oviedo y R. C. Sandoval. 1990. Estudio de las poblaciones de lombrices de tierra (Annelida Oligochaeta) del piso térmico cálido del departamento del Tolima. Tesis Posgrado Docencia de la Biología. Universidad del Tolima. Ibagué. 190 p.

Fuentes, A. 1997. Lombrices nativas bajo diferentes usos del suelo como transformadoras de residuos biodegradables. Tesis F. De Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 150 p.

Galvis, C. y H. Valencia. 1975. Efecto edáfico de la hormiga arriera *Atta laevigata* en algunos suelos del Centro de Desarrollo Integrado "las Gaviotas" en la Orinoquia Colombiana. Tesis de Biología, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 131 p.

IGAC. 1990. Investigaciones "Biología del Suelo". Bogotá. Vol. 2(1): 150 p.

_____. 1993. Investigaciones en la Amazonia INPA I, Bogotá. Vol. 2, Cap. 4, Sec 5: 737-786.

_____. 1996. Investigaciones en la Amazonia INPA II, Bogotá. Vol. 3, Cap 3: 849-909.

_____. 2000. Investigaciones en la Amazonia INPA III. En proceso de publicación.

Infante, J. 1987. Influencia del uso del suelo sobre la Mesofauna Edáfica en el Páramo de Chingaza. Tesis Biología. Universidad Nacional de Colombia. 246 p.

Pérez Arbeláez, E. 1953. Recursos Naturales de Colombia. Su génesis, su medida, su aprovechamiento, conservación y renovación. Dificultades naturales de Colombia y lucha contra ellas. Imprenta del Banco de la República. Bogotá. 128 p.

Rodríguez, G., G. Velásquez, C. Chamorro, N. Martínez. 1992. Adaptación tecnológica de la lombricultura en la zona cafetera de Albán (Cundinamarca-Colombia). *Revista Acta Biológica Colombiana*, Universidad Nacional de Colombia. Vol. 8(1): 81-109.

Sánchez, H.; G. Arenas; y D. Zuluaga. 1992. Estudio bioedafológico del área petrolera de Caño Limón. Tesis de Biología, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 225 p.

Wallwork, J. 1970. *Ecology of soil animals*. Ed. McGraw Hill. London. 283 p.

Wendt, H. 1980. *Die Entdeckung der Tiere*. Christian Verlag, GmbH. Munich. 317 p.

ECOLOGÍA DE LAS MACROALGAS DEL PLANO ARENOSO CONTIGUO AL TALUD DE LOS SISTEMAS CORALINOS CON ÉNFASIS EN EL CARIBE

por

Germán Bula-Meyer*

Resumen

Bula-Meyer, G.: Ecología de las macroalgas del plano arenoso contiguo al talud de los sistemas coralinos con énfasis en el Caribe. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **25(97):** 495-507, 2001. ISSN 0370-3908.

Los fondos plano-arenosos con fragmentos y piedras calcáreas formadas por acreción de coralináceas incrustantes, contiguos al talud de los sistemas coralinos del Atlántico, presentan una vegetación rica en especies. La mayoría de estas algas son excluidas del talud y partes someras del arrecife coralino por los peces e invertebrados herbívoros. Las más dominantes y carentes de defensas químicas para contrarrestar la predación, han desarrollado evolutivamente una gran habilidad competitiva por el espacio primario y la adaptación a niveles bajos de luz. La competencia por el espacio no parece jugar un papel importante en la estructuración de estas comunidades y más bien ello obedece a la disturbancia creada por un factor físico estacional, condición que explica el mantenimiento de la alta diversidad.

Palabras clave: Sistema coralino, planos arenosos, macroalgas, ecología, herbívoros, Caribe.

Abstract

The sand plain with cobbles and pebbles formed by the long-term accretion of calcareous red algae around pebbles, shell fragments, or calcareous nodules, contiguous to reef slope of the coralline systems at the Atlantic, are rich in species. Most of these algae are excluded from the reef slope and shallow parts of the reef coral by the herbivorous fish and invertebrates. The most dominant species lack chemical defenses to avoid predation, but evolutionarily, they have developed a competitive ability by the primary space and adaptability to low light levels. Competition for space does not seem to play an important role in structuring these subtidal communities, but to the

* Laboratorio de Biología, Universidad del Magdalena. A.A. 890, Santa Marta-Colombia.

cyclic disturbing conditions, generally a physical factor, which cause a reduction of the most dominant species, thus permitting coexistence with other less dominant species. This condition would explain the maintaining of a high species diversity.

Key words: Macroalgae, herbivorous, sand plain, coralline systems, physical disturbances, chemical defenses.

Introducción

Los fondos plano-arenosos con fragmentos y piedras calcáreas dispersas que se localizan contiguos al talud de los sistemas coralinos del Atlántico tropical (12-50 m de profundidad) (Fig. 1), se caracterizan por presentar una vegetación, tal vez la más rica en especies de todo el sistema. Sin embargo, ecológicamente es pobremente conocida. Es más, en el ámbito mundial, las dos únicas investigaciones conocidas son las de **Lieberman et al.** (1979) en Ghana y **Hay** (1981) en Panamá. En ambas localidades, las piedras calcáreas como el sustrato de las macroalgas son inestables estacionalmente por la turbulencia del agua. En planos arenosos con este tipo de sustrato pero relativamente estable, sólo se conocen los trabajos de **Bula-Meyer** (1989b, 1993) en el Caribe colombiano. Hasta hace poco, era un enigma el hecho de que en un medio donde el sustrato duro es un factor limitante, la riqueza de especies de macroalgas fuera de las más altas en los sistemas coralinos. Otra de las características es que las especies dominantes en estos fondos, rara vez son observadas en el talud o partes más someras del sistema coralino en donde el sustrato duro es abundante. **Hay** (1981) fue el primero en demostrar y más tarde **Bula-Meyer** (1987, 1993) que la mayoría de las especies del plano arenoso no están restringidas a esas partes más profundas del sistema coralino y que pueden vivir muy bien en aguas someras. Ellos también demostraron que estas especies son excluidas del talud y partes someras del sistema coralino por la presión del pastoreo ejercida por los herbívoros de este hábitat. De esto se concluye que los

peces y erizos herbívoros de las partes someras del talud coralino, al limitar las especies dominantes competitivas a áreas de refugio, son de importancia primaria en mantener una gran diversidad de especies entre hábitats, lo cual es característico de los sistemas coralinos del Caribe. Un ejemplo reciente fue la consecuencia catastrófica que trajo la mortandad masiva del erizo negro *Diadema antillarum* en todo el Caribe. La casi desaparición de este erizo por causas aún desconocidas, la cual se inició en el año de 1983 (**Lessios et al.**, 1984), permitió que el alga parda *Lobophora variegata*, una especie que estaba limitada a las partes profundas del talud coralino (20-50 m), invadiera y matara a muchos de los corales de las zonas someras del sistema coralino, como se observa especialmente en las islas del Rosario y de San Bernardo en Colombia. Los metabolitos secundarios que produce *L. variegata*, poseen una potente actividad antimicrobiana y citotóxica (**Paul & Hay**, 1986) y es probable que por esto, los peces herbívoros en general no la consuman, pero el erizo *D. antillarum* sí pastorea en ella (**Bula-Meyer**, 1989a).

El objetivo de este artículo es dar a conocer los resultados ecológicos que se han logrado hasta el momento en el Caribe colombiano con las praderas de macroalgas localizadas después del talud coralino y comparar éstos con los obtenidos en Panamá y Ghana.

Sitio de estudio y métodos

Las investigaciones comenzaron en 1984 y continúan hasta el presente. El sitio de estudio se localiza en la ensenada de Nenguanje, Parque Nacional Natural Tairona (PNNT), costa Caribe de Colombia (Fig. 2). La pradera de macroalgas presenta una extensión aprox. de 400 m² y se ubica a 23 m de profundidad en un plano arenoso con muchos fragmentos y piedras calcáreas relativamente estables como sustrato, originadas a largo plazo por acreción de coralináceas incrustantes. Esta pradera está separada por una franja arenosa de 60 m de ancho del pie del talud rocoso coralino que queda a 16 m de profundidad. Descripción de la pradera y de las condiciones físicas y oceanográficas del lugar están dadas en **Bula-Meyer** (1987, 1989b) y la metodología en **Bula-Meyer** (1987).

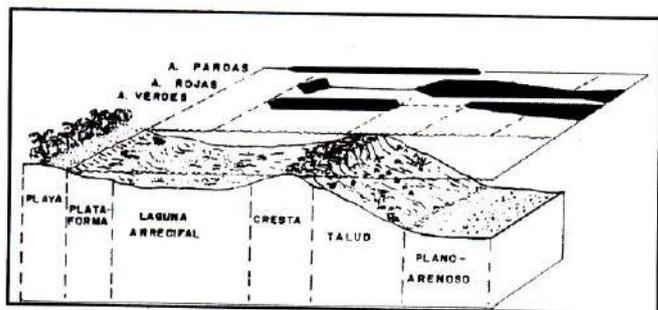


Figura 1. Distribución generalizada de las macroalgas verdes, pardas y rojas en un sistema coralino del Caribe (ver **Bula-Meyer**, 1995).

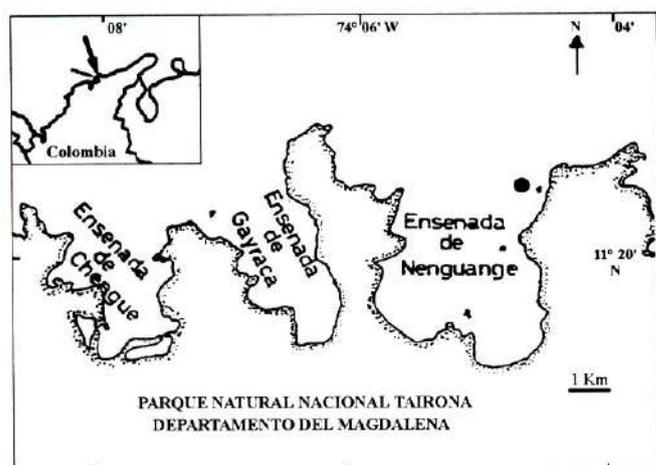


Figura 2. Sitio de estudio (=) y su localización en el Parque Nacional Tairona del Caribe colombiano.

Resultados

Las macroalgas del plano-arenoso y el sustrato primario

La naturaleza de los fragmentos y piedras calcáreas sugiere que ellos proveen una superficie relativamente estable por un tiempo indeterminado para el crecimiento de las macroalgas en el sitio de estudio. Anualmente muchas de estas coralináceas mueren por ser cubiertas por el sedimento circundante que las cubre debido a la turbulencia del agua de la estación seca (enero-abril) o de las corrientes de fondo que se presentan en la estación húmeda (septiembre-noviembre). De esta manera, cuando el sedimento es removido, hay nuevo sustrato para ser colonizado por algas y animales. En este hábitat, algunas especies no alcanzan a desarrollar su talla máxima. Por ejemplo, *Halymenia floresia* y *H. pseudofloresia* cuando crecen sobre fondos rocosos alcanzan hasta 80-90 cm de altura, mientras que en el sitio de estudio no crecen más de 30-40 cm de altura. Esto se atribuye a la relativa inestabilidad del sustrato que limita el crecimiento de la planta (obser. pers.).

De las 83 spp. registradas en los 27 marcos, 77 estuvieron presentes durante la estación seca o de surgencia y 61 spp. en la estación húmeda. Cincuenta y cinco spp. fueron comunes en ambos períodos climáticos (Tabla 1). Veinte y dos spp. que estuvieron presentes durante la estación seca no aparecieron en los muestreos de la estación húmeda (por lo menos macroscópicamente). El coeficiente de presencia-ausencia de Jaccard indicó una similitud de 66.3% en lo que a composición de especies se refiere.

Las macroalgas rojas forman el grupo más dominante y que representa el 80-85% del total de táxones (Panamá 40 spp. y Ghana 78 spp.) (Tabla 1). Aunque el fondo es arenoso, las especies psamofíticas son más bien escasas como en Panamá y Ghana. Respecto a longevidad del talo o su estacionalidad, las formas pseudoperennes y anuales durables (=anuales) representan el mayor porcentaje de las especies (esto es más de 70%) en todos los casos conocidos (Tabla 2).

No todas las especies del plano-arenoso están confinadas a este hábitat. De las 83 especies, 47 spp. (57%) están restringidas naturalmente a estos ambientes; 28 spp. (33%) han sido observadas en aguas someras y en el intermareal; a 8 spp. (10%) no se les pudo confirmar su presencia en aguas someras debido a su tamaño tan pequeño. Sin embargo, varias de las 47 spp. de este plano-arenoso demostraron no estar restringidas naturalmente a ese hábitat. Experimentos realizados en el campo, comprobaron que estas especies, en un medio libre de los herbívoros del talud, y en partes someras del arrecife, pueden fijarse en aguas someras (Bula-Meyer, 1993) y por lo tanto, éstas no estaban restringidas fisiológicamente a esas profundidades como se creía, sino que la mayoría se ajustan mejor a un régimen físico, típico de las partes someras del sistema coralino. Estos resultados corroboraron los de Hay (1981), quien por otros medios encontró que las algas que vivían entre los 11 y 14 m de profundidad, no mostraron ninguna fotoinhibición cuando fueron transplantadas a aguas someras. Además, crecieron muy bien y rápido cuando fueron excluidos los herbívoros.

Las 28 spp. naturalmente euribáticas, mostraron diferentes habilidades y adaptaciones para evadir a los herbívoros (Bula-Meyer, 1987) tales como ser resistentes en su estructura física, residir en grietas o cuevas de difícil acceso a los herbívoros, presentar un ciclo de vida heteromórfico, vivir en asociación con algas o animales tóxicos, producir sustancias alelopáticas, y ser de ocurrencia imprevisible. El costo energético de estas especies en poseer varias maneras de evitar el ataque de sus predadores en las partes someras del sistema coralino, puede resultar en la mayoría de las especies en una reducción en la habilidad competitiva en el ambiente inmediato. Esto pudo corroborarse al encontrar que por lo menos 24 especies de las 28 presentaban las más bajas coberturas de las especies del plano-arenoso (Fig. 3). Sin embargo, con las especies frondosas-erguidas y filamentosas más dominantes del plano-arenoso y que son restringidas naturalmente a estas condiciones, no ocurre lo mismo. Estas fueron rápidamente consumidas una vez fueron transplantadas al talud donde dominan los herbívoros (Bula-Meyer 1993).

Tabla 1. Número total de taxones (83) encontrados en un plano arenoso a 23 m de profundidad en el Parque Nacional Natural Tairona. Especies sin asteriscos están restringidas a este hábitat; con un asterisco, viven además en las partes someras del sistema arrecifal; y con dos asteriscos, no se les pudo confirmar su presencia en las partes someras del sistema arrecifal. Frecuencia (F) y densidad (D) provenientes de 27 marcos (30x50 cm) para la estación seca (S) y húmeda (H) de 1985. Longevidad del talo (LT) está indicada para cada especie: efímeras (E), anuales durables (A), pseudoperennes (PS) y perennes (P).

TAXON	F		D		DC	LT
	S	H	S	H		
Chlorophyta						
<i>Bryopsis pennata</i> *	2	0	2	0	-2	PS
<i>Caulerpa mexicana</i>	0	1	0	1	1	PS
<i>Cladophora laetevirens</i>	3	0	4	0	-4	PS
<i>Cladophora pellucidoidea</i>	1	0	1	0	-1	PS
<i>Codium isthmocladum</i> *	1	1	1	1	0	A
<i>Codium taylori</i> *	1	0	1	0	-1	A
<i>Neomeris annulata</i> *	2	2	3	2	-1	PS
<i>Siphonocladus tropicus</i>	1	0	1	0	-1	A
<i>Udotea occidentalis</i>	5	2	6	4	-2	PS,P
Phaeophyta						
<i>Colpomenia sinuosa</i> *	0	2	0	2	2	E
<i>Dictyota pfaflii</i> *	4	2	4	2	-2	PS
<i>Dictyota menstrualis</i> *	2	3	2	3	1	PS
<i>Dictyota pulchella</i> *	0	11	0	20	20	PS
<i>Dictyopteris delicatula</i> *	7	16	8	32	24	PS
<i>Lobophora variegata</i> *	0	2	0	2	2	PS,P?
<i>Sargassum</i> sp.	0	2	0	3	3	PS?
Rhodophyta						
<i>Agardhiella subulata</i>	2	3	2	6	4	PS
<i>Aglaothamnion cordatum</i>	4	15	9	38	29	A?
<i>Amphiroa beauvoisii</i> *	7	8	8	9	1	P
<i>Antithamnion antillanum</i> **	1	0	1	0	-1	A?
<i>Antithamnionella breviramosa</i> **	5	4	13	7	-6	A?
<i>Antithamnionella flagellata</i> **	1	0	1	0	-1	A?
<i>Asparagopsis taxiformis</i> (Espórófito)	26	25	140	88	-52	PS

(Continuación Tabla 1)

<i>Botryocladia monoica</i>	6	3	9	3	-6	PS
<i>Botryocladia papenfussiana</i>	6	5	20	8	-12	PS
<i>Ceramium comptum</i> **	5	1	6	3	-3	A?
<i>Ceramium flaccidum</i> **	2	2	2	2	0	A?
<i>Ceramium leutzelburgi</i> **	3	1	5	1	-4	A?
<i>Champia salicornioides</i>	2	10	3	19	1	A
<i>Champia taironensis</i>	3	8	6	12	6	A
<i>Champiocolax sarae</i>	1	0	1	0	-1	A
<i>Chondria platyramea</i>	13	19	26	82	56	P,PS
<i>Chrysomenia enteromorpha</i>	3	0	3	0	-3	E
<i>Cottoniella filamentosa</i>	3	12	3	12	9	A
<i>Crouania attenuata</i> *	5	14	13	24	11	PS
<i>Dasya corymbifera</i>	4	15	7	42	35	PS
<i>Dasya mollis</i>	5	15	9	50	41	PS
<i>Dasya ocellata</i>	2	2	4	12	8	PS
<i>Dasya rigidula</i>	6	7	13	15	2	P?
<i>Dictyurus occidentalis</i> *	21	24	59	125	66	P,PS
<i>Diplothamnion jobyi</i>	1	0	1	0	-1	A?
<i>Dudresnaya bermudensis</i>	3	0	3	0	-3	E
<i>Dudresnaya crassa</i>	3	0	3	0	-3	E
Coralináceas incrustantes	24	27	195	151	-44	P
<i>Erythrotrichia carnea</i> *	5	3	9	6	-3	A
<i>Flahaultia tegetiformans</i>	1	1	1	2	1	PS
<i>Galaxaura marginata</i> *	1	0	1	0	-1	A
<i>Galaxaura obtusata</i>	2	0	2	0	-2	E
<i>Gelidium pusillum</i> *	1	0	4	0	-4	PS
<i>Gracilaria mammillaris</i> *	13	18	20	44	24	PS
<i>Griffithsia opuntioides</i>	0	1	0	1	1	A
<i>Griffithsia schousboei</i>	2	2	2	2	0	A
<i>Halodictyon mirabile</i>	3	1	4	1	-3	A?
<i>Haloplegma duperreyi</i>	4	8	21	62	41	PS

(Continuación Tabla 1)

<i>Halymenia pseudofloresia</i>	1	1	1	1	0	A
<i>Heterosiphonia crispella</i> var. <i>crispella</i> *	7	24	10	133	123	P?
<i>Heterosiphonia crispella</i> var. <i>laxa</i>	2	0	2	0	-2	A
<i>Hypnea spinella</i> *	12	22	13	36	23	PS
<i>Hypoglossum tenuifolium</i>	1	4	1	5	4	A
<i>Jania capillacea</i> *	7	8	11	9	-2	P
<i>Jania rubens</i> *	1	1	1	1	0	P
<i>Laurencia brongniartii</i>	11	19	19	96	77	PS
<i>Laurencia</i> sp.	27	27	164	132	-32	P,PS
<i>Lomentaria baileyana</i>	3	1	3	1	-2	PS
<i>Lomentaria corallicola</i>	3	1	4	1	-3	PS?
<i>Lophocladia trichoclados</i>	2	10	5	22	17	PS
<i>Martensia fragilis</i> *	1	0	1	0	-1	A
<i>Micropeuce mucronata</i>	2	2	2	2	0	PS
<i>Nitophyllum</i> sp.	1	1	1	1	0	PS
<i>Peyssonnelia conchicola</i>	6	21	7	34	27	P
<i>Peyssonnelia simulans</i>	6	10	8	11	3	P
<i>Plenosporium</i> sp.**	1	0	3	0	-3	A?
<i>Polysiphonia atlantica</i> **	5	2	7	2	-5	A?
<i>Polysiphonia denudata</i> *	4	11	6	20	14	A?
<i>Predaea tenuis</i>	2	0	2	0	-2	E
<i>Sarcodiotheca dichotoma</i>	6	0	7	0	-7	PS
<i>Sarcodiotheca divaricata</i>	15	7	26	10	-16	PS
<i>Scinaia complanata</i> var. <i>intermedia</i> *	3	0	4	0	-4	E
<i>Sebdenia flabellata</i>	2	0	2	0	-2	E,A
<i>Spyridia filamentosa</i> *	1	0	1	0	-1	A
<i>Stylonema alsidii</i> *	4	3	10	7	-3	A
<i>Wrangelia argus</i> *	3	5	6	15	9	PS
<i>Wrangelia penicillata</i> *	2	8	2	13	11	PS
Total			1019	1465	978	

Tabla 2. Longevidad del talo de las 83 especies de macroalgas del sitio de estudio.

LONGEVIDAD DEL TALO	PORCENTAJE	TOTAL
Efímeras	9	Anuales: 40%
Anuales Duraderas	31	
Pseudoperennes	45	Perennes: 60%
Perennes	15	

Esto no indica que todas estas especies no tengan la capacidad de producir compuestos alelopáticos. Por ejemplo, el esporófito del alga roja *Asparagopsis taxiformis*, cuando fue transplantado del plano-arenoso al talud en el PNNT, fue rápidamente consumido por los peces herbívoros (Bula-Meyer, 1993); sin embargo, esta especie ha sido observada en Belize como evadida por estos predadores y probablemente por los productos tóxicos que se le encontraron como también al gametófito (ver Bula-Meyer, 1989a). En las islas Vírgenes el esporófito *A. taxiformis* fue hallado en una cantidad del 1% en el estómago de un erizo, de *D. antillarum* (Atkinson *et al.*, 1973). Resultados sobre casos como este, también fueron encontrados por Hay (1984) en el Caribe. Cuando él transplantó las macroalgas de un plano-arenoso a lugares sometidos a intenso pastoreo, la mayoría de las algas rojas carnosas fueron rápidamente consumidas. Esto parece indicar que las variaciones cuantitativas y cualitativas de estos aleloquímicos están estrechamente relacionadas con el hábitat de la planta. La producción de estos compuestos secundarios y su almacenamiento en los tejidos de la planta, implican un proceso energético intenso (Levin, 1976). Exceptuando las especies psamofílicas, es de esperarse que las algas dominantes que viven en el plano-arenoso, en donde el pastoreo es bajo o insignificante, especialmente en los últimos años que se ha reducido alarmantemente por la sobrepesca del caracol *Strombus gigas*, tengan bajas defensas químicas o carezcan de ellas.

Factores que estructuran a estas comunidades algales

Si bien las especies de este hábitat, especialmente las más dominantes, han desarrollado una gran habilidad competitiva por el espacio primario, competencia por este recurso no parece jugar un papel importante en estructurar a estas comunidades algales. Esto es reforzado por el hecho de que una reducción en la cobertura de las espe-

cies competitivamente dominantes durante el período desfavorable del año, como ocurrió en todos los casos conocidos, causaría a la luz de la teoría de la competencia, un aumento en el número de especies, lo que nunca sucedió. Aunque el sustrato duro es escaso en el plano arenoso, la cobertura vegetal nunca llega a cubrirlo todo y normalmente hay una parte considerable que está libre de algas todo el año (Fig. 3). En el caso de Ghana, Lieberman *et al.* (1979) atribuyó la baja competencia por el espacio a una disturbancia (remoción de biomasa) anual de carácter físico, la cual consiste en el rodamiento del sustrato como resultado de la fuerte turbulencia del agua producida por ciertos vientos de la estación húmeda. Según Lieberman *et al.*, esta disturbancia es la que permite una alta diversidad de la comunidad algal. También este parece ser el caso en el Caribe panameño, además del rodamiento de esos rodolitos durante la estación seca, la comunidad submareal (localizada entre 11 y 14 m de profundidad) queda en tinieblas por el grado de turbiedad que se presenta debido al alisio del NE (Hay, 1981). En el PNNT en la que estos rodolitos no sufren este impacto estacional a 23 m de profundidad, la disturbancia proviene cuando la temperatura sobrepasa los 26°C, como resultado de la declinación de la surgencia costera anual en mayo (Bula-Meyer, 1989b). Esta disturbancia produjo una reducción de la biomasa de 21 g/m² en marzo (mes de máxima producción) a 7.3 g/m² en octubre-noviembre (meses de mínima producción). Esta disturbancia de carácter físico es considerada aquí ubicuista y de carácter intermedio y no extrema de acuerdo con Connell (1978). Por lo tanto, la alta diversidad encontrada en este lugar, es debida al mantenimiento de un estado de preclímax en donde la competencia no es importante. Un caso algo similar es el de Ghana, pero en Panamá, como resultado del número de especies de macroalgas recolectadas (40 spp.), indicaría que la disturbancia es de un carácter más adverso.

Epifitismo y coexistencia entre macroalgas frondosas y coralináceas incrustantes

El epifitismo ha sido visto primariamente como una estrategia competitiva que facilita la invasión de áreas donde la mayoría del sustrato está ocupado por otros organismos (Hay, 1981; Hawkins & Harkin, 1985). Sin embargo, en el plano areno estudiado en Colombia, aunque el esporófito del alga roja *Asparagopsis taxiformis* fue la especie de mayor cobertura (Fig. 2 No 4), su epifitismo sobre *Laurencia* sp. no se atribuye a la escasez del sustrato primario, por lo que siempre hubo un excedente de éste (Fig. 2 No. 3) y aún más que la cobertura ocupada por esta especie filamentosa. El fuerte epifitismo

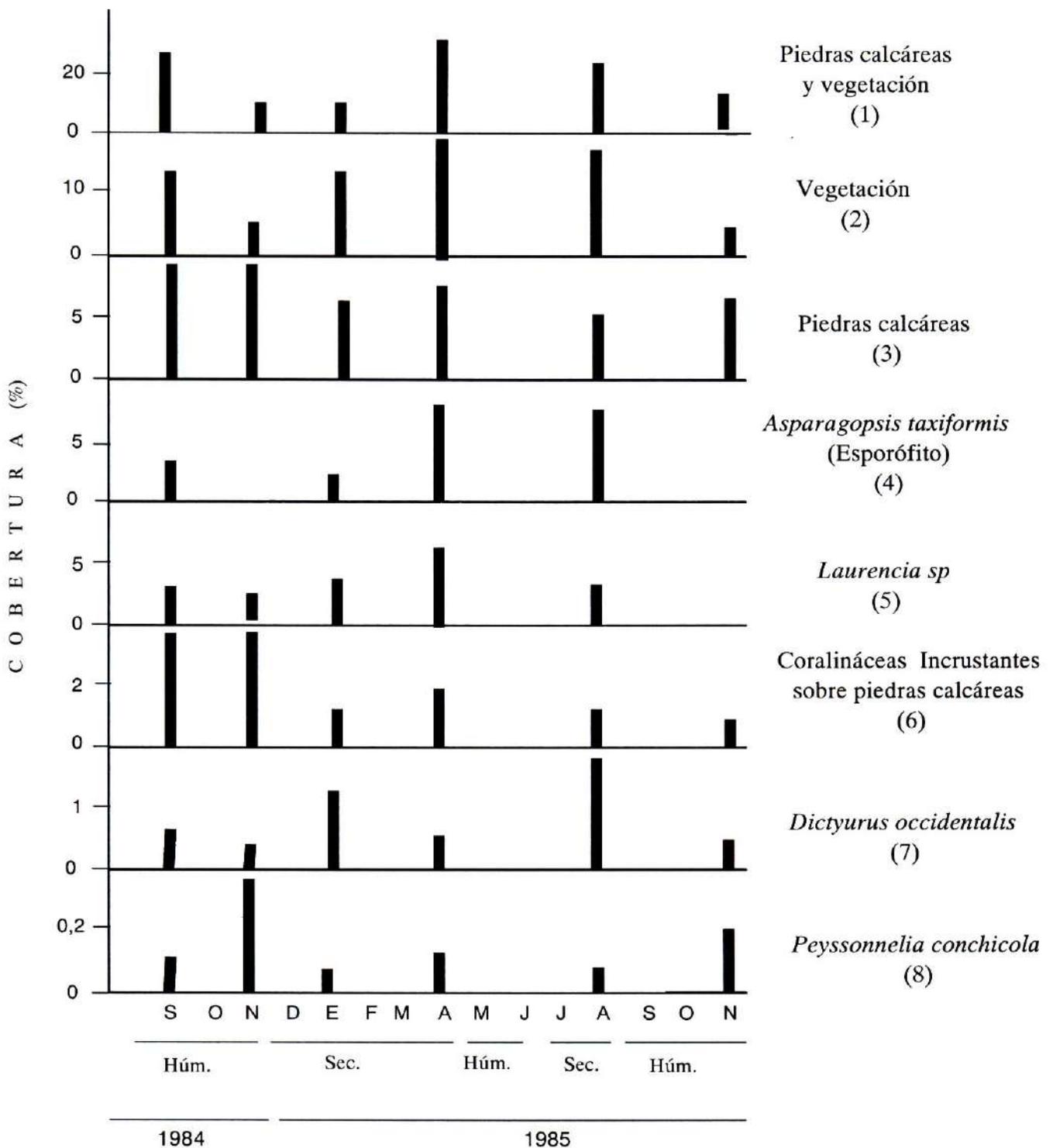
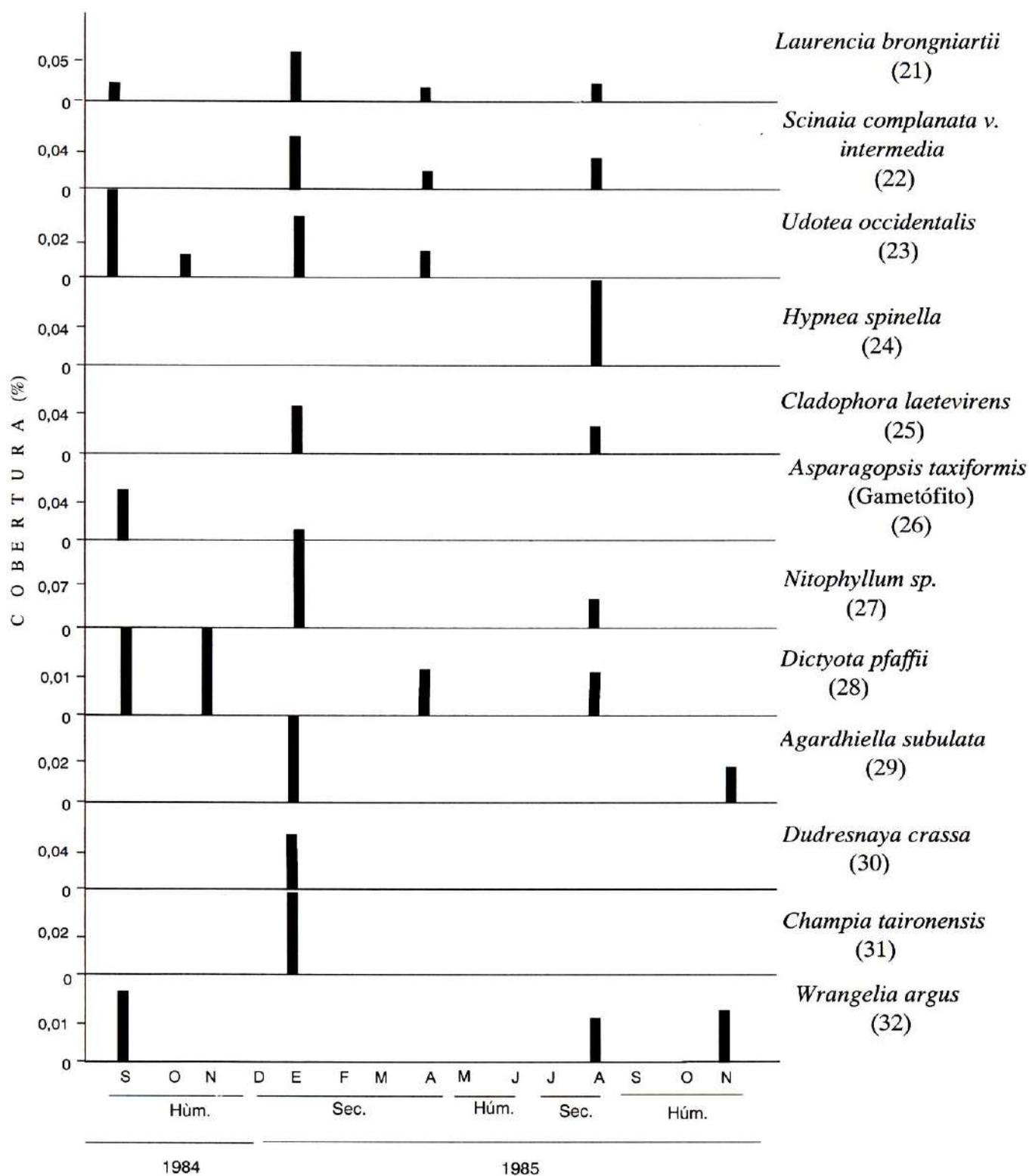
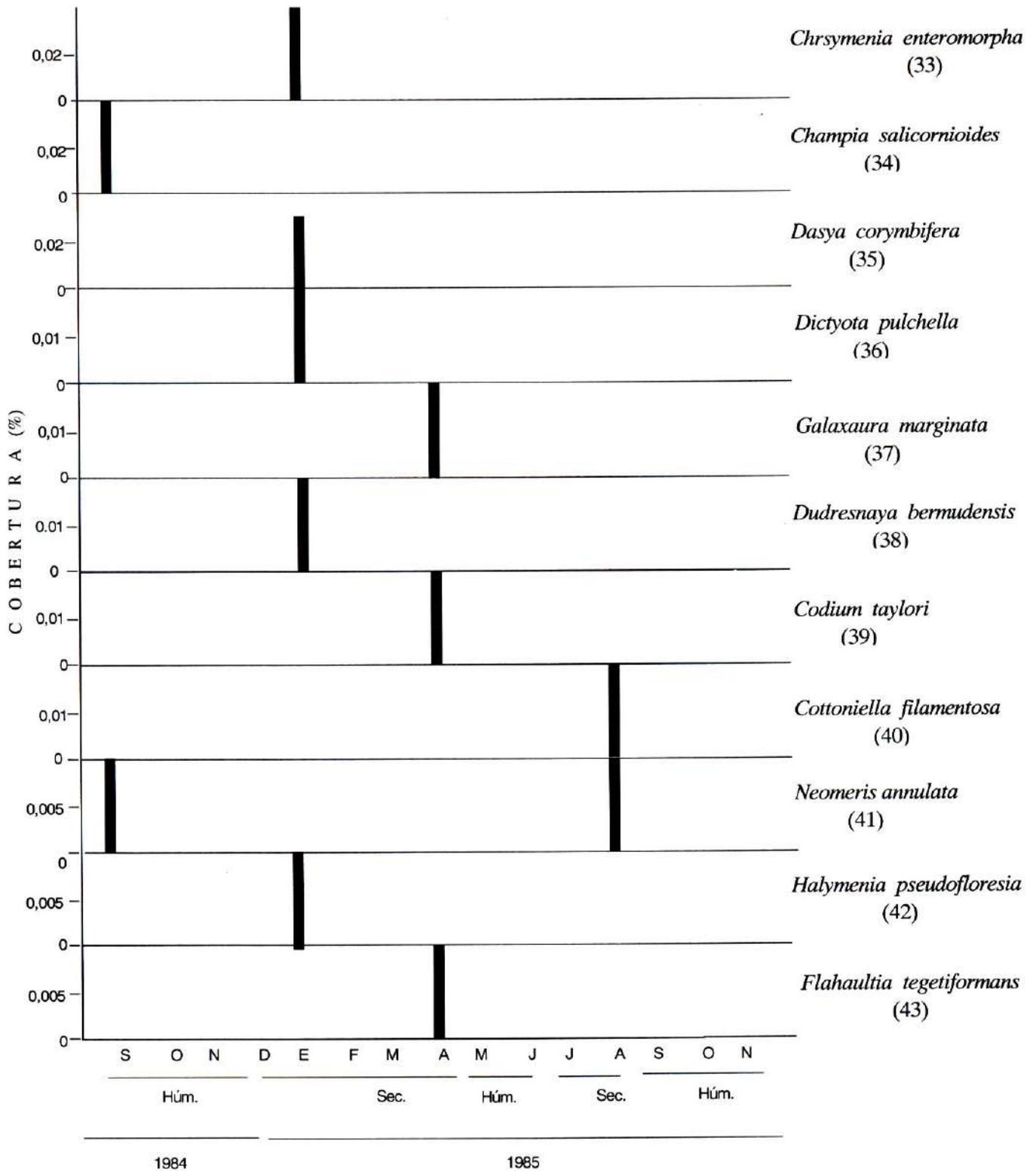


Figura 3. Valores de cobertura (%) que se dieron durante la estaciones seca y húmeda de las piedras calcáreas, vegetación total y para las primeras 40 especies de macroalgas ordenadas de mayor a menor. Las otras especies no fueron graficadas ya sea porque no estaban presentes en el momento de la toma de datos o porque su cobertura en los 27 cuadrantes fue mucho menos de 0.01%. Las especies fueron arregladas de acuerdo con los 6 datos obtenidos.



(Continuación Figura 3)



(Continuación Figura 3)

de *A. taxiformis* puede ser visto como un mecanismo de protección que evita que su fino talo filamentosos y extremadamente delicado sea sepultado por la deposición de sedimento que ocurre durante la estación húmeda o por la abrasión que produce la arena en el período seco del año (Bula-Meyer, 1987). De esta manera el esporófito de *A. taxiformis* viviendo sobre *Laurencia* sp., una especie perenne-pseudoperenne, garantiza su existencia en el plano arenoso.

La coexistencia entre coralináceas incrustantes y macroalgas frondosas es rara debido a que normalmente las últimas terminan matando a las primeras (van den Hoek, 1969; Littler & Littler, 1984; obser. pers.). Según el paradigma de dominancia-relativa de Littler & Littler (1984), las algas coralináceas incrustantes son consideradas como pobres competidoras y solamente deberían prevalecer en áreas disturbadas persistentemente, ya sea por un moderado a intenso pastoreo o por un oleaje fuerte y raspante. En el plano arenoso del PNNT, la coexistencia entre las algas frondosas-erguidas como *Laurencia* sp. (asociada con *A. taxiformis*) y *Dictyurus occidentalis* con las coralináceas incrustantes (ver coberturas Fig. 2 No 4-7) no se debió a las razones anteriores por lo que en ese lugar no hay pastoreo moderado ni intenso y tampoco un oleaje fuerte. Una de las razones para explicar esta coexistencia podría ser la reducción en la cobertura de las macroalgas frondosas por el aumento de la temperatura como causa de la declinación de la surgencia en la estación húmeda y la otra razón podría atribuirse a la discontinuidad del sustrato. Más sin embargo, la mortalidad de las coralináceas incrustantes es alta (Fig. 2 No. 6). Se plantea la hipótesis de que la deposición de sedimento fino, el cual es transportado por las corrientes de fondo de la estación húmeda, es la principal causa de esta mortalidad.

Influencia humana en los sistemas coralinos del Caribe

Los sistemas coralinos son de una gran longevidad geológica. Estos han venido desarrollándose bajo condiciones ambientales relativamente estables, las cuales han permitido durante su evolución una extraordinaria especiación en animales y plantas altamente especializados con intrincadas interrelaciones entre los organismos y el medio. Se considera hoy día un axioma que una declinación en la intensidad del herbivorismo y/o aumento en los niveles de los nutrientes, trae como consecuencia un dominio de las macroalgas, que según el caso pueden ser las microfilamentosas o las frondosas o coralináceas (Littler & Littler, 1984; Adey, 1998). Muchos de los sis-

temas coralinos del Caribe, especialmente los cercanos al continente, están sufriendo el impacto de altos niveles de nutrientes en asociación con la deposición de sedimentos provenientes de las descargas de los ríos. Estos altos niveles de nutrientes producen florecimientos de microalgas que junto con los sedimentos afectan la transparencia del agua, limitando de esta manera la producción fotosintética y el crecimiento de los corales. Por otro lado, se ha demostrado que ciertos niveles de fosfatos pueden inhibir la calcificación en los corales (ver Littler & Littler, 1988). Las descargas fluviales, muchas veces ricas en compuestos amoniacales antropogénicos, se acentúan cada vez como resultado del mal manejo económico que el ser humano viene dándole a la tierra, ya sea por medio de las deforestaciones ribereñas o por la construcción de canales que ponen en comunicación nuevas áreas marinas con ríos de gran caudal. Esta situación ha sido la causa básica de la mortandad masiva de corales por lo menos en los sistemas coralinos continentales de las islas del Rosario, islas de San Bernardo e Isla Fuerte en Colombia (Bula-Meyer, 2001). Más de las dos terceras partes del área coralina de estas islas están destruidas. Esta mortandad se aceleró con la casi desaparición de dos herbívoros muy importantes del sistema, el erizo negro *D. antillarum*, por causas desconocidas y el caracol de pala *Strombus gigas*, por sobrepesca en la década de los 80. Los altos niveles de nutrientes junto con la ausencia de estos herbívoros, permitieron la invasión de las macroalgas frondosas como: *Caulerpa racemosa*, *Halimeda opuntia*, *Lobophora variegata* y *Dictyota* spp. entre las más dominantes (Bula-Meyer, 2001). Estas algas junto con las esponjas, comienzan a ser los nuevos soberanos de unos sistemas que en años anteriores fueron uno de los paisajes marinos más hermosos del Caribe colombiano y un recurso invaluable para la humanidad.

A pesar de las innumerables investigaciones en los sistemas coralinos, la influencia humana continúa sobre estos ambientes, a una velocidad que sobrepasa la de nuestro entendimiento de los cambios ecológicos que se están dando en el lugar. De ahí, que sea difícil conservar lo que no entendemos.

Agradecimientos

A Colciencias por la financiación de estas investigaciones; a la Universidad del Magdalena por darme el tiempo necesario para desarrollar este trabajo; a la doctora L. Botero por brindarme muchas horas de ayuda en el campo; al doctor M. M. Littler por sus valiosas discusiones; y a Martha Díaz por la elaboración del documento.

Referencias

- Adey, W.H.** 1998. Coral reefs: algal structured and mediated ecosystems in shallow turbulent, alkaline waters. *J. Phycol.* **34**: 393-406.
- Atkinson, C.S., S. Hopley, L. Mendelsohn & S. Yacowitz.** 1973. Food studies on *Diadema antillarum* on a patch reef, St. Croix, U.S. Virgin Islands. In Ogden JC, Abbott DP, Abbott IA (eds), *Studies on the activity and food of the Echinoid Diadema antillarum Philippi on a West Indian patch reef West Indies Laboratory, Spec. Publ., St. Croix, U.S. Virgin Islands* **9**: 65-80.
- Bula-Meyer, G.** 1987. Taxonomic and ecologic studies of a subtidal sand plain macroalgal community in the Colombian Caribbean. Ph.D. Tesis. University of Delaware, Newark, USA. 189 p.
- _____. 1989a Micro-macroalgas marinas alelopáticas: biología, toxinas y significado ecofisiológico (revisión). *Rev. Ing. Pesq., (edic. especial), Santa Marta* **9**: 1-110.
- _____. 1989b Altas temperaturas estacionales del agua como condición disturbadora de las macroalgas del Parque Nacional Tairona, Caribe colombiano: una hipótesis. *An. Inst. Inv. Mar. Punta Betín* **19-20**: 9-21.
- _____. 1993. Están las algas marinas tropicales de los planos arenosos profundos fisiológicamente restringidas a estos habitats continuos al talud arrecifal. *Mem. VIII Sem. Nac. Cien. Tec. Mar* 196-205.
- _____. 1995. Macroalgas de la Isla de Gorgona (Pacífico colombiano) con nuevos registros y una explicación a la baja diversidad y biomasa. En Pinto, P. (Ed.), *La Isla de Gorgona: nuevos estudios biológicos. Biblioteca J.J. Triana*, **11**: 23-45.
- _____. 2001. Perturbación biológica extrema en los sistemas coralinos del Caribe. *Rev. Acad. Colom. Cien. Exactas, Fís. Y Nat.* (en prensa).
- Connell, J.H.** 1978. Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science* **199**: 1302-1310.
- Hawkins, S.J. & E. Harkin.** 1985. Preliminary canopy removal experiments in algal dominated communities low on the shore and in the shallow subtidal on the Isle Man. *Bot. Marina* **28**: 223-230.
- Hay, M.E.** 1981. Herbivory, algal distribution, and the maintenance of between-habitat diversity on a tropical fringing reef. *Am. Nat.* **118**: 520-540.
- _____. 1984. Predictable spatial escapes from herbivory: how do these affect the evolution of herbivore resistance in tropical marine communities? *Oecologia (Berlín)* **64**: 396-407.
- Hoek, C. van den.** 1969. Algal vegetation-types along the open coast of Curacao, Netherlands Antilles. *Proc. K. Ned. Akad. Wet. Ser. C.* **72**: 537-577.
- Lessios, HA., D.R. Robertson & J.D. Cubit.** 1984. Spread of *Diadema* mass mortality through the Caribbean. *Science* **266**: 335-337.
- Levin, D.A.** 1976. The chemical defenses of plants to pathogens and herbivores. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* **7**: 121-159.
- Lieberman, M., D.M. John & D. Lieberman.** 1979. Ecology of subtidal algae on seasonally devastated cobble substrates off Ghana. *Ecology* **60**: 1151-1161.
- Littler, M.M. & D.S. Littler.** 1984. Models of tropical reefs biogenesis: The contribution of algae (Ed. by F.E. Round) *Prog. Phycol. Res. (Biopress Bristol)* **3**: 323-364.
- _____. 1988. Structure and role of algae in tropical reef communities. In Lembi CA, Waaland JR (eds), *Algae and Human Affairs Cambridge University Press* 29-56.
- Paul, V.J. & M.E. Hay.** 1986. Seaweed susceptibility to herbivory: chemical and morphological correlates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **33**: 255-264.

DESIGN OF A SAMPLING NETWORK FOR AN ESTUARY IN THE COLOMBIAN CARIBBEAN

por

Ramón Giraldo Henao*, **Néstor Méndez**** & **David Ospina*****

Resumen

Giraldo Henao R., Méndez, N., & Ospina D.: Design of a sampling network for an estuary in the Colombian Caribbean. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **25(97):509-518**, 2001. ISSN 0370-3908.

Se diseñó una red de muestreo para el monitoreo de variables fisicoquímicas y biológicas en el estuario Ciénaga Grande de Santa Marta, ubicado en la costa norte de Colombia. Inicialmente, a través de muestreo sistemático de cuadrículas, se escogieron 115 puntos para medir las variables consideradas. Con base en los datos observados se estimó, para cada variable, la estructura de autocorrelación espacial por medio de la función de semivarianza. Posteriormente, para redes de diferente tamaño, se calcularon las correspondientes varianzas de predicción, tomando como base los modelos de semivarianza ajustados. La comparación de las varianzas de predicción para las diferentes redes y de los costos asociados con cada una de ellas, permitió establecer un conjunto de sitios de muestreo que a un costo razonable disminuyen el error de predicción para las variables de interés.

Palabras clave: Estuario, geoestadística, redes de muestreo.

Abstract

A network for monitoring physical chemistry and biological variables in the Ciénaga Grande de Santa Marta estuary, in the Caribbean coast of Colombia, was designed. Initially, through systematic sampling on a square grid, a set of 115 sampling points was chosen to measure the variables considered. Based on the data provided, a spatial auto-correlation structure for each variable was estimated through the semivariance function. Later, for different size networks, the kriging prediction variances were calculated, taking the adjusted semivariogram models as a basis. The comparison

* Department of Mathematics and Statistics National University of Colombia. Address: Departamento de Matemáticas y Estadística Universidad Nacional de Colombia, Ciudad Universitaria, Bogotá D.C. Colombia, Sudamérica. Phone: 571 3165000 ext. 13164 Fax: 5713165327. E-Mail: rgiraldo@matematicas.unal.edu.co

** Department of Physics, National University of Colombia. Address: Departamento de Física. Universidad Nacional de Colombia. Ciudad Universitaria, Bogotá, D.C. Colombia, Sudamérica. E-Mail: xman@coll.telecom.com.co

*** Department of Mathematics and Statistics National University of Colombia. Bogotá, D.C. Colombia. Address: Departamento de Matemáticas y Estadística. Universidad Nacional de Colombia, Ciudad Universitaria, Bogotá, D.C. Colombia, Sudamérica. Phone: 571 3165000 -13199. Fax: 5713165327. E-Mail: dospina@matematicas.unal.edu.co

among the prediction variances for the different networks and their associated costs allowed establishing a set of sampling sites, that at a reasonable cost, substantially diminishes the prediction error for the variables of interest.

Key Words: Estuary, geostatistics, sampling networks.

Introduction

In most environmental studies, obtaining and analyzing the data is often a slow and costly process that produces skepticism among the decision making entities. Because of this, it is of maximum importance to put sampling systems that provide the best possible information quickly and at low cost.

When a study requires following up the principal factors that control the processes of productivity in estuaries and other aquatic ecosystems, one must frequently recur to biological and ecological type criteria to select the sampling points. This procedure, although it is valid to satisfy very specific objectives, in many cases it is not sufficient and does not allow to have an integrated view of the ecosystem. In the best case, it makes the information that is taken redundant, and in this way increases the cost of the research. Because of this, it is necessary to establish a set of sampling sites that not only identify the conditions of the ecosystem in very strategic regions, but that also supplies general information on the set.

In environmental statistics, there are different approaches for solving the problem of estimating the size of the sample and the location of the sampling sites. Some classical approaches suppose taking independent random samples based on some adaptations of traditional sampling, carrying out the corresponding estimates. This is the case, among others, of the sampling of squares, transects or intercepts. Under these studies, the estimation of the parameters of interest are carried out assuming some probabilistic models (Dale *et al.*, 1991) or through some of the mathematical expressions proper of the sampling design used (Thompson, 1992; Seber 1986). Caselton & Zidek (1984) proposed selecting a monitoring network that is formulated as a decision problem whose solutions may be optimized. This theory assumed a multivariate normal structure in the data.

On the other hand, the problem has been treated assuming that the phenomenon to be studied represents a stochastic process. In this case, it is treated with regionalized variables (variables measured in a region) and it is supposed that they have structures of spatial auto-

correlation. In this respect Russo (1984) and Bresler & Green (1982), proposed procedures that are based in some of the criteria associated with the distance between the pairs of points or with the number of pairs of points by lag, respectively. The fundamental goal of both methods is to find the suitable configuration of points to calculate the semivariogram. The advantage is that it does not require any initial information about the characteristic of interest. Nevertheless, problems can come up when point distributions are proposed that let large zones of the region to be studied with no observation point at all. McBratney *et al.* (1981) and McBratney & Webster (1981), presented a procedure that consists of selecting a sampling network that minimizes the standard prediction of kriging error. This method differs from the two foregoing ones in that it requires initial information of the variable, allowing an estimation of the semivariance function.

In this study, the methodology proposed by McBratney *et al.* (1981) was applied with the goal of designing a sampling network for the estuary called Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) located on the northern coast of Colombia (Figure 1; IGAC, 1973). The CGSM, because of its large area (450 km²) and its ecological and economic importance (more than 5 lakeside towns living off the ecosystem), has been the center of different kinds of studies. Over the last two decades, it has been showing signs of deterioration, and some civil works trying to recover it, have been carried out. For the monitoring of the changes that have been taking place in the ecosystem, it became necessary to have a set of sampling sites that allow an integrated overview of the behavior of the principal variables that govern its productivity processes.

Method

This study is developed using geostatistical methods. The Geostatistics is a branch of statistics that treats spatial phenomena (Journel & Huijbregts, 1978). Its primordial interest is the estimation, prediction and simulation of such phenomena (Myers, 1987).

Geostatistics provides a way of describing spatial continuity, which is an essential distinctive feature of

many natural phenomena and provides adaptation of classical regression techniques to take advantage of this continuity (Isaaks & Srivastava, 1987). Petígas (1996), defines it as an application of probability theory to the statistical prediction of regionalized variables. The results of the prediction process may be applied with diverse objectives, among others, in the design of sampling networks (Cressie, 1989). The geostatistical analysis is a two-step procedure. First, the spatial structure of the variable is examined with the semivariance analysis. Once a spatial structure has been identified and accurately described by a suitable model, the kriging procedure provides optimal interpolation of the variable at unsampled sites (Rossi *et al.*, 1995).

The difference between kriging and deterministic methods is that in kriging there is estimation of the prediction variance in each point of prediction and consequently a measure of the prediction error. The prediction variance of each point is calculated by (Cressie, 1991):

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{i0} + \mu \quad (1)$$

γ_{i0} is equal to the semivariance function calculated for the distance between the i^{th} -sampling observation and the point where the prediction is desired. The λ_i are calculated by finding the minimum values of the variance of prediction function subject to the restriction that the predictor will be unbiased, for which the Lagrange multipliers m are used. In Giraldo *et al.* (2000) is summarized both the theory of estimation of the spatial structure and prediction method by Kriging.

From equation (1) it is evident that the prediction variance is not constant as in the classic case, as it depends on the semivariance function, which is a monotone function which increases with the distance between the observation and the points where the prediction is made. McBratney *et al.* (1981) shows that, for any sample density, the maximum distance between one point of observation and an interpolation point is minimum when the configuration of the observed points is made in a triangular grid. Under this point, smaller prediction variances will be obtained. Nevertheless, this same author and Warrick *et al.* (1986) indicate that for logistic reasons referent to the location of the field sites and to minimize travelling from point to point, a square grid may be preferable.

Accordingly, the problem of design sampling networks is limited to establishing for different sampling networks, with either an equilateral triangular grid or a square one, the relationship between the maximum prediction variances (those obtained at the center of the triangle or square) and their associated costs. In this way, the necessary cost to reach a certain degree of security can be deduced immediately or, on the contrary, the prediction variance if the cost is prefixed.

Data and procedure

The information used for the analysis was taken during the intensive sampling campaign carried in March 1997, at the CGSM (Figure 1). The area is particularly arid, with a dry season from December to August (interrupted by a short rainy season from May to June) and a major rainy season from September to November (Wiedemann, 1973). Water samples from the surface of the water column were analyzed for the following variables: temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity, total suspended solids (mg l^{-1}), depth (m), silicates ($\mu\text{mol l}^{-1}$), chlorophyll "a" ($\mu\text{g l}^{-1}$), dissolved oxygen (mg l^{-1}), nitrites ($\mu\text{mol l}^{-1}$) and chlorophyll "c" ($\mu\text{g l}^{-1}$). These variables are considered to be of great influence in the primary productivity processes and in the biodiversity of aquatic ecosystems like the one being considered (Vidal, 1995). Between 103 and 114 observations were obtained for each variable. The data was taken throughout the system by systematic samples of squares of 4 km^2 (Figure 2). The location of each sampling point was carried out using a geo-positioning device.

Once the data were obtained, descriptive measures were calculated to summarize the information. Through dispersion charts (that are not included in the text) the spatial stationarity assumption (Giraldo *et al.*, 2000) was evaluated. For each variable, the spatial auto-correlation structure was estimated through the experimental semivariogram. In the same way, the theoretical models were adjusted using the GeoEAS software (Englund & Sparks, 1988) and sampling networks were simulated with square grids of 4 (the observed), 9, 16, 25 and 36 km^2 , respectively (Figure 3). The corresponding prediction variances of each variable were estimated taking as the basis the estimated spatial correlation models.

The prediction variances that were obtained were related to the associated costs of measuring each variable in each sampling density. The final decision on the proposed sampling network was based on practical criteria founded on the prediction variance-cost relationship.

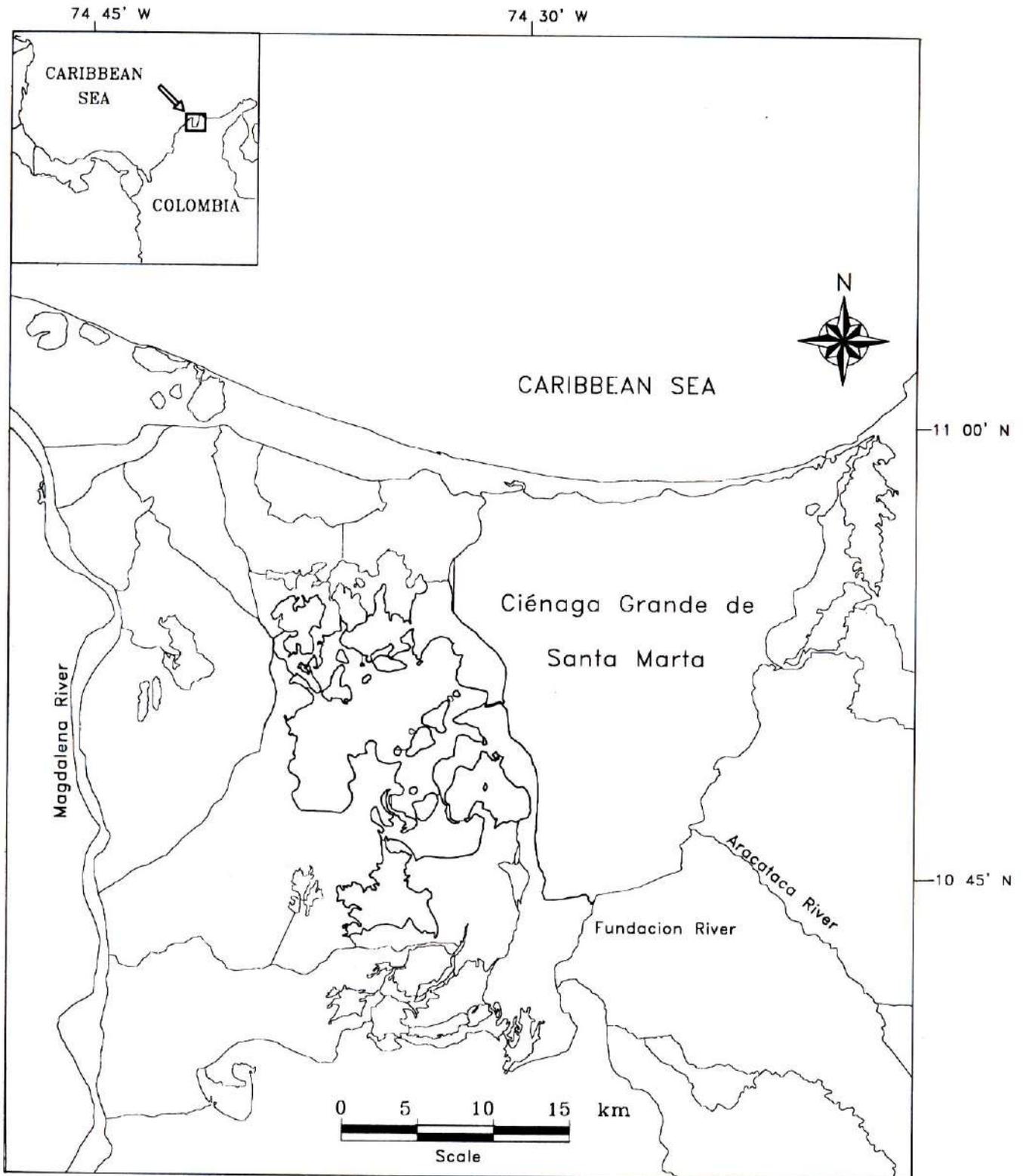


Figure 1. Geographical location of the Ciénaga Grande de Santa Marta estuary.

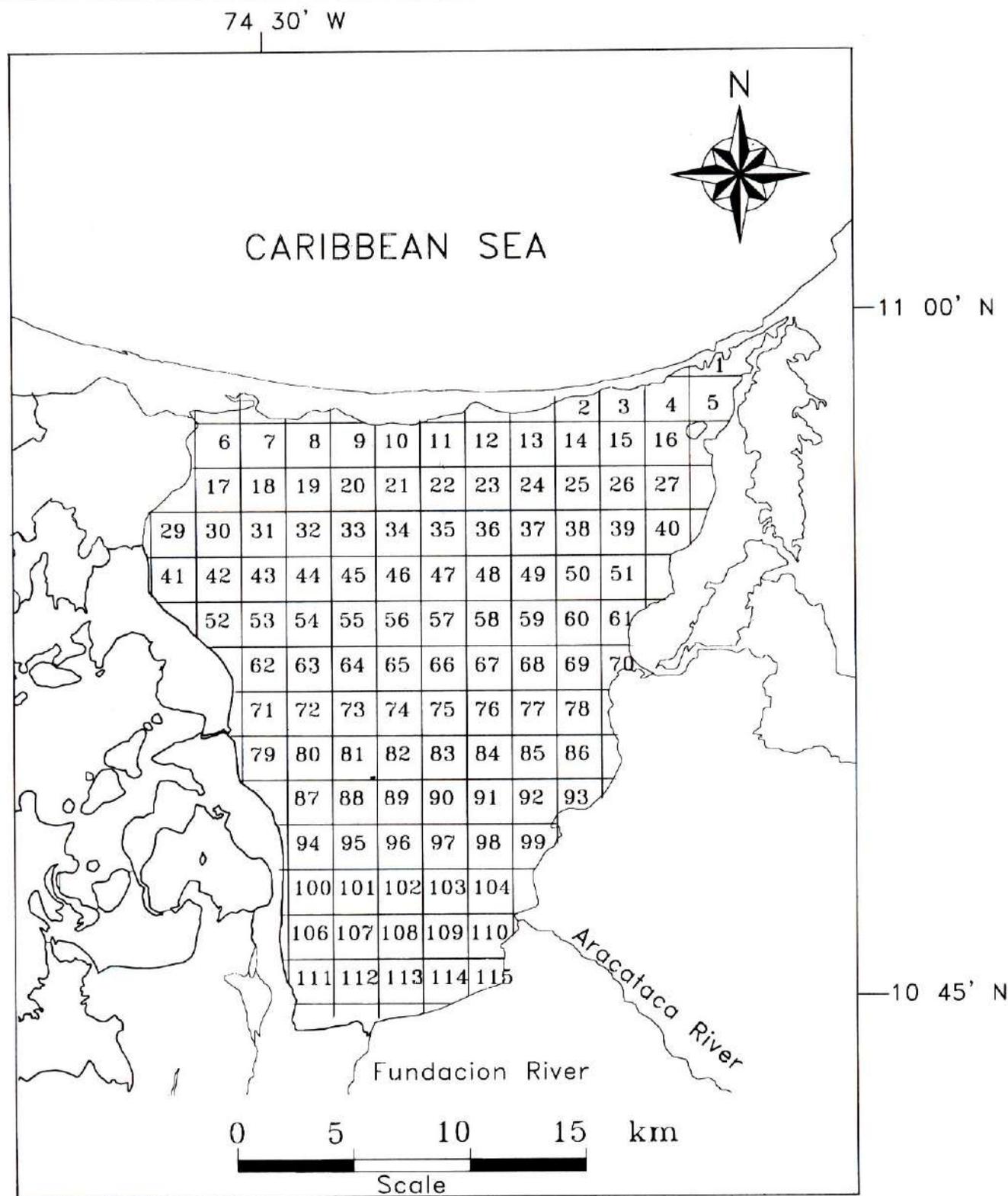


Figure 2. Initial sampling network (squares of 4 km²) used to capture data. Sampling points were at center of each square.

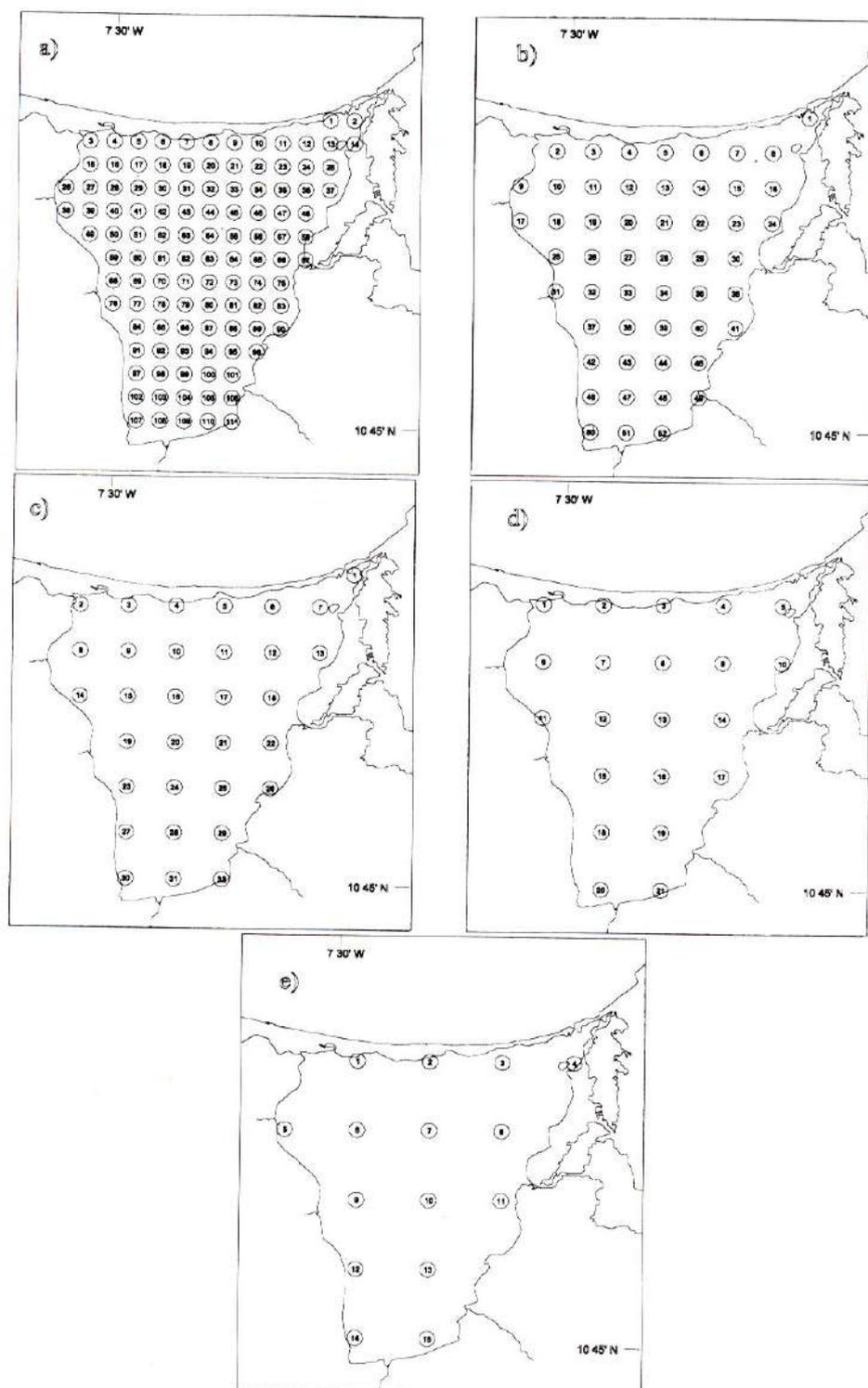


Figure 3. The sampling networks under which the estimation of the prediction variances were made for each one of the variables considered, assuming the estimated semivariance models. The distances between the sampling points: a) 2000 m; b) 3000 m; c) 4000 m; d) 5000 m and e) 6000 m.

Results and discussion

In general, according to the mean, minimum, and maximum values calculated and observed (Table 1), the variables considered have atypical magnitudes compared to those historically observed for the same time of the year (Giraldo *et al.*, 1995). The mean value for salinity was "low" compared to that registered for the same time of the year in other studies (about 25). The opposite happened in variables like nitrites, silicates, and chlorophyll, in which the observed magnitudes were similar to those reported in other studies (Vidal, 1995) for the rainiest months of the year, in which it is reasonable to find them in high concentrations, due to the larger supply of water from the rivers that run into the ecosystem. The above may be due to a possible increase in the flow of the rivers that run into the estuary during the rainy month preceding the sampling, as a consequence of the *el niño* phenomenon in the area at the end of 1996.

However, for the purpose of this study these differences are not an obstacle, since in fact it is assumed that the establishment of an optimum set of sampling points does not depend on the magnitude of the variables, but on the spatial correlation structure.

The values calculated for the coefficient of variation (Table 1) indicate that, with the exception of nitrite and chlorophyll "c", the variables are in general homogeneous (variation coefficients less than 40%). This would imply, from at least one classical point of view, that relatively small sampling sizes can be established for the follow-up of the variables.

The adjusted semivariance models (Table 2) show strong spatial association patterns of the variables in the area. The ranges that are reached, up to 30 km, are relatively high if one takes into account that the distance between the extreme north and south of the system (the

Table 1. Descriptive statistics of the physical-chemical and biological variables measured in Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. Sampling carried out in March, 1997. Calculations based on data of n sites. S.D. = Standard Deviation; C.V. = Coefficient of Variation

Variable	n	Mean	S.D	Minimum	Maximun	V. C (%)
Depht	114	1.47	0.35	0.25	2.50	24.1
Temperature	114	29.43	2.12	26.00	33.20	7.2
Salinity	114	17.62	2.85	13.02	34.95	16.1
Dissolved oxygen	114	8.80	3.25	3.03	16.29	36.9
Total Suspended Solids	103	218.20	41.18	103.00	318.00	18.8
Nitrites	112	0.43	0.30	0.01	1.61	70.8
Silicates	112	245.29	61.51	10.99	358.74	25.1
Chlorophyll a	107	132.44	31.58	2.91	198.35	23.8
Chlorophyll c	107	8.94	7.76	0.00	31.41	86.8

Table 2. Theoretical semivariance models adjusted to experimental semivariograms calculated from information on physical-chemical and biological variables measured in two sampling expeditions carried out in March and in October 1997 in the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia

Variable	Type	Nugget	Sill	Range (m)	r ²
Depht	Gaussian	0.07	0.12	24850	0.993
Temperature	Gaussian	0.32	6.45	15230	0.999
Salinity	Lineal	0.18	12.30	20000	0.897
Dissolved oxygen	Gaussian	1.83	14.32	12940	0.998
Total suspended solids	Linear	1087.10	1138.20	22000	0.907
Nitrites	Linear	0.07	0.04	22000	0.876
Silicates	Gaussian	1810.00	2089.00	7240	0.999
Chlorophyll a	Spherical	116.68	597.40	6940	0.980
Chlorophyll c	Linear	29.95	81.68	30000	0.944

longest distance) is not more than 30 km. The above gives rise to a reduction in the kriging prediction variance suggesting a smaller number of sampling sites. This underlines the fact that, with respect to the other two parameters, in no case the value of the nugget was greater than 50% of the value of the sill (Table 2). This, according to Diaz-Francés (1993), is recommendable for the spatial correlation model to adequately describe reality.

Given that the goal of the study is not to make a description of the distribution of the variables in the system, there is no summary of the results that were obtained in the prediction process in the text. Nevertheless, it is valid to mention that the prediction errors (Table 3) in almost all cases were less than 5% of

the predicted values, which indicates that if any specific probability distribution is assumed, low confidence intervals would be obtained.

As it was expected, the estimated standard prediction errors grow as a function of the distance between the sampling points (Table 3). Salinity is the variable with which the greatest gain in precision was attained (35%) when changing to the less dense network (Figure 3 (e)), to the densest (Figure 3(a)), (Table 4). Other variables such as temperature, dissolved oxygen, silicates, and chlorophyll "a" had precision increases that varied between 15.9% and 23.8% (Table 4). Finally, for depth, nitrites, total suspended solids and chlorophyll "c", the increase in precision was only in percentages between

Table 3. Maximum standard prediction error (square root of the variance) of each variable for sampling networks with grids of 4, 9, 16, 25, and 36 km²

Variables	Network Size (Distance in meters between sampling points)				
	2000	3000	4000	5000	6000
Depth	0.2825	0.2874	0.2930	0.3002	0.3070
Temperature	0.6380	0.6690	0.7046	0.7632	0.8373
Salinity	0.9096	1.0511	1.1676	1.2965	1.4075
Dissolved oxygen	1.5145	1.5917	1.6752	1.7977	1.9431
Total suspended solids	35.6363	36.4021	37.0459	37.8076	38.5197
Nitrites	0.2832	0.2875	0.2913	0.2958	0.3003
Silicates	47.6524	50.2070	52.3806	54.6797	56.6932
Chlorophyll a	19.4634	21.2041	22.5233	23.5582	24.2163
Chlorophyll c	6.1071	6.2977	6.4536	6.6336	6.7967

Table 4. Increase in precision (percentage reduction of the standard prediction error) of each sampling network (observed and simulated) with respect to the 6000 meter network (the least dense)

Variables	Network Size (Distance in meters between sampling points)				
	2000	3000	4000	5000	6000
Depth	8.0	6.4	4.6	2.2	0
Temperature	23.8	20.1	15.8	8.8	0
Salinity	35.4	25.3	17.0	7.9	0
Dissolved oxygen	22.1	18.1	13.8	7.5	0
Total suspended solids	7.5	5.5	3.8	1.8	0
Nitrites	5.7	4.3	3.0	1.5	0
Silicates	15.9	11.4	7.6	3.6	0
Chlorophyll a	19.6	12.4	7.0	2.7	0
Chlorophyll c	10.1	7.3	5.0	2.4	0

5.7% and 10.1% (Table 4). Obviously, when comparing the intermediate networks, those with grid distances between 3000, 4000, and 5000 m. (Figure 3 (b), 3(c), and 3(d)), with the 6000 m network (Figure 3(e)), the relative increase in precision was much less (Table 4).

The sampling costs associated with each variable under each sampling density were different, with the exception of the variables of temperature, depth, and salinity, whose cost for the 2000 m network was much lower than the other variables (Figure 4). For some of the variables (dissolved oxygen, silicates, and chlorophyll) going from a 3000 m network to a 2000 m the sampling cost increased in more than Colombian \$500.000 (about US \$240).

Hence, for temperature and salinity, it would be much more convenient to make an intense sampling (the densest network) as this would increase the efficiency in a considerable percentage (23% and 35%, respectively, with net costs increased in only about Colombian \$190.000 (about US \$90) (Figure 4). For depth, even if the sampling costs are not significantly increased (Figure 4), is more recommendable to sample it in the less dense network, given that the efficiency is increased by a maximum of 7% in comparison with the other networks (Table 4). For nitrite, total suspended solids and chlorophyll "c", there is only a little increase in the efficiency with increasing network density (Table 3); on the contrary, the costs, especially in the 2000 m network, increase considerably. Hence the less dense networks (5000 m and 6000 m between sampling points) are the most adequate for the follow-up of these variables. In the remaining variables (dissolved oxygen, silicates and chlorophyll "a"), the decision is complex given that there are considerable increases in the costs (Figure 4) and the efficiencies with increasing density (Table 4).

A global analysis of the increases in cost and in efficiency (Table 5) clearly show that the 2000 m network is the least recommendable given that, compared to the

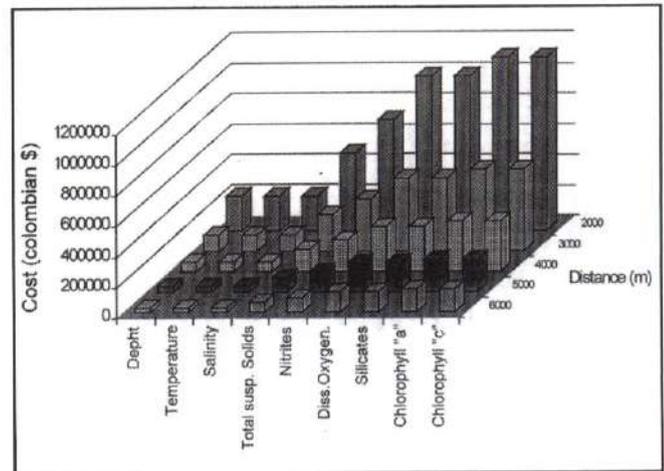


Figure 4. The estimates sampling costs for each variable under five sampling networks, in which the prediction variances were calculated.

3000 m one, there is a high increase in costs (more that 200%) but the relative efficiency increases in only 4.9%. While in relative terms, the change in efficiency and the costs going from one network to another with a greater number of points is similar (with the exception of the 2000 m one), the networks with distances between sampling points of 4000 m and 5000 m should be considered [(Figure 3(b) and 3 (c))] to be the most advisable, given that they produce a greater efficiency that the one obtained in the 6000 m, with slightly higher costs (Figure 4).

The suggestion given in the foregoing paragraph about the optimum sampling arrangement to monitor the variables considered in the ecosystem under study, are not in any way absolute. In the final analysis, while comparing the functions of cost and of statistical efficiency, many purely empirical criteria have been used. Nevertheless it is considered that the agencies that make the final decision should have a tool that allows them to plan the most adequate monitoring strategy for the future.

Table 5. Costs increases (net and relative) and efficiency (average of the nine variables) with increasing network density

Networks From - To	Increase (Colombian \$)	Relative increase in cost (%)	Relative increase in efficiency (%)
6000 m - 5000 m	332.900	140	4.27
5000 m - 4000 m	611.150	152	4.63
4000 m - 3000 m	1'112.000	162	4.15
3000 m - 2000 m	3'282.350	213	4.90

Literature cited

- Bresler, E. & Green, R. E.** 1982. Soil parameters and sampling scheme for characterizing soil hydraulic properties of a watershed. Technical report Number 148, University of Hawaii, Honolulu.
- Casleton, W. F. & Zidek, J. V.** 1984. Optimal monitoring networks designs. *Statistics & Probability Letters*, 2: 223-227.
- Cressie, N.** 1989. Geostatistics. *The American Statistician*, 43(4): 611-623.
- . 1991. *Statistical for spatial data*, John Wiley & Sons, New York.
- Díaz-Francés, E.** 1993. Introducción a los conceptos básicos de geoestadística. Memorias del seminario en Estadística y Medio Ambiente, CIMAT, Guanajuato, México.
- Dale, V. H., Franklin, R. L. A., Post, W. M. & Gardner, R. H.** 1991. Sampling ecological information: Choice of sample size. *Ecological Modeling*, 57: 1-10.
- Englund, E. and Sparks, A.** 1988. *GeoEAS User's guide*. E. P. A. Las Vegas, Nevada.
- Giraldo, R., J. Martínez, S. Zea, H. Hurtado & E. Madera.** 1995. Análisis de clasificación de series temporales: El caso de la salinidad en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *An. Inst. Invest. Mar. Punta Betón*, 24: 123-134.
- Giraldo, R., W. Troncoso, J. E. Mancera & N. Méndez.** 2000. Geoestadística. Una herramienta para la modelación en estuarios. *Rev. Acad. Col. Ciencias*, 24(90), 59-72.
- IGAC.** 1973. Monografía del Departamento del Magdalena. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá.
- Isaaks, E. & Srivastava, R. M.** 1987. *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- Journel, A.G. & Huijbregts, C. J.** 1978. *Mining Geostatistics*, Academic Press, New York.
- McBratney, A. B., Webster, R. & Burgess, T. M.** 1981. The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables I. *Computers and Geosciences*, 7(4): 331-334.
- McBratney, A. B. & Webster, R.** 1981. The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables II. *Computers and Geosciences*, 7(4) : 335-365.
- Myers, D. E.** 1987. Optimization of sampling locations for variogram calculations. *Water Resources Research*, 23(3): 283-293.
- Petitgas, P.** 1996. Geostatistics and their applications to fisheries survey data. in Megrey, B. A. and Moksness, E. (eds), *Computers in Fisheries Research*, pp 114-142, Chapman-Hall, London.
- Rossi, J. P., Lavelle, P. & J. E. Tondoh.** 1995. Statistical tool for soil biology. *Geostatistical analysis. Eur. J. Soil Biol.* 31(4), 173-181.
- Russo, D.** 1984. Design of an optimal sampling network for estimating the variogram. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48: 708-716.
- Seber, G. A. F.** 1986. A review of estimating animal abundance. *Biometrics*, 42: 267- 269.
- Thompson, S. K.** 1992. *Sampling*, John Wiley & Sons, New York.
- Vidal, L. A.** 1995. Estudio del fitoplancton en el sistema lagunar estuarino tropical Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia, durante el año 1987. Tesis M. Sc. Biol. Mar., Universidad Nacional de Colombia, Santa Fe de Bogotá.
- Warrick, A. W., D. E. Myers and Nielsen, D. R.** 1986. Geostatistical methods applied to soil science. *Methods of soil analysis. Part 1, Physical and mineralogical methods*, Agronomy Monograph Number 9: 53 – 81.
- Wiedemann, H. V.** 1973. Reconnaissance of the C. G. S. M., Colombia: Physical parameters and geologic history. *Milt. Inst. Colombo-Aleman Inv. Cientif.*, 7: 85-119.

UN NUEVO MODELO ESTRATÉGICO Y OTRAS PERSPECTIVAS SOBRE EL MANEJO DE RECURSOS BIÓTICOS TROPICALES EN ZONAS DE CONSERVACIÓN Y DESARROLLO INTEGRAL

por

John James Pipoly III*

Resumen

Pipoly III, John James: Un nuevo modelo estratégico para el manejo de recursos bióticos en zonas de conservación y desarrollo integral. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **25**(97): 519-528, 2001. ISSN 0370-3908.

Se presenta un nuevo modelo estratégico para manejar recursos bióticos en zonas de conservación y desarrollo integral. El modelo pretende proveer una metodología para analizar la presencia de recursos bióticos, y la relación fenológica de los productos, y, por consiguiente, su flujo de caja. Ese análisis ofrece a las autoridades de la comunidad que manejan la zona, la oportunidad de agregar cuidadosamente otras microempresas. El seguimiento constante de la extracción y el flujo resultante permite el manejo por adaptación. Aunque el modelo no pretende involucrarse en el cálculo prospectivo de bienes a largo plazo, se provee un guión para medir el levantamiento del programa y el seguimiento del desarrollo.

Palabras clave: conservación, desarrollo sostenible, ecología económica, inventario biológico tropical, biodiversidad.

Abstract

A new strategic model for management of biotic resources from integrated conservation and development areas is presented. The model is intended to give any of these areas a way to analyze the presence of biotic resources in light of their phenology and consequent cash flow. Through this analysis, local area managers have the opportunity to add appropriate small businesses. The constant monitoring of both extraction and resultant cash flow permits use of the adaptive management protocol. While the model does not provide for calculations of prospective long-term earnings, it provides an outline for the community coordinators as they develop their program and monitor its development.

Key words: conservation, sustainable development, ecological economics, tropical biological inventory, biodiversity.

* Fairchild Tropical Garden Research Center, 11935 Old Cutler Road, Coral Gables, Florida 33156-4299, EE. UU. jjpipoly@fairchildgarden.org

Introducción: La crisis sobre la Biodiversidad y la situación actual

Según la Unión para la Conservación de la Naturaleza y Recursos Naturales (IUCN), 20 millones de hectáreas de bosques fueron destruidos en 1999 (IUCN 2000). También, en su lista roja, se indica que hasta 34.000 especies de plantas se encuentran en vía de extinción; además las cifras son igualmente preocupantes para mamíferos, aves, reptiles, anfibios, peces, y otras especies. En un informe publicado el 2 de mayo del 2001, por la Comisión para el Desarrollo Sostenible de la ONU se indicó que hasta la fecha, más de 125 países en desarrollo han organizado estrategias nacionales y planes de acción para mantener la biodiversidad (United Nations, 2001). Sin embargo, los bosques, especialmente los tropicales, siguen desapareciendo y la crisis resultante amenaza la capacidad de nuestro planeta para sostener entidades biológicas (Laurance 1999a, 1999b).

El Convenio sobre la Biodiversidad, tuvo efecto el 29 de diciembre de 1993 y los resultados de su implementación fueron dados por la Comisión sobre el Desarrollo Sostenible de la ONU (United Nations 1997). En su informe, la Comisión enfatizó, una vez más, la importancia de la integración de actividades para conservar la diversidad biológica con actividades que promuevan el desarrollo sostenible. Desde entonces, el número de zonas de conservación y desarrollo sostenible se ha incrementado drásticamente. El propósito de dichas zonas ha sido específicamente el de cumplir con el Capítulo 8 de la Agenda 21 (United Nations, 1997), para seguir los criterios establecidos en el Convenio, Artículo 6, subpárrafo (b), donde se recomienda, en lo posible, que se integren la conservación y el uso sostenible de la diversidad biológica, a través de planes, programas y políticas sectoriales o intersectoriales. Además, como se explicó claramente en el Capítulo 10 de la Agenda 21, se requiere que se usen metodologías integrales para la planeación y manejo de los recursos terrestres. El trabajo que explica más claramente las relaciones entre los programas de seguimiento de la ONU a través de la UNEP (1996a, 1996b) y la UNESCO (1995), con los requisitos del Convenio es el trabajo de Dogné (1998), donde se incorporan tablas para decidir sobre sitios en donde establecer inventarios permanentes, factores con impactos deletéreos al medio ambiente, y prioridades para la investigación entre los campos socio-económicos y biofísicos. El informe de Danielsen et al. (2000) es muy parecido al trabajo de Dogné, basado en experiencias en las Filipinas. Muchos de los términos, como sostenibilidad, equidad, capacidad de sostenimiento, ya sea biofísico, social, instantáneo, y

sostenible, se definen en las publicaciones de Daily & Ehrlich (1996) y Fearnside (1986).

El concepto de las Zonas de Conservación y Desarrollo Integral (ICAD)

El concepto de la zona de conservación y desarrollo integral (ICDP o ICAD) ha sido promulgado por diferentes organizaciones a nivel mundial (United Nations, IUCN, WWF, etc.), especialmente por las organizaciones sin ánimo de lucro (ONG). Con el informe de Brundtland (1987) dio origen a la controversia sobre la crisis de la biodiversidad y su relación con el desarrollo sostenible. Después de la reunión de la Sociedad Ecológica de América (ESA) en agosto de 1988, se produjo un documento donde se explicó la Iniciativa para una Biósfera Sustentable (Lubchenco et al. 1991). En ese documento, se plantea, como pauta necesaria para promover una biósfera sustentable, "desarrollar enfoques interdisciplinarios y multidisciplinarios que integren ecología, economía y otras ciencias sociales." Casi simultáneamente, McNeely (1988) propuso un modelo con incentivos económicos para fomentar la conservación de los recursos bióticos. Después de esa iniciativa, la campaña más directa para apoyar, adelantar y fomentar el concepto ha sido el programa "Biodiversity Support," establecido en 1988, y emprendido por un consorcio de organizaciones bajo el auspicio de la Agencia del Desarrollo Internacional de los EE.UU. El programa produjo una serie de publicaciones sobre zonas de conservación y desarrollo integral, empezando con un manual de metodología para establecer las zonas (Brown & Wyckoff-Baird 1992). La importancia del seguimiento ecológico para manejar la biodiversidad fue bien explicada en el trabajo de Noss (1990), donde se presentó un patrón jerárquico para analizar la diversidad sobre los niveles de paisaje regional, comunidad ecológica, población de cada especie y nivel genético dentro de cada especie. En los planes para el seguimiento, se tienen que proveer datos cuyos análisis revelen la composición, estructura y función del ecosistema que sostiene la biodiversidad en una zona dicha, y aún más importante, su capacidad de aguantar extracción (capacidad de sostenimiento) a largo plazo. También implica conocer el nivel de productividad económica. Fuentes (1993) y Mangel et al. (1993) exigieron a la comunidad científica se estudiara el concepto de sostenibilidad seriamente, dado que ambos trabajos critican el concepto cínico de Ludwig et al. (1993). Socolow (1993) acertó al plantear como, los proyectos tienen que tener en cuenta las imperfecciones del ser humano, y ser flexibles en sus opciones. Los trabajos de Hilborn & Ludwig (1993) y Willers (1994) han sido más cínicos

aún. **Kremen et al.** (1994), revelaron que solamente 14% de los proyectos de conservación y desarrollo previos a 1994 tenían un impacto positivo y verificable en cuanto a la conservación de la vida silvestre. En el mismo año, **Peters** (1994) produjo un manual para bosques húmedos tropicales, donde provee una metodología para el seguimiento constante de las cosechas y para determinar la sostenibilidad de productos no maderables. **Goodland** (1995) publicó una obra fundamental sobre la sostenibilidad medio ambiental en la que se discuten los conceptos anteriores dentro del marco histórico y con referencia a la sostenibilidad social, económica y medio ambiental. Desde entonces, se han publicado para zonas particulares, varios informes sobre lecciones, experiencias, éxitos y fallos que se recomiendan revisar, incluyendo: **Abbot & Thomas** (2001), **Alpert** (1996), **Badola** (1998), **Barret & Arcese** (1995), **Gould et al.** (1998), **Jones** (1999), **Newmark** (2000), **Papola** (1996), **Sierra et al.** (1999). En cuanto a metodología sobre el establecimiento y manejo de las zonas ICAD, los trabajos de **Margoluis & Salafsky** (1998), y **Salafsky & Margoluis** (1999) han sido los más completos y se basan en experiencias amplias al nivel mundial.

Uno de los principios más importantes en el marco del manejo para los proyectos ICAD ha sido el concepto de "manejo con capacidad para adaptación" (**Dallmeier & Comiskey** 1998a, **Margoluis & Salafsky** 1998, **Salafsky & Margoluis** 1999), que consiste en: 1) esclarecimiento de la misión del grupo, un grupo comprendido por miembros de la comunidad, 2) diseño de un modelo conceptual para el proyecto, basado en normas y condiciones autóctonas de la región, 3) formulación de un plan de manejo, que incluye metas, objetivos y actividades claramente específicas, 4) desarrollo de un plan de seguimiento, 5) formulación e implementación del plan del proyecto sobre la base del modelo conceptual, plan de manejo y plan de seguimiento, 6) análisis de datos y comunicación de los resultados a las entidades interesadas, 7) reiteración de los procesos dos a cuatro según los resultados del análisis de datos (**Margoluis & Salafsky**, 1998; **Salafsky & Margoluis** 1999). Además del marco anterior, se establece el proyecto en dos escenarios: 1) áreas protegidas, donde se establece una zona protectora para disminuir o parar la amenaza para la biodiversidad, o 2) sustitución económica, donde el proyecto promueve una actividad económica ecológicamente menos dañina al medio ambiente (**Salafsky & Margoluis** 1999). Siempre y cuando haya zonas de diversidad biológica, teóricamente rescatables, ambas alternativas pueden resultar en proyectos íntimamente ligados con la biodiversidad local (**Salafsky & Margoluis** 1999). El presente modelo se re-

fiere específicamente al último caso, en particular, al caso en que hay recursos bióticos terrestres y acuáticos (aguas dulces) donde miembros de la comunidad de habitantes tiene una tradición extraccionista y están enfrentando el dilema del desarrollo con algún deseo de permanecer en esas tierras a largo plazo. Para ser eficaz, en estos casos, la comunidad habitante debe: 1) tener alguna jerarquía social dentro de la comunidad, con normas establecidas y un sistema de división de labores dentro de sí misma, 2) tener el poder de determinar la disponibilidad de los recursos, 3) tener título para las tierras, o derecho al aprovechamiento de sus recursos, 4) tener un mecanismo de control de acceso, y 5) tener algún conocimiento, ya sea formal, o tradicional, sobre el uso, la dinámica y el valor de los recursos.

Elementos básicos del seguimiento y extracción de recursos bióticos en Zonas de Conservación y Desarrollo Integral

Cuando una comunidad de habitantes tiene la voluntad de bajar el nivel de extracción para que la misma ocasiona menos daño por sus prácticas extractivas, se supone que tiene una especie de proyecto en cuanto al desarrollo y un plan preliminar para el manejo de los recursos. La comunidad tiene que tener interés en permanecer allí y lograr su desarrollo sin tener deseos de emigrar a otro sitio, porque la probabilidad de éxito depende, hasta cierto punto, de la habilidad de mantenerse mientras se desarrolla gradualmente, con constancia y adaptando el manejo de manera periódica. Con esta idea, la estrategia de seguimiento es elemental para refinar el estilo de manejo, y finalmente, para determinar si todo el proyecto es sostenible, sólo, con intervención menor, o con intervención o agregación de bienes externos, por actividades no relacionadas con el manejo de los recursos bióticos. Cuando se diseña el plan de manejo, se deben considerar los siguientes elementos:

1. Llevar a cabo una encuesta dentro toda la comunidad sobre los productos que usan provenientes de fuentes silvestres de la biodiversidad. Es importante también determinar cual es el hábitat de cada producto y la fenología óptima para su cosecha. Hay que clasificar los productos según su uso (ver punto 4). También, es prudente consultar con los sociólogos o antropólogos que trabajan con la comunidad para entender mejor la división de la mano de obra entre las distintas clases según su edad y género. Aunque podría haber diferencias significativas entre hogares, familias y sectores de la comunidad (**Kvist & Nebel** 2001; **Kvist et al.** 2001b), es necesario

cuantificar, evaluar la magnitud de esas diferencias cuantitativas y cualitativas por encuestas preliminares.

2. Delimitar zonas biológicas cartográficamente. Si no existe un mapa de la zona, hay que elaborar mapas básicos para circunscribir los diferentes ambientes (formaciones o hábitats), ya sean actualmente productores o no. Preferiblemente, los mapas se deben realizar sobre la base de la tecnología SIG, porque ahora es posible estimar la diversidad presente en cada zona sobre la base de esa tecnología (Bitter 1999; Geoghegan et al. 2001; Gerard et al. 1998; INR 2001; Lund et al. 1995, 1998; Myint & Pradhan 1999; Pradan 1996, Puredorj et al. 1998; Roy & Tomar 2000; Rybaczuk 2001; Stohlgren et al. 2000; Stoms & Estes 1993; Turner & Gardner 1994). Los mapas permiten la comparación de la zona de seguimiento con otras posibles zonas productoras.

3. Instalar inventarios ecológicos permanentes dentro de cada zona de vida (p.e., vegetación), con fines de seguimiento a largo plazo. Antes de 1994, los datos cuantitativos frecuentemente estaban ausentes de los ICAD y con frecuencia faltaban datos cuantitativos, pero el trabajo de Peters (1994), y las críticas de Alpert (1995) llamaron la atención sobre el problema. Actualmente, poco a poco, se trata de resolverlo, pero la solución depende de las necesidades, del presupuesto disponible, y de las circunstancias particulares de cada caso. El inventario servirá tanto a los científicos como a la comunidad en cuanto a la documentación de la biodiversidad, la estructura del bosque, la importancia ecológica de cada especie, etc. Estos inventarios comprenden los marcos para el seguimiento de las zonas en proceso de desarrollo, especialmente para proveer datos cuantitativos relacionados con el ciclo vital (mortalidad, reclutamiento, cambios fenológicos episódicos, etc.). Se recomienda una parcela permanente de 1 ha, si es posible, donde se incluyan árboles > 10 cm DAP ("diámetro a pecho", medido 1.4 m arriba del piso), y para lianas > 10 cm en promedio sobre los primeros dos metros arriba del piso. Para plantas leñosas entre 2.5 y 10 cm DAP, se recomienda un corte de 0.1 ha (Comiskey 1994, Dallmeier 1992, Dallmeier & Comiskey 1996, Pipoly 1996; Pipoly & Madulid, 1998). Además, se recomienda el método de "intercepción de línea" para el nivel herbal en la parte de los inventarios permanentes no-forestales, el cual se trabaja con datos de porcentaje de cobertura (Pipoly 1996). Se ha observado que una hectárea es el área más común, aunque la forma exacta de los inventarios es variable. Stohlgren et al. (1995), se recomiendan los 14 puntos conocidos como "seguro contra mala práctica para ecólogos."

La literatura sobre inventarios permanentes en bosques tropicales es abundante, pero se recomiendan las

metodologías propuestas en dos volúmenes publicados como resultado de un simposio organizado por el Museo Nacional de Historia Nacional de los EE.UU., Smithsonian-Institution y el Programa del Hombre y la Biosfera en 1995 (Dallmeier & Comiskey 1998b, 1998c). Por ejemplo, cuando es necesario comparar dos bosques del mismo tipo, y ambos han sido perturbados, y no muestran una diferencia obvia, es posible compararlos rápidamente, a través de las metodologías señaladas en Condit et al. (1998). Estas metodologías involucran la estadística de extrapolación (muy semejante a la estadística Bayesiana) que permite calcular un índice α de Fisher, confiable, para indicar el nivel de la diversidad. El uso del Índice Avalanche, descrito por Ganeshiah et al. (1997) y elaborado para proveer un resumen de heterogeneidad biológica dentro de un ecosistema por Ganeshiah & Shaanker (2000), también podría ser muy útil.

4. Llevar a cabo estudios de etnobotánica y etnozooloía, especialmente los que produzcan datos cuantitativos para producir curvas de aprovechamiento y ganancias netas mensuales. Es clave entender la cantidad de cosecha que aguanta cada especie, la cantidad de mano de obra necesaria para traer su producto particular al mercado, y su valor neto. Se recomienda, como primera pauta, una valoración de los productos no maderables, y el nivel de su rendimiento neto, utilizando las metodologías presentadas por Godoy y sus colaboradores (Godoy & Lubowski 1992, Godoy et al. 1993) quienes distinguieron claramente entre el inventario etnobotánico propiamente dicho (Peters et al. 1989, Pinedo-Vásquez et al. 1990; Prance et al. 1987, Phillips & Gentry 1993a; Toledo et al. 1978) con los del flujo de los productos (Godoy & Feaw 1989, Schwartzman 1989). En un caso, ambos aspectos fueron investigados (Padoch & de Jong 1989). Finalmente, Grimes et al. (1994) ofrece otras sugerencias útiles en un estudio que hizo énfasis en los costos de extracción y mercadeo.

Dentro de los estudios etnobotánicos, hay varios factores de consideración, para que el registro sea representativo dentro del hábitat bajo estudio, y para que refleje con certeza la importancia de la especie en la comunidad ecológica. Phillips & Gentry (1993b) comprobaron que había diferencias estadísticamente significativas entre los informantes. Podrían predecir el conocimiento sobre las clases de plantas útiles según la edad y sexo del informante. Se reconocen diferencias entre las clases de uso, tales como comestibles, usos para la construcción, usos tecnológicos, usos comerciales, y usos medicinales. Dadas las diferencias entre los informantes, es obvio que el plan de manejo forestal para cada zona de conservación y

desarrollo tiene que tener en cuenta no sólo quienes están manejando tan valiosa información, sino también, como se transmite este conocimiento a la próxima generación. Si esos planes no se desarrollan, antes de que la generación que aporta el conocimiento desaparezca, tan pronto como se acabe la generación con el conocimiento, se acabará también la disponibilidad del producto para contribuir al ingreso financiero del sistema. Por eso, es importante coordinar esfuerzos con la parte sociológica del plan para el éxito del proyecto.

Es muy importante también, dentro de los inventarios, entrevistar a los informantes anotando las plantas útiles, su uso, la edad y sexo del informante, número del árbol, etc. Es necesario tener una idea del diámetro mínimo de un árbol productivo, o del tamaño mínimo para que una especie de hierba sea fructífera en cuanto al rendimiento del producto. Con esos datos, hay que volver a la base de datos provenientes de los inventarios forestales cuantitativos y sacar los árboles que calificaron para su inclusión en los cálculos del inventario, pero, que debido a su menor tamaño, aparentan ser infructíferos en cuanto a la producción. Es muy probable, entonces, que la especie con el Índice de Valor de Importancia (IVI) mayor para el inventario ecológico podría tener un índice IVI mucho más bajo o más alto en relación con los cálculos basados en la producción para mercadeo. El otro índice importante sería su valor de uso individual, que contribuye al valor del uso total del hábitat, como fue indicado en otro estudio de **Phillips et al.** (1994). Dado que la historia vital de plantas y animales en la zona, en términos comunes, es normalmente entendida por la gente que tradicionalmente maneja las cosechas de esos organismos proveedores (**Bennett** 1992), la introducción del concepto de cosecha para mercadeo podría ser dañina, si la intensidad de cosecha para cada especie, en cada ambiente, no tiene un seguimiento adecuado (**Clark** 1973; **Vásquez & Gentry** 1989). Por eso, un plan que integra conceptos de seguimiento ecológico con seguimiento económico es sumamente importante para prevenir niveles de cosecha excesivos.

5. Aplicar conceptos de ecología económica y manejo con capacidad de adaptación. Se recomienda la aplicación de los conceptos según el modelo, explicado a continuación.

El Nuevo Modelo y su economía ecológica: seguimiento mensual de flujo neto de caja proveniente del mercadeo de productos bióticos

La disciplina que comprende la integración de ecología con principios económicos se ha llamado "economía ecológica" (**Constanza** 1996). Esa disciplina que surgió en

los primeros años de la década de los 80, ha tenido mucho éxito y resultó en un gran cambio de pensamiento fuera del paradigma reduccionista y hacia uno mucho más sintético. Evidencia de ese cambio fue el establecimiento de la revista "Ecological Economics" en 1988, junto con la International Society for Ecological Economics. Con el nuevo énfasis, el seguimiento de proyectos de uso sostenible de recursos bióticos requiere la evaluación de los últimos modelos para el seguimiento de esos recursos, y un estudio de las implicaciones de cada modelo, junto con factores económicos (**Constanza & O'Neill** 1996; **Dreschler & Wätzold** 2001; **Nebel** 2001; **O'Neill** 1996; **Pitelka & Pitelka** 1993; **Russell** 1996). **Edwards y Abivardi** (1998) publicaron un resumen del desarrollo histórico de la disciplina y de los usos de recursos bióticos que son directamente extractivos, directamente no-extractivos, indirectos, y opcionales. Con el ambiente propicio a la colaboración entre biólogos y economistas, y las agencias financieras exigiendo que se colaboren, ahora más que nunca, tenemos el deber de ingeniar metodologías que sean simples y buenas para la gente de la comunidad. Así mismo, se debe contribuir a la base de datos que contiene los cálculos bastante sofisticados hechos sobre la base de conocimientos de estadística, tanto biológica como económica. Con ese fin, propongo el modelo explicado a continuación.

El modelo que se presenta aquí (**Fig. 1**) se logra al sobreponer los datos del valor neto mensual, provenientes del mercadeo de productos por cada especie útil, dentro de la misma clase de hábitat, en la misma gráfica. En **Figura 1**, se imagina un hábitat que tiene solamente cinco especies productoras y la gráfica es el resultado del seguimiento de su ingreso neto, medido mensualmente. La gráfica demuestra claramente que los meses de marzo y de mayo son muy problemáticos, comparados con otros meses, debido a que el ingreso neto promedio entre los cinco productos está por debajo de 200 unidades de efectivo en el primer caso, y algo más, en el segundo. Para los administradores de la zona, sería importante comparar ésta gráfica con las de otros hábitats, para ver si el patrón es igual, o si tiende a nivelarse con los de todos los hábitats que existen en la zona. Si todavía quedan meses de muy bajo ingreso, se puede considerar algún tipo de microempresa.

Tal metodología tiene la ventaja de resumir los datos en un solo vistazo y por eso, de ser entendible para los habitantes de la zona, que no son técnicos; así mismo expresa el concepto de la fenología de los recursos. Por lo tanto, la gente puede entender mejor, la naturaleza del flujo de caja proveniente de los productos. Si separamos



Figura 1. Gráfica, explicando la fenología del flujo de caja proveniente del mercadeo de productos bióticos, por especie. Es notable que la línea oscura con círculos abiertos indica el promedio del flujo para todas las especies durante cada mes.

los inventarios por ambiente, y su fenología relativa, podemos ver cuales merecen mayor mano de obra en cada época del año, para aprovechar mejor y planificar el mercadeo con anticipación. A través de este proceso, sería más fácil prepararse para las épocas de muy poco flujo de caja. Si uno desea, también podría presentar una gráfica con el mismo aspecto, con las líneas representando cada medio ambiente en vez de cada especie, para ver rápidamente las fenologías comparativas de los ambientes entre sí.

6. Agregar microempresa a la zona para suplir ingresos financieros durante épocas de flujo de caja menor.

Dado que habrá épocas en las que el flujo de caja neto proveniente de los productos bióticos no maderables no será suficiente para sostener a los habitantes de la zona de conservación y desarrollo integral, se recomienda agregar microempresas racionales para suplir el ingreso. Esas microempresas tienen que adaptarse a la tecnología local, mano de obra y logística disponibles. Es necesario ser realista en cuanto a invertir en otras actividades para que sea más factible dadas las condiciones que existen en el mercado y la inversión de tiempo y formación necesaria—aprendizaje— para llevarlas a cabo. Por ejemplo, si hay zonas de crecimiento, ya muy secundarias, un negocio eco-forestal podría ser implementado para proveer materia prima para papel u otros productos. Estudios, análisis e implementación de estrategias para la extracción limitada de re-

ursos maderables en la Amazonia Peruana han mostrado que es posible tener un sistema adaptable y sostenible, siempre y cuando se conozca la sociología de los habitantes y el seguimiento de los recursos sea riguroso (De Jong 2001, Nebel et al. 2001., Kvist et al. 2001a, 2001b). Además de cosecha limitada de recursos maderables, microempresas como la cría y venta de mariposas u otros insectos (escarabajos, etc.) podría establecerse, siempre y cuando los gastos de distribución o de exportación vuelvan el negocio no rentable.

Para analizar los datos económicos, en vista de la dinámica de las cosechas que son fenológicamente fluctuantes, se sugiere la implementación del análisis Bayesiano (Dennis 1996; Ellison 1996; Mingoti & Richardson 1991; Ver Hoef 1996). Utilizando esas estadísticas inductivas, podemos acercarnos a unas extrapolaciones que sirvan como aproximaciones para guiar el esfuerzo de seguimiento y permitir adaptaciones a los planes de manejo a largo plazo (Hilborn et al. 1995). Con esos datos, se podría limitar la extracción, por especie y por hábitat, y de paso aprovechar los ambientes secundarios (Browder 1992; Guariguata & Ostertag 2001).

Para algunas zonas, donde la logística lo permita, ecoturismo es otra posibilidad. El ecoturismo se define como “viaje responsable a las áreas naturales que permite la conservación del medio ambiente y así mismo beneficia a la comunidad local” (Honey 1999). El ecoturismo se ha incrementado drásticamente en los últimos 10 años, con beneficios para las comunidades y el medio ambiente tropical que las rodea, pero también, tiene sus dificultades. Por lo tanto, antes de incorporar elementos de él, se recomienda un estudio de las opciones más factibles, incorporando los modelos de manejo autónomos contra los de manejo por contrato (Wunder 2000). Consejos adicionales se encuentran en la página de la Red de la ONG Conservation International (2001), y de Sharma (1998).

También es importante tener en cuenta que ciertos productos carecen de valor comercial para la comunidad aunque tengan otro tipo de valor, como un significado religioso, etc. (Price 2000). Por lo tanto, deberán tener un valor (metodología de valor contingente, o MVC) para los cálculos que determinarán la repartición gradual con peso para los esfuerzos laborales (Price 2000).

Conclusiones

Las zonas de conservación y desarrollo integral tienen muy buen porvenir, siempre y cuando estén de acuerdo con las realidades sociales y logísticas de las comunidades participantes, con los colaboradores externos, con las situaciones

legales sobre propiedad real e intelectual, y finalmente, con los otros factores autóctonos de la región y del país donde estén ubicadas. Por lo tanto, es aún más importante que los ecólogos trabajen estrechamente con los sociólogos, los etnobiólogos y los economistas. Si hay comunidades dispuestas a considerar un plan de desarrollo sostenible a largo plazo, en vez de uno de ganancia inmediata, sus habitantes necesitan saber que el proceso de desarrollo se modifica constantemente por manejo de análisis y adaptación. Experiencias obtenidas en varias zonas indican que entre más simple sea el seguimiento de los recursos, del ingreso y de la modificación consiguiente del régimen de trabajo, más fácil sería la transición hacia más autonomía para los miembros de la comunidad que ocupen las posiciones de administración. Soy optimista por los rápidos avances en los conceptos para la implementación de proyectos de desarrollo y sus acelerados cambios para ser aún más integrales. Las zonas de desarrollo y conservación integral son muy recientes y están sujetas a cambios, debido a la falta de información confiable sobre el ciclo vital de recursos bióticos tropicales. Espero que este modelo sirva para estimular y entusiasmar a los ecólogos, etnobiólogos y funcionarios que quisieran involucrarse con proyectos similares.

Agradecimientos

Mis experiencias positivas en zonas de conservación y desarrollo integral fueron posibles gracias a subvenciones generosas de la Liz Claiborne and Art Ortenberg Foundation, la John D. and Catherine T. MacArthur Foundation (ambos en la Nueva Guinea Papuana), y la National Geographic Society (en Colombia). Agradezco los consejos y largas discusiones sobre esos temas con Pedro Acevedo, Ricardo Callejas, Álvaro Cogollo, Santiago Díaz, George Diggs, Javier Francisco Ortega, Ricardo García, Marta Sofía González, Karol Kisokau y el personal de la Village Development Trust, Barney Lipscomb, Milciades Mejía, Clara Inés Orozco, Wayne Takeuchi y Moisés Wasserman Lerner. La redacción y sugerencias de los colegas Clara Inés Orozco, y Santiago Díaz Piedrahita fueron valiosas en cuanto al mejoramiento de la presentación. Aunque las conclusiones son más, agradezco a quienes discutieron el tema, lo cual me permitió desarrollarlo mejor.

Bibliografía

- Abbot, J. & D. Thomas. 2001. Understanding the links between conservation and development in the Bamenda Highlands, Cameroon. *World Development* 29(7): 1115-1136.
- Alpert, P. 1995. Applying ecological research at integrated conservation and development projects. *Ecological Applications* 5(4): 1-4.
- _____. 1996. Integrated conservation and development projects. Examples from Africa. *BioScience* 46(11): 845-855.
- Badola, R. 1998. Attitudes of local people towards conservation and alternatives to forest resources: A case study from the lower Himalayas. *Biodiversity and Conservation* 7: 1245-1259.
- Barrett, C. & P. Arcese. 1995. Are integrated conservation-development projects (ICDPs) sustainable? On the conservation of large mammals in Sub-Saharan Africa. *World Development* 23(7): 1073-1084.
- Bennett, B. 1992. Plants and people of the Amazonian rainforests. *Bioscience* 42(8): 599-607.
- Bitter, P. 1999. Application of GIS to mountain land-use planning. *Issues in Mountain Development* 3: 1-6. International Centre for Integrated Mountain Development <http://www.icimod.org.sg/publications/imd/imd99-3.htm>
- Browder, J. 1992. The limits of extractivism. *Tropical forest strategies beyond extractive reserves*. *BioScience* 42(3): 174-182.
- Brown, M. & B. Wyckoff-Baird. 1992. Designing Integrated Conservation And Development Projects. The Biodiversity Support Program, U.S. Agency for International Development. World Wildlife Fund. Baltimore, Maryland.
- Brundtland, H. 1987. *Our Common Future*. Oxford University Press, for the World Commission on Environment and Development. Oxford, England, UK.
- Clark, C. 1973. The economics of overexploitation. *Science* 181 (4100): 630-634.
- Comiskey, J., G. Ayzanoa & F. Dallmeier. 1994. A data management system for monitoring forest dynamics. *Journal of Tropical Forest Science* 7: 419-427.
- Condit, R., R. Foster, S. Hubbell, R. Sukumar, E. Leigh, N. Maonokaran, S. Loo de Lao, J. LaFrankie & P. Ashton. 1998. Assessing forest diversity on small plots: Calibration using species-individual curves from 50-ha plots. Pp. 247-268. En: F. Dallmeier & J. Comiskey (editores). *Forest Biodiversity Research, Monitoring and Modeling. Conceptual Background and Old World Case Studies*. Man and the Biosphere Series vol. 20. Parthenon Publishing Pear River, New York, EE. UU.
- Conservation International. 2001. The green host effect: An integrated approach to sustainable tourism and resort development. *Conservation International Web Page Library* <http://www.conservation.org/library/POLPAPR/GrnHost/recomm.htm>
- Constanza, R. 1996. Ecological economics: Reintegrating the study of humans and nature. *Ecological Applications* 6(4): 978-990.
- _____. & V. O'Neill. 1996. Introduction: Ecological economics and sustainability. *Ecological Applications* 6(4): 975-977.
- Daily, G. & P. Ehrlich. 1996. Socioeconomic equity, sustainability and Earth's carrying capacity. *Ecological Applications* 6(4): 991-1001.
- Dallmeier, F. 1992. Long-term monitoring of biological diversity in tropical forest areas: methods for establishment and inventory of permanent plots. *MAB Digest* 11. UNESCO, Paris.
- _____. & J. Comiskey. 1996. From the forest to the user: a methodology update. Pp. 41-56. En: D. Wilson & D. Sandoval

- (editores). *The Biodiversity of Southeastern Peru*. Editorial Horizonte, Lima, Perú.
- _____, & _____. 1998a. Forest biodiversity assessment, monitoring and evaluation for adaptive management. Pp. 3-15. En: F. Dallmeier & J. Comiskey (editores). *Forest Biodiversity Research, Monitoring and Modeling. Conceptual Background and Old World Case Studies*. Man and the Biosphere Series vol. 20. Parthenon Publishing Pear River, New York, EE. UU.
- _____, & _____. 1998b. (editores). *Forest Biodiversity Research, Monitoring and Modeling. Conceptual Background and Old World Case Studies*. Man and the Biosphere Series vol. 20. Parthenon Publishing Pear River, New York, EE. UU.
- _____, & _____. 1998c. (editores). *Forest Biodiversity In North, Central and South America and the Caribbean. Research and Monitoring*. Man and the Biosphere Series vol. 21. Parthenon Publishing Pear River, New York, EE. UU.
- Danielsen, F., D. Balete, M. Poulsen, M. Enghoff, C. Nozawa & A. Jensen.** 2000. A simple system for monitoring biodiversity in protected areas of a developing country. *Biodiversity and Conservation* **9**: 1671-1705.
- Dennis, B.** 1996. Discussion: Should ecologists become Bayesians? *Ecological Applications* **6**(4): 1095-1103.
- Dogsé, P.** 1998. Designing and managing permanent monitoring plots as tools for implementing the Convention on Biological Diversity. Pp. 29-46. En: F. Dallmeier & J. Comiskey (editores). *Forest Biodiversity In North, Central and South America and the Caribbean. Research and Monitoring*. Man and the Biosphere Series vol. 21. Parthenon Publishing Pear River, New York, EE. UU.
- Drechsler, M. & F. Wätzold.** 2001. The importance of economic costs in the development of guidelines for spatial conservation management. *Biological Conservation* **97**: 51-59.
- Edwards, P. & C. Abivardi.** 1998. The value of biodiversity: Where ecology and economy blend. *Biological Conservation* **83**(3): 239-246.
- Ellison, A.** 1996. An introduction to Bayesian inference for ecological research and environmental decision-making. *Ecological Applications* **6**(4): 1036-1046.
- Fearnside, P.** 1986. *Human Carrying Capacity of the Brazilian Rainforest*. Columbia University Press. New York. EE. UU.
- Fuentes, E.** 1993. Scientific research and sustainable development. *Ecological Applications* **3**(4): 576-577.
- Ganeshiah, K., K. Chandrashekhara, & A. Kumar.** 1997. Avalanche index: a new measure of biodiversity based on biological heterogeneity of the communities. *Current Science* **73**: 128-133.
- _____, & **R. Shaanker.** 2000. Measuring biological heterogeneity of forest vegetation types: Avalanche index as an estimate of biological diversity.
- Geoghegan, J., S. Cortina V. P. Klepeis, P. Macario M., Y. Ogneva-Himmelberger, R. R. Chowdhury, B. L. Turner II, & C. Vance.** 2001. Modeling tropical deforestation in the southern Yucatán peninsular region: comparing survey and satellite data. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **85**: 25-46.
- Gerard, F., B. Wyatt, A. Millington & J. Wellens.** 1988. The role of data from intensive sample plots in the development of a new method for mapping tropical forest types using satellite imagery. Pp. 141-158. En: F. Dallmeier & J. Comiskey (editores). *Forest Biodiversity Research, Monitoring and Modeling. Conceptual Background and Old World Case Studies*. Man and the Biosphere Series vol. 20. Parthenon Publishing Pear River, New York, EE. UU.
- Godoy, R. & T. C. Feaw.** 1989. The profitability of smallholder rattan cultivation in central Borneo. *Human Ecology* **16**: 397-420.
- _____, & **R. Lubowski.** 1992. Guidelines for economic valuation of nontimber tropical-forest products. *Current Anthropology* **33**(4): 423-433.
- _____, & **A. Markandya.** 1993. A method for the economic valuation of non-timber tropical forest products. *Economic Botany* **47**(3): 220-233.
- Goodland, R.** 1995. The concept of environmental sustainability. *Annual Review of Ecology and Systematics* **26**: 1-24.
- Grimes, A., S. Loomis, P. Jahnige, M. Burnham, K. Onthbank, R. Alarcón, W. Palacios, C. Cerón, D. Neill, M. Balick, B. Bennett & R. Mendelsohn.** 1994. Valuing the rainforest: The economic value of nontimber forest products in Ecuador. *Ambio* **23**(7): 405-410.
- Gould, K., A. Howard & Gustavo Rodríguez.** 1998. Sustainable production of non-timber forest products: Natural dye extraction from El Cruce Dos Aguadas, Petén, Guatemala. *Forest Ecology and Management* **111**: 69-82.
- Guariguata, M. & R. Ostertag.** 2001. Neotropical secondary forest succession: changes in structural and functional characteristics. *Forest Ecology and Management* **148**: 185-206.
- Hilborn, R. & D. Ludwig.** 1993. The limits of applied ecological research. *Ecological Applications* **3**(4): 550-552.
- _____, **C. Walters & D. Ludwig.** 1995. Sustainable exploitation of renewable resources. *Annual Review of Ecology and Systematics* **26**: 45-67.
- Honey, M. S.** 1999. Treading lightly? Ecotourism's impact on the environment. *Environment*: June, 1999: 1-15.
- INR.** 2001. Local applications for remote sensing techniques. Institute of Natural Resources Homepage: <http://www.inr.unp.ac.za/more/larst.html>
- IUCN.** 2000. World Wide Web Home Page, World Conservation Union for Nature and Natural Resources (IUCN). Forest Conservation Programme. <http://iucn.org/themes/fcp/index.html>
- Jones, B.** 1999. Policy lessons from the evolution of a community-based approach to wildlife management, Kunene Region, Namibia. *Journal of International Development* **11**: 295-304.
- Jong, W. De.** 2000. Trees and forest management in the floodplains of the Peruvian Amazon. *Forest Ecology and Management* **150**: 125-134.
- Kremen, C., A. Mierenlender & D. Murphy.** 1994. Ecological monitoring: A vital need for integrated conservation and development programs in the tropics. *Conservation Biology* **8**(2): 388-397.
- Kvist, L. P. & G. Nebel.** 2001. A review of Peruvian flood plain forests: ecosystems, inhabitants and resource use.
- _____, **M. Andersen, J. Stagegaard, M. Hesselsoe, & C. Llapapasca.** 2001a. Extraction from woody forest plants in

- flood plain communities in Amazonian Peru: use, choice, evaluation and conservation status of resources. *Forest Ecology and Management* **150**: 147-174.
- _____, **S. Gram, A. Cáceres & I. Ore.** 2001b. Socio-economy of flood plain households in the Peruvian Amazon. *Forest Ecology and Management* **150**: 175-186.
- Laurance, W. F.** 1999a. Introduction and synthesis. *Biological Conservation* **91**: 101-107.
- _____. 1999b. Reflections on the tropical deforestation crisis. *Biological Conservation* **91**: 109-117.
- Lubchenco, J., A. Olson, L. Brubaker, S. Carpenter, M. Holland, S. Hubbel, S. Levin, J. MacMahon, P. Matson, J. Melillo, H. Mooney, C. Peterson, H. R. Pulliam, L. Real, P. Regal & P. Rissner.** 1991. Iniciativa para una biosfera sustentable: Una agenda de investigación ecológica. *Revista Chilena de Historia Natural* **64**: 175-226.
- Ludwig, D.** 1993. Environmental sustainability: Magic, science, and religion in natural resource management. *Ecological Applications* **3**(4): 555-558.
- _____, **R. Hilborn & C. Walters.** 1993. Uncertainty, resource exploitation, and conservation: lessons from history. *Science* **260**: 17, 36.
- Lund, H. G., D. Evans & D. Linden.** 1995. Scanned, zapped, timed, and digitized: advanced technologies for measuring and monitoring vegetation diversity. Pp. 365-382. En: T. Boyle & B. Boontawee (editores). *Measuring and Monitoring Biodiversity in Tropical and Temperate Forests*. Center for International Forestry Research, Bogor, Indonesia.
- _____, **V. Rudis & K. Stolte.** 1998. Plots, pixels and partnerships: Prospects for mapping, monitoring and modelling biodiversity. Pp. 79-99. En: F. Dallmeier & J. Comiskey (editores). *Forest Biodiversity Research, Monitoring and Modeling. Conceptual Background and Old World Case Studies. Man and the Biosphere Series vol. 20*. Parthenon Publishing Pear River, New York, EE. UU.
- Margoluis, R. & N. Salafsky.** 1998. *Measures of Success: Designing, Managing and Monitoring Conservation and Development Projects*. Island Press, Washington, DC USA.
- Mingoti, S. & G. Meeden.** 1992. Estimating the total number of distinct species using presence and absence data. *Biometrics* **48**: 863-875.
- Myint, M. & P. Pradhan.** 1996. Integration of GIS, remote sensing and ecological methods for biodiversity inventory and assessment. *Issues in Mountain Development* **4**: 1-7. International Centre for Integrated Mountain Development. <http://www.icimod.org.sg/publications/imd/imd99-4.htm>
- Nebel, G.** 2001. Sustainable land-use in Peruvian flood plain forests: options, planning and implementation. *Forest Ecology and Management* **150**: 187-198.
- _____, **L. P. Kvist, J. Vanclay & H. Vidaurre.** 2001. Forest dynamics in flood plain forests in the Peruvian Amazon: effects of disturbance and implications for management. *Forest Ecology and Management* **150**: 79-92.
- Newmark, W.** 2000. Conserving Wildlife in Africa: Integrated conservation and development projects and beyond. *BioScience* **50**(7): 585-592.
- Noss, R.** 1990. Indicators for monitoring biodiversity: A hierarchical approach. *Conservation Biology* **4**(4): 355-364.
- O'Neill, R.** 1996. Perspectives on economics and ecology. *Ecological Applications* **6**(4): 1031-1033.
- Padoch, C. & W. De Jong.** 1989. Production and profit in agroforestry: An example from the Peruvian Amazon. Pp. 102-113. En: J. Browder (editor). *Fragile Lands of Latin America: Strategies for Sustainable Development*. Westview Press. Boulder, Colorado, EE. UU.
- Papola, T.** 1996. Integrated planning for environment and economic development in mountain areas: Concepts, Issues and Approaches. The environment-development dilemma. *Issues in Mountain Development* **1**: 1-4. International Centre for Integrated Mountain Development. <http://www.icimod.org.sg/publications/imd/issue1.htm>.
- Peters, C.** 1994. *Sustainable Harvest of Non-timber Plant Resources in Tropical Moist Forest: An Ecological Primer*. Biodiversity Support Program. Washington, DC.
- _____, **A. Gentry & R. Mendelsohn.** 1989. Valuation of an Amazonian rainforest. *Nature* **339**: 655-656.
- Phillips, O. & A. Gentry.** 1993a. The useful plants of Tambopata, Peru: I. Statistical hypotheses tests with a new quantitative technique. *Economic Botany* **47**(1): 15-32.
- _____, _____ **1993b.** The useful plants of Tambopata, Peru: II. Additional hypothesis testing in quantitative ethnobotany. *Economic Botany* **47**(1): 33-43.
- _____, _____, **C. Reynel, P. Wilkin & C. Galvez-Durand.** 1994. Quantitative ethnobotany and Amazonian conservation. *Conservation Biology* **8**(1): 225-248.
- Pinedo-Vásquez, M., D. Azrin, P. Jipp, J. Chota-Inuma.** 1990. Use-values of tree species in a communal forest reserve in northeast Peru. *Conservation Biology* **4**(4): 405-416.
- Pipoly, J.** 1996. Permanent forest and non-forest inventory plot protocol. *Philippine Flora Newsletter* **9**: 2.
- _____, **& D. Madulid.** 1998. Composition, structure and species richness of a submontane moist forest on Mt. Kinasalapi, Mindanao, Philippines. Pp. 591-600. En: F. Dallmeier & J. Comiskey (editores). *Forest Biodiversity Research, Monitoring and Modeling. Conceptual Background and Old World Case Studies. Man and the Biosphere Series vol. 20*. Parthenon Publishing Pear River, New York, EE. UU.
- Pitelka, L. & F. Pitelka.** 1993. Environmental decision making: Multidimensional dilemmas. *Ecological Applications* **3**(4): 566-568.
- Pradhan, S.** 1996. Integration of GIS and remote sensing for crop acreage estimation: An information system development approach. *Issues in Mountain Development* **6**: 1-9. International Centre for Integrated Mountain Development. <http://www.icimod.org.sg/publications/imd/imd99-6.htm>.
- Prance, G. T., W. Balée, B. Boom, & R. L. Carneiro.** 1987. Quantitative ethnobotany and the case for conservation in Amazonia. *Conservation Biology* **1**: 296-310.
- Price, C.** 2000. Valuation of unpriced products: contingent valuation, cost-benefit analysis and participatory democracy. *Land Use Policy* **17**: 187-186.

- Puredorj, T., R. Tateishi, T. Ishiyama & Y. Honda.** 1998. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing* **19**(18): 3519-3535.
- Roy, P. S. & S. Tomar.** 2000. Biodiversity characterization at landscape level using geospatial modelling technique. *Biological Conservation* **95**: 95-109.
- Russell, C.** 1996. Integrating ecology and economics via regional modeling. *Ecological Applications* **6**(4): 1025-1030.
- Rybaczuk, K. Y.** 2001. GIS as an aid to environmental management and community participation in the Negril Watershed, Jamaica. *Computers, Environment and Urban Systems* **25**: 141-165.
- Salafsky, N. & R. Margoluis.** 1999. Greater Than the Sum of Their Parts: Designing Conservation and Development Programs to Maximize Results and Learning. Biodiversity Support Program, Washington DC, USA.
- Schwartzman, S.** 1989. Extractive reserves in the Amazon. Pp. 150-163. En: J. Browder (editor). *Fragile Lands of Latin America: Strategies for Sustainable Development*. Westview Press. Boulder, Colorado, EE. UU.
- Sharma, P.** 1998. Environment, culture, economy and tourism: Dilemmas in the Hindu Kush-Himalayas. *Issues in Mountain Development* **3**: 1-8. International Centre for Mountain Development <http://www.icimod.org.sg/publications/imd/imd983.htm>
- Sierra, R., F. Rodríguez & E. Losos.** 1999. Forest resource use change during early market integration in tropical rain forests: the Huaorani of upper Amazonia. *Ecological Economics* **30**: 107-119.
- Socolow, R.** 1993. Achieving sustainable development that is mindful of human imperfection. *Ecological Applications* **3**(4): 581-583.
- Stohlgren, T., D. Binkley, T. Veblen, & W. Baker.** 1995. Attributes of reliable long-term landscape-scale studies: Malpractice insurance for landscape ecologists. *Environmental Monitoring and Assessment* **36**(1): 1-25.
- _____, **J. Owen & M. Lee.** 2000. Monitoring shifts in plant diversity in response to climate change: A method for landscapes. *Biodiversity & Conservation* **9**(1): 65-86.
- Stoms, D. & J. Estes.** 1993. A remote sensing research agenda for mapping and monitoring biodiversity. *International Journal of Remote Sensing* **14**(10): 1839-1860.
- Toledo, V., J. Cañallero & A. Argueta.** 1978. El uso múltiple de la selva basado en el conocimiento tradicional. *Biótica* **3**: 85-101.
- Turner, M. & P. Gardener.** 1994. *Quantitative Methods in Landscape Ecology*. Springer-Verlag, New York, EE. UU.
- UNEP.** 1996a. Identification, Monitoring and Assessment of Components of Biological Diversity and Processes which have Negative Impacts. Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice. Second Meeting, 2-6 September 1996. Montreal, Canada.
- _____. 1996b. Report of the Second Meeting of the Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice. UNEP/CBD/COP. UNEP, Montreal, Canada.
- UNESCO.** 1995. *Biosphere Reserves: The Seville Strategy and the Statutory Framework of the World Network*. UNESCO, Paris.
- United Nations.** 1997. Preparations for the special session of the general assembly for the purpose of an overall review and appraisal of the implementation of Agenda 21, Implementation of the Convention on Biological Diversity. UN Economic and Social Council, Commission on Sustainable Development, Fifth Session, 7-25 April. E/CN.17/1997/11. <http://www.un.org/documents/ecosoc/cn17/1997/ecn171997-11.htm>
- _____. 2001. Global status of biological diversity. Report of the Secretary General. Commission on Sustainable Development acting as the preparatory committee for the World Summit on Sustainable Development. E/CN.17/2001/PC/18. <http://www.un.org/documents/ecosoc/cn17/2001/ecn172001-PC18.htm>
- Vásquez, R. & A. Gentry.** 1989. Use and misuse of forest-harvested fruits in the Iquitos area. *Conservation Biology* **3**(4): 350-361.
- Ver Hoef, J.** 1996. Parametric empirical Bayes methods for ecological applications. *Ecological Applications* **6**(4): 1047-1055.
- Willers, B.** 1994. Sustainable development: A new world deception. *Conservation Biology* **8**(4): 1146-1148.
- Wunder, S.** 2000. Ecotourism and economic incentives- an empirical approach. *Ecological Economics* **32**: 465-479.

ÁTOMO ALCALINO UNIDIMENSIONAL FORZADO POR UN TREN DE DIRAC

por

Arcesio Castañeda^{1,2} & Diógenes Campos^{1,3}

Resumen

Arcesio Castañeda & Diógenes Campos: Átomo alcalino unidimensional forzado por un tren de Dirac. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **25**(97): 529-536, 2001. ISSN 0370-3908.

Consideramos la dinámica clásica y cuántica de átomos alcalinos perturbados por un tren de Dirac formado por una secuencia de K pulsos tipo delta de Dirac, con espaciamento temporal T e intensidad Δp . El átomo se representa por un modelo simplificado unidimensional integrable. Estudiamos el efecto del tren sobre el estado inicial del átomo, los umbrales de campo eléctrico para generar ionización y la probabilidad de sobrevivencia. La concordancia entre los resultados clásicos y cuánticos es buena para una intensidad moderada del campo y durante un número significativo de impulsos.

Palabras clave: Ionización, probabilidad de sobrevivencia, caos, tren de Dirac, operador de Floquet.

Abstract

We consider the classical and quantum dynamics of highly excited alkali atoms perturbed with a Dirac train formed by a periodic sequence of K kicks of zero-width δ functions at a temporal distance T and kick strength Δp . The atom is described by a simplified one-dimensional integrable model. We study the effect of the train on the initial state of the atom, the electrical field thresholds of ionization, and the survival probability. The agreement between classical and quantum results is good for a moderate strength of the field and during a significant number of kicks.

Key words: Ionization, survival probability, chaos, kicked atom, Floquet operator.

¹ Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá

² E-mail: cesius@168.176.8.55

³ E-mail: dcamposr@ciencias.unal.edu.co

1. Introducción

El estudio de sistemas cuánticos dependientes del tiempo es de gran interés, en especial aquellos cuyas contrapartes clásicas exhiben caos dinámico. A la luz del principio de correspondencia de Bohr y de la formulación de Feynman de la mecánica cuántica, se espera que el comportamiento clásico caótico tenga importante influencia en las propiedades de los respectivos sistemas cuánticos en el régimen de números cuánticos altos. Por otro lado, existen experimentos con sistemas hamiltonianos que permiten una comparación entre teoría y experimento en el régimen semiclásico, al igual que la validación de predicciones teóricas.

Los sistemas mecánicos perturbados de manera súbita, impulsiva y periódica (*sistemas pateados*) son paradigmáticos en este tipo de investigaciones [1]. La dinámica completa de estos sistemas se puede reducir al conocimiento del estado del sistema en instantes de tiempo que son múltiplos enteros del período del forzamiento. Esta característica hace viable el estudio de la evolución dinámica del sistema a largo plazo, tanto desde el punto de vista clásico como cuántico, y los resultados arrojan luz sobre la correspondencia entre ambas teorías.

Un ejemplo de este tipo de sistema [2, 3] es un átomo alcalino en el que el electrón activo se prepara inicialmente en un nivel de energía alto (átomo Rydberg) y se somete posteriormente a una serie de pulsos de campo eléctrico ultracortos ($T_p \lesssim 500$ fs) y unipolares (sólo toma valores positivos o negativos). Este sistema constituye el objeto de investigación en el presente artículo.

En la sección 2 se establece brevemente el modelo hamiltoniano que describe la evolución dinámica del átomo alcalino pateado. La sección 3 describe la solución de las ecuaciones dinámicas resultantes con especial énfasis en los métodos empleados para solucionar la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo. La sección 4 presenta los resultados obtenidos: átomo alcalino de potasio sometido a un sólo pulso de Dirac (sección 4.1) y a un tren de Dirac (sección 4.2). Finalmente en la sección 5 se discuten algunas conclusiones y perspectivas.

En principio el modelo del sistema es sencillo y de interés académico, pero existen experimentos en los que la radiación pulsada constituye una importante herramienta de análisis y control cuántico [4].

2. Hamiltoniano modelo

En ciertas realizaciones experimentales el átomo alcali-

no forzado impulsivamente se prepara inicialmente en un estado Stark extremo [1], de tal manera que en buena aproximación la función de onda que describe al electrón activo (carga $-e$, masa m_e) es de carácter cuasi-unidimensional⁴. Entonces en esa aproximación la dinámica *libre* está gobernada por el hamiltoniano [6]

$$H_0(p, q) = \frac{p^2}{2m_e} - \frac{Z_\sigma e^2}{q} + \frac{\hbar^2 C}{2m_e q^2}, \quad 0 \leq q < \infty, \quad (1)$$

donde los parámetros alcalinos [5, 6] $Z_\sigma = Z - \sigma$ y C dan cuenta del apantallamiento de la carga nuclear Z y simulan el principio de exclusión de Pauli y la repulsión entre el electrón activo y los electrones del tronco atómico.

Los períodos de oscilación clásicos y cuánticos del electrón activo ($T_n \sim 0.15n^3$ fs) pueden ser grandes con relación a la duración de cada pulso de campo eléctrico y el efecto de este último consiste en transferir una cantidad neta de momentum $|\Delta p|$ al electrón activo⁵. El impulso cedido depende del perfil temporal del campo⁶ $E_{HCP}(t)$ y es de sentido contrario al mismo: $\Delta p = -e \int E_{HCP}(t) dt$. Así, la serie de pulsos unipolares de campo eléctrico se puede describir de manera adecuada por un tren de K impulsos de Dirac de frecuencia $1/T$ y transferencia de momentum Δp :

$$V(q, t) = -q \Delta p \sum_{k=1}^K \delta(t - kT). \quad (2)$$

La evolución dinámica del átomo alcalino forzado impulsivamente se describe entonces por el hamiltoniano

$$H(p, q, t) = H_0(p, q) + V(q, t). \quad (3)$$

3. Dinámica del átomo forzado impulsivamente

3.1 Evolución clásica

El átomo alcalino no forzado es integrable y la energía electrónica inicial determina si el hamiltoniano (1) da lugar a un movimiento acotado ($E < 0$), que es oscilatorio

⁴En principio esta afirmación es válida sólo para el caso hidrogenoide. Básicamente, el modelo que se considera aquí es el hamiltoniano hidrogenoide 1D con términos de corrección que dan cuenta de las características alcalinas de acuerdo al modelo de Eder [5, 6].

⁵En este artículo se usarán unidades atómicas.

⁶Debido a sus características, éste tipo de radiación electromagnética se conoce como pulso de medio ciclo (Half cycle pulse) [2].

entre dos puntos de retorno, o a un movimiento no acotado (ionización, $E > 0$). Formalmente, el movimiento se describe por un conjunto de ecuaciones paramétricas que involucran de manera explícita el tiempo [6, 7].

En cada impulso (2), el electrón aumenta o disminuye su momentum p_k^- pero deja inalterada su posición q_k^- , para luego evolucionar libremente hasta que llega el nuevo impulso del tren de Dirac. Esto conduce a una aplicación discreta (mapeo) que determina el estado del electrón (posición y momentum) a intervalos de tiempo que son múltiplos del período del tren ($k = 0, 1, 2, \dots$):

$$\begin{aligned} q_k^- &\rightarrow q_k^+ = q_k^-, \\ p_k^- &\rightarrow p_k^+ = p_k^- + \Delta p. \end{aligned} \quad (4)$$

En cada iteración el impulso es el único responsable del cambio neto de energía del electrón activo:

$$(\Delta E)_k := E_k^+ - E_k^- = p_k^- \Delta p + \frac{(\Delta p)^2}{2}. \quad (5)$$

Este cambio de energía depende de manera cuadrática del impulso transferido y, por lo tanto, cuando Δp es constante la ionización sólo depende de la energía y del momentum inicial.

3.2 Evolución cuántica

El sistema cuántico no forzado es integrable. La ecuación de Schrödinger independiente del tiempo conduce a un espectro discreto de energías negativas con funciones de onda de cuadrado integrable y a un espectro continuo de energías positivas con funciones de onda de dispersión. El n -ésimo nivel de energía del electrón activo ligado al tronco atómico es [7], en unidades atómicas,

$$\varepsilon_n = -\frac{1}{2} \left(\frac{Z_\sigma}{n-1+\lambda} \right)^2, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (6)$$

donde $\lambda = (1 + \sqrt{1+4C})/2$; mientras que el electrón libre tiene energía $\varepsilon_\kappa = (1/2)\kappa^2$ con $\kappa \in \mathfrak{R}$.

La dinámica cuántica del átomo alcalino forzado descrito por (3) se reduce a la investigación del estado del sistema en los instantes $t = kT^-$. Esto se logra a través de la aplicación repetida ($k-1$ veces) del operador de evolución temporal correspondiente a un período u operador de Floquet [7, 8],

$$\hat{U}(T, 0) = e^{-i\hat{H}_0 T} e^{i\hat{q}\Delta p}, \quad (7)$$

sobre el estado inicial del sistema $|\Psi(0)\rangle$. El operador evolución (7) describe la evolución temporal como

un efecto cambiando de la acción del pulso sobre el electrón activo, a través de la translación de momentum $\exp(i\hat{q}\Delta p)$, y la posterior evolución libre $\exp(-i\hat{H}_0 T)$ del estado trasladado en momentum.

Las probabilidades de transición (y por lo tanto de ionización) del átomo se obtienen al hallar los elementos matriciales del operador de Floquet en la base de estados propios de \hat{H}_0 , el cual tiene una parte discreta y una parte continua. Con el fin de hacer los cálculos cuánticos más sencillos y trabajar con una base discreta se elige una base ortogonal y enumerable de Sturm $\{|\psi_n^{n_s}\rangle\}$ [9], lo cual permite representar el operador (7) por una matriz con elementos enumerables. La base de Sturm la forman en representación de coordenadas los vectores

$$\psi_n^{n_s}(q) = N_n^{n_s} e^{-q/n_s} \left(\frac{2q}{n_s} \right)^\lambda L_{n-1}^{(2\lambda-1)} \left(\frac{2q}{n_s} \right), \quad (8)$$

donde $L_n^\alpha(z)$ es un polinomio generalizado de Laguerre, $N_n^{n_s}$ una constante de normalización y n_s es un parámetro bautizado como parámetro de Sturm.

Un conjunto de Sturm $\{\psi_n^{n_s}(q), n = 1, 2, \dots\}$ permite representar de manera adecuada buena parte de los estados acotados y del continuo de \hat{H}_0 , siempre y cuando que el tamaño de la base truncada y el parámetro de Sturm n_s se seleccionen de manera apropiada. En efecto, si $n_s = (n-1+\lambda)/Z_\sigma$ las funciones (8) coinciden con las de los estados acotados de un átomo hidrogenoide.

En términos de la base de Sturm y después de la aplicación de un tren de k pulsos (período T), la probabilidad de supervivencia del electrón activo es

$$P_s(kT) = \sum_{E_n < 0} |a_n(kT)|^2 = \sum_{E_n < 0} |\langle \psi_n^{n_s} | \Psi(kT) \rangle|^2, \quad (9)$$

donde E_n es el valor propio asociado con $\psi_n^{n_s}$ y

$$\Psi(kT) = \sum_n a_n(kT) |\psi_n^{n_s}\rangle, \quad (10)$$

es el estado del sistema justo antes del $(k+1)$ -ésimo pulso. De esta manera, al escribir los coeficientes como un vector columna, se obtiene la relación

$$\mathbf{a}(kT) = \mathbf{U}(T, 0) \mathbf{a}((k-1)T), \quad (11)$$

donde $\mathbf{U}(T, 0)$ designa la matriz que representa el operador (7) en la base ortogonal truncada de Sturm.

4. Resultados

4.1 Átomo alcalino bajo un pulso de Dirac

En primer lugar se quiere determinar la magnitud de impulso Δp que es necesaria con el propósito de que un cierto porcentaje de átomos alcalinos se ionice bajo la acción de sólo un pulso de Dirac.

En el caso cuántico se elige una base de Sturm con 500 funciones y con parámetro $n_s = 35$, valores que permiten reproducir con buena precisión un amplio conjunto de estados acotados y parte del continuo. En el caso clásico se considera un conjunto microcanónico constituido por 50000 condiciones iniciales (posición, momentum) que corresponden a una energía inicial ε_{n_i} igual a la del estado cuántico inicial; la distribución de momentum en el conjunto microcanónico se selecciona para que coincida con la distribución de momentum correspondiente a la respectiva función de onda cuántica.

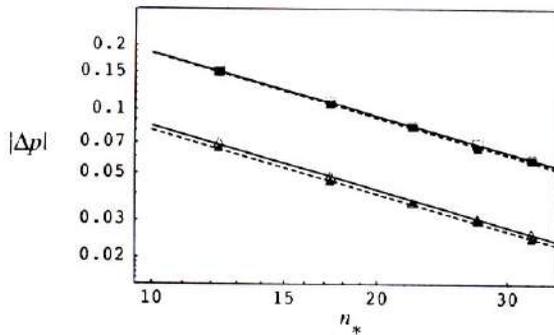


Figura 1: Dependencia de la magnitud del impulso $|\Delta p|$ requerido para producir una fracción de ionización r del átomo de potasio respecto al número cuántico efectivo $n_* = n_i - 1 + \lambda$. Resultados cuánticos: $r = 50\%$ (\square), $r = 10\%$ (\triangle). Resultados clásicos: $r = 50\%$ (\blacksquare), $r = 10\%$ (\blacktriangle). Las rectas indican los ajustes respectivos: líneas sólidas, resultados cuánticos; líneas a trazos, resultados clásicos.

La figura 1 presenta los resultados obtenidos y muestra que la correspondencia entre las predicciones clásicas y cuánticas es bastante buena. De los datos de la figura 1 se concluye que el impulso requerido para originar una fracción de ionización (r) dada decae de manera algebraica con el número cuántico efectivo n_* ,

$$|\Delta p| \propto \frac{1}{n_* - 1 + \lambda}, \quad (12)$$

lo cual es una consecuencia directa de la aproximación impulsiva [10], (4) y (5). La expresión (5) permanece válida⁷ en el caso cuántico [7] y, por lo tanto, el cambio

⁷Con las sustituciones $E \rightarrow \langle E \rangle$ y $p \rightarrow \langle p \rangle$.

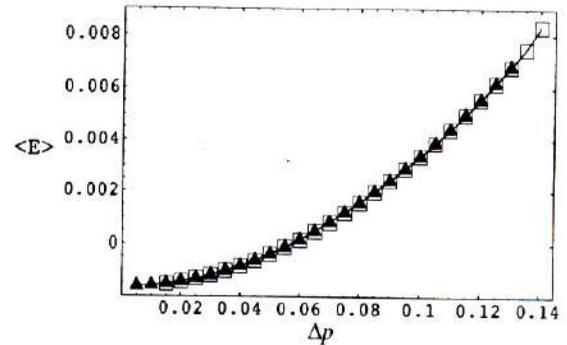


Figura 2: Valor medio de energía del estado $n_i = 30$ del átomo de potasio tras la aplicación de un impulso de Dirac. Resultados cuánticos. (\square) Resultados clásicos. (\blacktriangle).

neto de energía (al igual que la probabilidad de ionización) no depende de la polaridad del impulso (o del campo); los estados acotados tienen un valor medio nulo de momentum.

La figura 2 muestra que para un n_i fijo el valor medio de energía aumenta de manera cuadrática con el impulso, como era de esperarse. Igualmente indica que los valores de $\langle E \rangle$, al ser calculados tanto clásica como cuánticamente, coinciden con las predicciones de la aproximación impulsiva (5).

4.2 Átomo alcalino bajo un tren de Dirac

Impulso positivo $\Delta p > 0$.

La figura 3, que considera un átomo de potasio preparado inicialmente en $n_i = 30$, presenta la probabilidad de supervivencia del átomo como función de la magnitud $|\Delta p|$ del impulso para un tren de 50 pulsos con período igual al período natural del sistema no perturbado, $T = T_{n_i} = 2\pi(n_i - 1 + \lambda)^3 / Z_\sigma^2$.

Los pulsos ($\Delta p > 0$) aumentan el momentum del electrón activo y las probabilidades de supervivencia clásica y cuántica disminuyen de manera rápida con la magnitud del impulso. Aunque los resultados cuánticos sólo coinciden con los clásicos en un rango limitado de valores de Δp , la probabilidad de supervivencia clásica no se aleja de la probabilidad cuántica de manera significativa, en el rango de valores mostrado en la figura. Por otro lado, los valores medios de energía cuánticos (figura 3) no siguen el rápido crecimiento de los valores clásicos, ya que sólo aumentan inicialmente y luego os-

cilan ligeramente arriba del umbral de ionización.

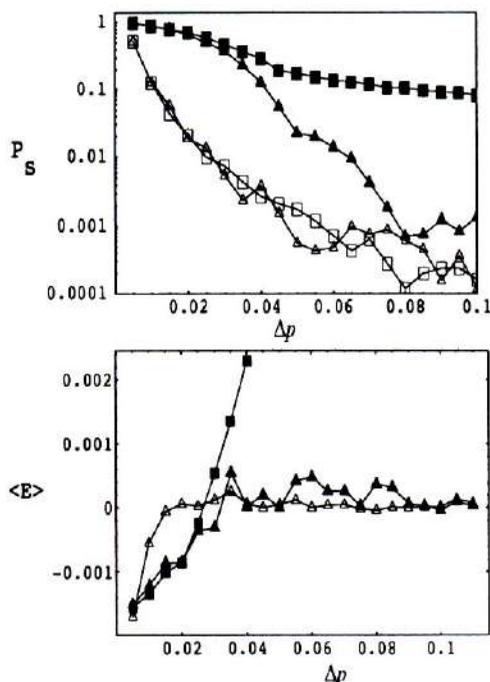


Figura 3: Probabilidad de supervivencia y valor esperado de energía del átomo de potasio ($n_i = 30$) tras la aplicación de 50 pulsos de Dirac con $T = T_{n_i}$ e impulso de magnitud $|\Delta p|$. Resultados cuánticos: pulsos de polaridad positiva (Δ), pulsos de polaridad negativa (\blacktriangle). Resultados clásicos: pulsos de polaridad positiva (\square), pulsos de polaridad negativa (\blacksquare).

Desde el punto de vista clásico el rápido decaimiento de la probabilidad de supervivencia se debe a que el espacio de fase del átomo impulsado positivamente (figura 4a) es globalmente caótico y a la imposibilidad de que el electrón activo sea recapturado una vez ionizado. Por estas mismas razones, si el átomo es impulsado positivamente la probabilidad de supervivencia decae de manera rápida con el número de pulsos aplicados, como se aprecia en la figura 5(a). En la figura se observa que el decaimiento es algebraico (para $k \gg 1$) y que la correspondencia clásico-cuántica se mantiene durante un número considerable de pulsos.

Si el átomo alcalino es forzado por impulsos positivos, la probabilidad de supervivencia clásica no depende de manera fuerte del período del tren de Dirac (figura 6(a)), lo cual es consecuencia del caos dinámico completo que presenta el sistema en tal caso. La res-

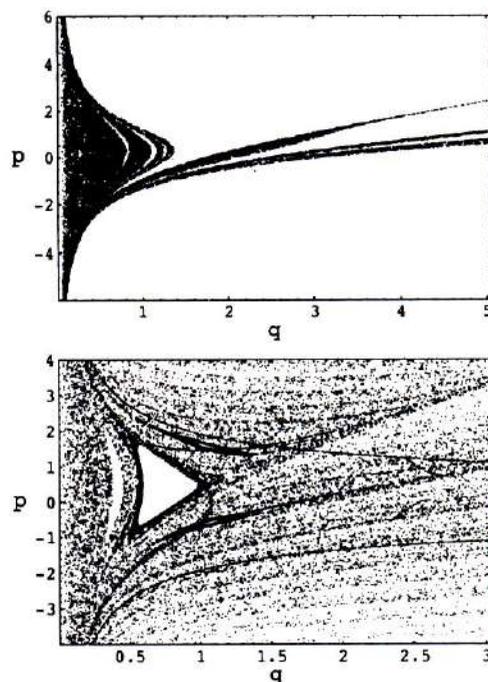


Figura 4: Diagramas de Poincaré del átomo alcalino pateado de potasio. El diagrama se genera con 2000 puntos de la órbita no perturbada ($n_i = 30$) que se someten a 50 pulsos de período $T = 0.45T_{n_i}$ e impulso (a) 0.015 y (b) -0.03 . Las variables se han escalado como $q/(n_i - 1 + \lambda)^2$ y $(n_i - 1 + \lambda)p$. También se muestra la órbita no forzada (línea gruesa) y la separatriz continuo-acotado (línea delgada).

pectiva probabilidad de supervivencia cuántica es más sensible a cambios en T , y aunque no se aleja extremadamente de los resultados clásicos, exhibe un marcado comportamiento oscilatorio alrededor o por encima de éstos últimos.

Impulso negativo $\Delta p < 0$.

Si el impulso es negativo (dirigido hacia el tronco atómico), la probabilidad de supervivencia como función de la magnitud del impulso (figura 3) es mucho más grande que en el caso anterior, por lo menos para moderados valores de Δp . La correspondencia clásico-cuántica es bastante buena hasta $|\Delta p| \lesssim 0.03$, valor a partir del cual la curva cuántica disminuye de manera mucho más rápida que la clásica. Los valores esperados de energía cuánticos siguen los valores clásicos para pequeñas mag-

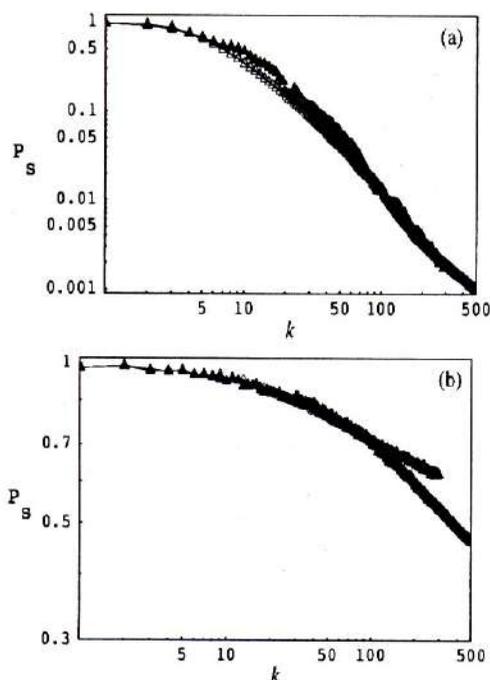


Figura 5: Probabilidad de supervivencia P_s del átomo de potasio ($n_i = 30$) respecto al número de pateos de un tren de período $T = 0.45T_{n_i}$, e impulso (a) $\Delta p = 0.015$ y (b) $\Delta p = -0.03$. Resultados cuánticos (\blacktriangle), clásicos (\triangle).

nitudes del impulso ($|\Delta p| \lesssim 0.025$), pero luego se ubican ligeramente arriba de la energía umbral ($E = 0$).

Desde el punto de vista clásico éste comportamiento se debe a la estructura mixta (figura 4(b)) que presenta el espacio de fase del electrón activo negativamente pateado. En este caso existen en el espacio de fase islas regulares insertadas en el mar caótico y es posible la recaptura del electrón que ha alcanzado energías positivas. Por otro lado, el electrón activo puede ser atrapado en estas zonas regulares afectando el viaje del electrón hacia el continuo y conllevando a que la probabilidad de supervivencia del átomo alcalino se incremente de manera importante con relación al caso de impulsos positivos.

El anterior resultado se verifica también en la curva de probabilidad de supervivencia como función del número de pulsos (figura 5(b)) la cual, en contraste con los resultados para $\Delta p > 0$, exhibe un comportamiento oscilatorio durante los primeros impulsos para luego decaer algebraicamente (de manera más lenta) con el número de impulsos. Se observa también que la corres-

pondencia clásico-cuántica es buena para los primeros pulsos ($k \lesssim 35$), pero luego la probabilidad de supervivencia cuántica disminuye más rápidamente que la clásica.

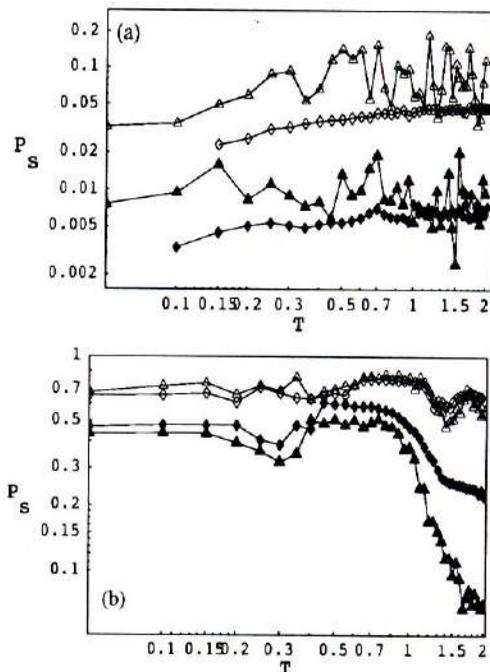


Figura 6: Probabilidad de supervivencia y valor esperado de la energía del átomo de potasio ($n_i = 30$) con respecto al período del tren T tras la aplicación de 50 pulsos: (a) positivos, (b) negativos. Resultados cuánticos: $|\Delta p| = 0.015$ (\triangle), $|\Delta p| = 0.03$ (\blacktriangle). Resultados clásicos: $|\Delta p| = 0.015$ (\diamond), $|\Delta p| = 0.03$ (\blacklozenge).

Es interesante observar que la probabilidad de supervivencia depende fuertemente del período del tren de impulsos de Dirac tanto clásica como cuánticamente, como se aprecia en la figura 6(b). De hecho, la correspondencia clásico-cuántica es bastante buena y la probabilidad de supervivencia exhibe máximos y mínimos que dependen de la relación T/T_{n_i} . En particular, si el impulso es de -0.03 , cuando el período del tren es de $0.45T_{n_i}$, la probabilidad de supervivencia es máxima, sugiriendo que el átomo alcalino se estabiliza para este conjunto de parámetros.

Clásicamente, la estabilización está asociada con el translapamiento de la órbita inicial con las islas estables más prominentes que se forman en el espacio de fase del

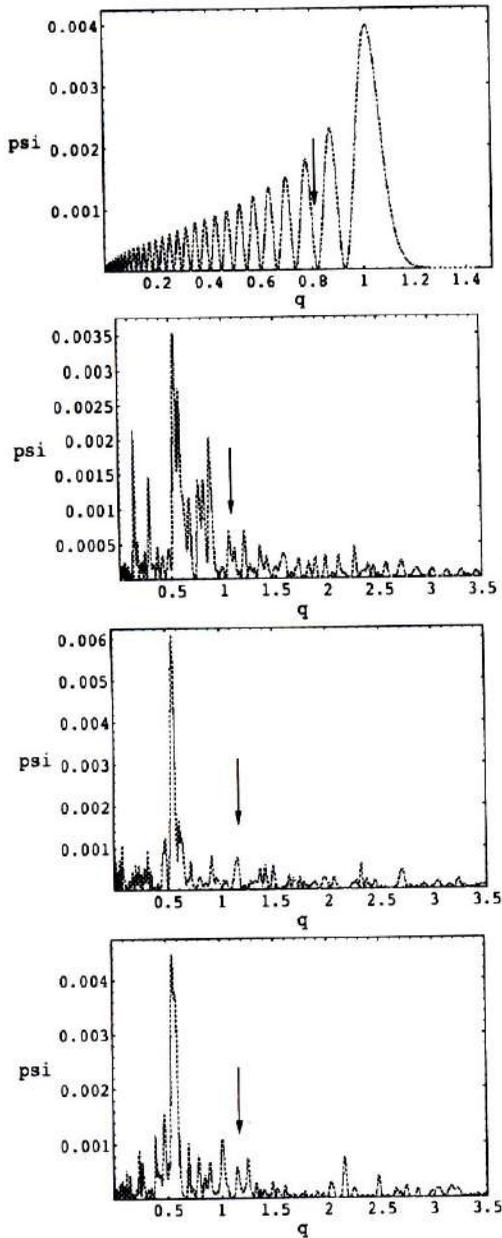


Figura 7: Evolución de la función de onda del átomo de potasio ($n_i = 30$) bajo un tren de pulsos negativos: $T = 0.45T_{n_i}$, $\Delta p = -0.03$. (a) Función de onda inicial, justo antes del pulso 6 (b), 11 (c), 16 (d). Las flechas indican el valor esperado de posición del paquete.

átomo alcalino pateado negativamente. Las islas atrapan un número apreciable de condiciones iniciales de la órbita inicial como es visible en la figura 4(b) y la probabilidad de supervivencia del átomo se incrementa de manera importante.

Para los mismos valores de los parámetros se observa a nivel cuántico una complicada evolución de la función de onda (figura 7). En correspondencia con los resultados clásicos, la evolución es tal que el valor medio de posición con respecto a $\psi(q, kT)$ no alcanza valores extremadamente altos durante los primeros pulsos del tren.

5. Conclusiones y perspectivas

El proceso de ionización del átomo alcalino debido a pulsos unipolares (positivos o negativos) es marcadamente distinto al de pulsos ópticos ultracortos. Esto se debe a que a diferencia de los últimos, los pulsos unipolares son capaces de transferir un momentum neto al electrón activo del átomo alcalino. El pulso redistribuye coherentemente la población inicial del átomo alcalino y es capaz de generar hasta un 100% de ionización. Los campos requeridos para originar una ionización apreciable varían como $1/(n-1+\lambda)$, tanto clásica como cuánticamente. Estos valores son extremadamente altos en comparación con los campos requeridos ($1/n^4$) para originar ionización por pulsos ópticos [4] o por pulsos unipolares de mayor duración [10].

Un átomo alcalino que se somete a un tren de impulsos sigue un proceso de ionización clásico bastante complejo que se ve reflejado en la estructura de su espacio de fase. Si el impulso es *positivo* no es posible recapturar al electrón ionizado y el espacio de fase del átomo alcalino es globalmente caótico. Como consecuencia [3], la probabilidad de supervivencia decae rápidamente con la magnitud del impulso, no depende de manera importante del período de repetición del tren; con estas dos cantidades fijas, presenta una gran tasa de decaimiento (algebraico) con el número de pulsos ($k^{-1.5}$). Para magnitudes del impulso moderadas los resultados cuánticos siguen a los clásicos en un número considerable de pulsos. En contraste con los resultados clásicos, la probabilidad de supervivencia cuántica presenta una dependencia (aunque no muy fuerte) con el período tren de Dirac.

Si el impulso es *negativo* es posible recapturar el electrón que eventualmente ha ionizado y el espacio de fase exhibe una estructura mixta con zonas regulares inmer-

sas en un mar caótico totalmente interconectado. La probabilidad de supervivencia disminuye con la magnitud del impulso de manera menos drástica y nuevamente los resultados cuánticos siguen a los clásicos por un número considerable de periodos del tren. Tanto los resultados cuánticos como los clásicos conducen a zonas en el espacio de parámetros del forzamiento en las cuales el átomo alcalino parece exhibir estabilización.

Desde el punto de vista clásico, la estabilización se asocia con el confinamiento de un número apreciable de condiciones iniciales en las islas estables del espacio de fase. En correspondencia, la función de onda del átomo alcalino exhibe un comportamiento complicado sin alejarse apreciablemente del tronco atómico durante el número de impulsos en que la curva de probabilidad de supervivencia presenta oscilaciones.

En este punto, funciones de distribución cuánticas en el espacio de fase, como por ejemplo la función de Husimi [12], constituyen una herramienta extremadamente útil con el fin de hacer comparaciones con la localización y estabilización en el espacio de fase clásico. La estabilización cuántica se debe a la localización de unos pocos estados de Floquet [8] (estados propios del operador de Floquet) y es de esperar que en tal caso las distribuciones cuánticas de tales estados se ubiquen alrededor de las islas estables clásicas. Un trabajo a lo largo de estas ideas está en desarrollo.

Agradecimientos.

Los autores agradecen a la Dirección Nacional de Investigación (DINAIN) de la Universidad Nacional de Colombia por su apoyo al Grupo "Caos y Complejidad" (C&C), al igual que a COLCIENCIAS. Agradecimientos a los integrantes del Grupo, en especial a la profesora Carolina Spinel por importantes anotaciones sobre el tema.

Referencias

- [1] R. Blümel. *Chaos in atomic physics*. Cambridge University Press, Reino Unido (1997).
- [2] R.R. Jones, D. You y P.H. Bucksbaum, Phys. Rev. Lett. **70**, 1236 (1993).
- [3] M. T. Frey, F. B. Dunning, C. O. Reinhold, S. Yoshida, and J. Burgdörfer, Phys. Rev. A **59**, 1434 (1999).
- [4] R.R. Jones, Phys. Rev. Lett. **70**, 3927 (1999). J. Ahn, D.N. Hutchinson, et al., quant-ph/0009064 (2000).
- [5] D. Campos. *Teoría de sistemas cuánticos*. Universidad Nacional, Bogotá (1989).
- [6] D. Campos, M. C. Spinel y J. Madroñero, J. Phys. A: Math. Gen. **34**, 8101 (2001).
- [7] A. Castañeda *Dinámica cuántica de un átomo alcalino unidimensional en un tren de Dirac*. Trabajo de grado. Universidad Nacional, Bogotá (2001).
- [8] S. Yoshida, C.O. Reinhold, et al., Phys. Rev. A **59**, R4121 (1999).
- [9] M. Rotenberg, Adv. At. Mol. Phys. **6**, 233 (1970).
- [10] M. Melles, C.O. Reinhold et al., J. Phys. B: At. Mol. Phys **26**, L659 (1993).
- [11] N.E. Tielking y R.R. Jones, Phys. Rev. A **52**, 1371 (1995).
- [12] Lee H., Phys. Rep. **259**, 147 (1995).

LOS ELEMENTOS ORBITALES POSTNEWTONIANOS DE LA SOLUCIÓN ANALÍTICA DE DAMOUR & DERUELLE PARA EL PROBLEMA RELATIVISTA DE LOS DOS CUERPOS

por

José Gregorio Portilla¹ & Juan Manuel Tejeiro²

Resumen

J. G. Portilla, J. M. Tejeiro. Los elementos orbitales postnewtonianos de la solución analítica de Damour & Deruelle para el problema relativista de los dos cuerpos. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **25(97):** 537-551, 2001. ISSN 0370-3908.

Se presenta una descripción detallada de la solución analítica propuesta por Damour & Deruelle (D&D) para resolver la ecuación diferencial que describe el problema de los dos cuerpos postnewtoniano. Se muestra la relación entre las constantes de movimiento y los denominados elementos orbitales postnewtonianos, los cuales se reducen a los elementos clásicos al tomar $c \rightarrow \infty$. Con el fin de verificar el grado de exactitud de la solución, se estudia el sistema conformado por Mercurio alrededor del Sol. Los resultados se han comparado con los obtenidos a través de una integración numérica directa de las ecuaciones de movimiento. Se encuentra que la solución analítica de D&D describe con un alto grado de exactitud el movimiento del Mercurio comparado con los resultados de la integración numérica directa de las ecuaciones diferenciales.

Palabras clave. Mecánica celeste, Problema de los dos cuerpos postnewtoniano, Relatividad General.

Abstract

We present a detailed description of the analytical solution due to Damour & Deruelle in order to resolve the differential equation of the post-Newtonian two body problem. It's shown the relationship between the constants of motion and the so called post-Newtonian orbital elements, which are reduced to the classical orbital elements when $c \rightarrow \infty$. The Sun-Mercury system is used to study the accuracy of the solution. The results are compared with those obtained through a direct numerical integration of the equations of motion. It's found that the D&D solution describes, with a high degree of accuracy, the motion of Mercury compared with that obtained with the direct numerical integration.

Key words. Celestial Mechanics, Post-Newtonian Two body Problem, General Relativity.

-
- 1 Observatorio Astronómico Nacional. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. E-mail: gportill@ciencias.unal.edu.co Apartado Aéreo 2584.
 - 2 Observatorio Astronómico Nacional. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. E-mail: jtejeiro@ciencias.unal.edu.co Apartado Aéreo 2584.

Introducción

En el estado actual del arte, la Teoría de la Relatividad General (TRG) ya no se ve como una teoría que deba ser probada a toda costa conforme se va avanzando en las técnicas observacionales, sino que es el fundamento necesario para la construcción de las actuales y complejas teorías dinámicas que estudian el movimiento de los cuerpos principales del sistema solar. De hecho, la TRG ha venido a convertirse, entre los modernos especialistas, en el fundamento de la mecánica celeste propiamente dicha. Sin embargo, todavía está muy difundida la idea de contemplar de forma superficial a la TRG como una teoría necesaria sólo para adicionar pequeñas correcciones a la mecánica clásica newtoniana (Brumberg, 1991).

Bajo la TRG el movimiento de las partículas embebidas en campos gravitacionales se presenta como el *movimiento libre inercial a lo largo de líneas geodésicas del espacio pseudo-Riemanniano* con una métrica determinada por las masas gravitantes. El concepto es fácilmente entendible, pero trasladado a los detalles matemáticos es complicado de llevar a cabo. De hecho, es necesario apelar a toda clase de aproximaciones y suposiciones no exentas de críticas y defectos para poder llegar finalmente a las ecuaciones de movimiento. Para un análisis crítico de la mecánica celeste relativista véase Damour (1987).

Poco después de haberse introducido la TRG, se elaboró un método de aproximación llamado "postnewtoniano", el cual permitía comparar la TRG con la teoría newtoniana. La aproximación postnewtoniana es una aproximación de "movimiento lento" y "campo débil" de la TRG. Bajo este esquema se introducen algunos parámetros adimensionales que justifican realizar la linealización de las ecuaciones de campo de Einstein. Pero hay una característica adicional a este desarrollo. Y es que a pesar de que la TRG ha salido airosa de cuanta prueba experimental haya sido posible concebir, eso no ha impedido que varios teóricos inconformes elaboren teorías métricas de la gravedad distintas a la de la TRG. Por fortuna, dichas teorías, junto con la TRG, pueden, bajo una linealización, escribirse de forma casi idéntica salvo en los valores numéricos que adoptan los parámetros propios de cada teoría gravitacional. Dos de los parámetros más usados son γ y β los cuales representan respectivamente el valor de la curvatura espacial y la cantidad de no linealidad contenida en la TRG. El que se pueda escribir las ecuaciones de movimiento incluyendo cuanto parámetro exótico exista (actualmente se llegan a contar hasta diez de los mismos) permite condensar fácilmente y de una sola vez todas las teorías métricas, con lo que es inmediato realizar predicciones teóricas y compararlas con lo que se mide en la naturaleza. Esta teoría general que comprende todos los casos posibles es llamada el formalismo "postnewtoniano parametrizado", PPN, por sus siglas en inglés. Dicha teoría contiene un conjunto de parámetros a los que se les puede asignar

valores específicos de manera arbitraria. Un conjunto de valores para estos parámetros hace que, por ejemplo, el formalismo PPN sea idéntico al límite postnewtoniano de la TRG, cosa que se logra haciendo $\gamma = \beta = 1$. En este artículo se considera a la TRG como la única teoría de la gravitación apropiada para explicar la naturaleza, por lo que evitaremos la escritura en parámetros PPN.

Con la presente comunicación se pretende no sólo exponer con detenimiento una solución del problema de los dos cuerpos post-newtoniano, lamentablemente poco conocida en la literatura, sino también dar a conocer el grado de aplicabilidad de dicha solución en comparación con la integración numérica directa de las ecuaciones de movimiento. La solución aquí expuesta constituye una generalización de las clásicas expresiones newtonianas que se encuentran en todos los libros de mecánica celeste.

La ecuación de movimiento

En la aproximación postnewtoniana el problema del movimiento se ataca primero considerando un espacio-tiempo asintóticamente plano que pueda ser cubierto con un simple sistema global de coordenadas. El sistema de coordenadas, llamado ahora "coordenadas PPN", otorga una división natural $3 + 1$ del espacio-tiempo en *espacio + tiempo*. Esta división convenientemente usa la notación del análisis vectorial del espacio plano tridimensional. Por supuesto, ello significa que la teoría postnewtoniana intenta ajustar la TRG en un armazón puramente newtoniano y arrastra consigo los conceptos del espacio y tiempo absolutos.

La ecuación diferencial que describe el movimiento de una masa puntual m_2 con respecto a otra masa puntual m_1 bajo la aproximación post-newtoniana, en términos de la distancia relativa \mathbf{r} , es (Soffel, 1989):

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{Gm}{r^3}\mathbf{r} + \frac{Gm}{c^2 r^3} \left\{ \left[\frac{Gm}{r}(4 + 2\sigma) - (1 + 3\sigma)(\dot{\mathbf{r}})^2 + \frac{3\sigma}{2r^2}(\mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{r}})^2 \right] \mathbf{r} + (\mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{r}})(4 - 2\sigma)\dot{\mathbf{r}} \right\} \quad (1)$$

donde $r = |\mathbf{r}|$, $\ddot{\mathbf{r}}$ representa la aceleración de uno de los cuerpos con relación al otro, c la velocidad de la luz en el vacío, $m = m_1 + m_2$ y $\sigma = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)^2$. Es claro que al tomar $c \rightarrow \infty$ esta ecuación se convierte en la clásica ecuación del problema de dos cuerpos: $\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{Gm\mathbf{r}}{r^3}$.

Una manera de resolver el problema del movimiento relativo en la aproximación postnewtoniana (IPN) es considerar la ecuación (1) de la siguiente forma:

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = -\frac{Gm}{r^3}\mathbf{r} + \mathbf{a}_p,$$

siendo \mathbf{a}_p el término de "perturbación" que está siendo multiplicado por Gm/c^2 , y estudiar el efecto de dicha perturbación en la solución exacta clásica del problema

de dos cuerpos, tal y como se aborda en el conocido método de variación de parámetros en el que se estudia la variación temporal de las constantes de movimiento, esto es, de los elementos orbitales, ver por ejemplo **Brouwer & Clemence** (1961). Así procede **Rubincam** (1975), quien, a partir de la métrica de Schwarzschild y de la ecuación de la geodésica, utilizó las ecuaciones planetarias de Lagrange para obtener la variación temporal de los elementos orbitales clásicos de un satélite artificial alrededor de la Tierra.

Brumberg (1991) descompone la aceleración perturbadora \mathbf{a}_p en sus componentes radial, transversal y normal y utiliza las formas gaussianas de las ecuaciones de Lagrange para obtener la variación temporal de los elementos orbitales (una solución por elementos osculadores). El método es útil siempre y cuando uno esté interesado en observar los cambios seculares y cuasi-periódicos en los elementos orbitales clásicos. Este autor encuentra que la inclinación y la longitud del nodo ascendente son constantes en el tiempo; el semieje mayor y la excentricidad oscilan alrededor de un valor medio con período igual al período orbital y el argumento de latitud del pericentro cambia en el tiempo con contribución secular y periódica. **Lestrade** (1981), utilizando las ecuaciones planetarias de Lagrange, obtiene expresiones analíticas — por expansión en series de potencias en términos de las excentricidades — que permiten tener en cuenta la variación de los elementos orbitales clásicos hasta el primer orden. Una solución muy elegante, también por aproximaciones, es la elaborada por **Richardson & Kelly** (1988), la cual, utilizando variables de Delaunay y transformaciones canónicas, obtiene la variación temporal de los elementos clásicos.

La otra forma de resolver la ecuación diferencial (1) es por medio de una solución “analítica” cerrada. A primera vista, la ecuación diferencial parece demasiado complicada como para suponer que no la tiene. Esto, rigurosamente hablando, es cierto. Pero, si el término postnewtoniano es del orden de $1/c^2$ es posible hallar una solución válida — dentro de un orden de aproximación razonable — siempre y cuando expresiones de $1/c^n$ con $n \geq 4$ sean consideradas despreciables. Esta forma de solución puede considerarse más que suficiente pues la obtención de la ecuación de movimiento se hizo a través de un proceso de aproximación que consideró los términos despreciables a partir de $1/c^n$ con $n \geq 4$, ver **Richardson & Kelly** (1988).

Se han publicado varios métodos de solución analítica — válidos a un orden de $1/c^2$ — de la ecuación diferencial (1). Las soluciones propuestas son las de **Brumberg** (1991), pág. 82, **Wagoner & Will** (1976), **Haugan** (1985) y **Damour & Deruelle** (1985). Ver **Soffel** (1989), para una exposición de las soluciones (excepto la de Haugan) con una notación unificada. Puede verse también el artículo de **Soffel et al.** (1987), que contiene una exposición detallada de varias formas de solución analítica, así como un resumen de la solución de **Brumberg** por elementos osculadores. Sin embargo, la solución

propuesta por **Damour & Deruelle**, que llamaremos de ahora en adelante como la solución D&D, ha merecido una aplicación extensiva en lo que se refiere al estudio de la señales del pulsar binario PSR 1913 +16 (**Taylor & Weisberg** (1989)) como también a estudios de perturbación de su solución analítica (**Calura et al.** (1997)). La presente comunicación pretende ahondar en la solución D&D, haciendo explícitos ciertos desarrollos — que no son evidentes en los pocos artículos que hay sobre el tema — y guiados por la solución clásica haremos claro el concepto de “elementos orbitales postnewtonianos”.

La solución analítica de D&D

La ecuación diferencial (1) puede obtenerse directamente de la lagrangiana \mathcal{L} (**Richardson & Kelly** (1988)):

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\dot{\mathbf{r}})^2 + \frac{Gm}{r} + \frac{1}{8c^2}(\dot{\mathbf{r}})^2(1 - 3\sigma) + \frac{Gm}{2rc^2}(3 + \sigma)(\dot{\mathbf{r}})^2 + \frac{Gm\sigma}{2r^3c^2}(\mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{r}})^2 - \frac{1}{2c^2} \left(\frac{Gm}{r} \right)^2, \quad (2)$$

A partir de ésta, podemos obtener el hamiltoniano E mediante:

$$E = \mathbf{v} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{v}} - \mathcal{L},$$

que es una constante de movimiento.

Procediendo, obtenemos:

$$E = \frac{1}{2}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) - \frac{Gm}{r} + \frac{1}{c^2} \left\{ \frac{3}{8}(1 - 3\sigma)(\mathbf{v} \cdot \mathbf{v})^2 + \frac{Gm}{2r} \left[(3 + \sigma)(\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) + \sigma(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})^2 + \frac{Gm}{r} \right] \right\}, \quad (3)$$

donde $\mathbf{n} = \mathbf{r}/r$.

La invariancia de la lagrangiana \mathcal{L} ante rotaciones implica:

$$\mathbf{H} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = \text{constante}, \quad (4)$$

donde \mathbf{p} está definido por

$$\mathbf{p} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{r}}}.$$

Entonces, de (2) se deduce que

$$\mathbf{p} = \dot{\mathbf{r}} \left[1 + \frac{(1 - 3\sigma)}{2c^2}(\dot{\mathbf{r}})^2 + \frac{Gm(3 + \sigma)}{rc^2} \right] + \frac{Gm\sigma}{c^2 r^3}(\mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{r}})\mathbf{r}, \quad (5)$$

que al multiplicar vectorialmente por $\mathbf{r} \times$ se tiene

$$\mathbf{r} \times \mathbf{p} = \mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}} \left[1 + \frac{(1 - 3\sigma)}{2c^2}(\dot{\mathbf{r}})^2 + \frac{Gm(3 + \sigma)}{rc^2} \right] = \mathbf{H}. \quad (6)$$

En términos de las componentes de la posición (x, y, z) y de la velocidad $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ se encuentra que las componentes rectangulares de \mathbf{H} son:

$$\begin{aligned} H_x &= (y\dot{z} - z\dot{y}) \left[1 + \frac{1-3\sigma}{2c^2}(\dot{\mathbf{r}})^2 + \frac{Gm(3+\sigma)}{rc^2} \right], \\ H_y &= (z\dot{x} - x\dot{z}) \left[1 + \frac{1-3\sigma}{2c^2}(\dot{\mathbf{r}})^2 + \frac{Gm(3+\sigma)}{rc^2} \right], \\ H_z &= (x\dot{y} - y\dot{x}) \left[1 + \frac{1-3\sigma}{2c^2}(\dot{\mathbf{r}})^2 + \frac{Gm(3+\sigma)}{rc^2} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Puesto que el vector \mathbf{H} es constante y es ortogonal a \mathbf{r} y $\dot{\mathbf{r}}$ se deduce que *el movimiento está contenido en un plano*.

Introducimos coordenadas polares para describir el movimiento en el plano, esto es, utilizamos como vectores posición y velocidad a

$$\mathbf{r} = r\hat{u}_r, \quad \dot{\mathbf{r}} = r\dot{\theta}\hat{u}_\theta + \dot{r}\hat{u}_r,$$

donde \hat{u}_r y \hat{u}_θ son vectores unitarios mutuamente ortogonales el primero de los cuales está dirigido en la dirección radial. Con ello las ecuaciones (3) y (6) pueden escribirse como:

$$E = \frac{1}{2}(\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2) - \frac{Gm}{r} + \frac{3}{8c^2}(1-3\sigma)(\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2)^2 + \frac{Gm}{2rc^2} \left[(3+2\sigma)\dot{r}^2 + (3+\sigma)r^2\dot{\theta}^2 + \frac{Gm}{r} \right], \quad (8)$$

$$H = r^2\dot{\theta} \left[1 + \frac{(1-3\sigma)}{2c^2}(\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2) + \frac{Gm(3+\sigma)}{rc^2} \right]. \quad (9)$$

Procedemos a resolver la ecuación (9). Dicha ecuación se puede escribir de la forma

$$r^2\dot{\theta} = \frac{H}{1+K_c} = H(1+K_c)^{-1},$$

donde K_c representa la suma de términos del orden de $1/c^2$ en (9). Expandiendo en series de potencias y considerando despreciables los términos del orden $1/c^4$ en adelante se obtiene

$$r^2\dot{\theta} = H(1-K_c) = H \left[1 - \frac{(1-3\sigma)}{2c^2}(\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2) - \frac{Gm(3+\sigma)}{rc^2} \right]. \quad (10)$$

Pero, puesto que al aislar el término $\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2$ en la ecuación (8) se puede escribir

$$\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2 = 2E + \frac{2Gm}{r} - O(1/c^2), \quad (11)$$

al reemplazar esta última en (10) y conservando sólo los términos del orden de $1/c^2$ se obtiene

$$r^2\dot{\theta} = H \left[1 + \frac{(3\sigma-1)E}{c^2} + \frac{2Gm}{rc^2}(\sigma-2) \right]. \quad (12)$$

Llamando:

$$I = H \left[1 + \frac{(3\sigma-1)E}{c^2} \right], \quad (13)$$

$$J = \frac{2Gm(\sigma-2)H}{c^2}, \quad (14)$$

entonces la ecuación (12) queda

$$\dot{\theta} = \frac{I}{r^2} + \frac{J}{r^3}. \quad (15)$$

Por otro lado, si despejamos de (8) el valor de \dot{r}^2 tenemos

$$\dot{r}^2 = -r^2\dot{\theta}^2 + \frac{2Gm}{r} + 2E - \frac{3}{4c^2}(1-3\sigma)(\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2)^2 - \frac{Gm}{rc^2} \left[(3+2\sigma)\dot{r}^2 + (3+\sigma)r^2\dot{\theta}^2 + \frac{Gm}{r} \right]. \quad (16)$$

Al reemplazar en esta última ecuación los valores de \dot{r}^2 dado por (11), de $\dot{\theta}$ encontrado en (12) y de $\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2$ en (11) se obtiene, después de un poco de álgebra:

$$\begin{aligned} \dot{r}^2 &= 2E \left[1 + \frac{3(3\sigma-1)E}{2c^2} \right] + \frac{2Gm}{r} \left[1 + \frac{(7\sigma-6)E}{c^2} \right] \\ &+ \frac{1}{r^2} \left\{ -H^2 \left[1 + \frac{2(3\sigma-1)E}{c^2} - \frac{5(\sigma-2)G^2m^2}{H^2c^2} \right] \right\} \\ &+ \frac{H^2Gm(8-3\sigma)}{r^3c^2}. \end{aligned} \quad (17)$$

Llamando:

$$A = 2E \left[1 + \frac{3(3\sigma-1)E}{2c^2} \right], \quad (18)$$

$$B = Gm \left[1 + \frac{(7\sigma-6)E}{c^2} \right], \quad (19)$$

$$C = -H^2 \left[1 + \frac{2(3\sigma-1)E}{c^2} - \frac{5(\sigma-2)G^2m^2}{H^2c^2} \right], \quad (20)$$

$$D = \frac{H^2Gm(8-3\sigma)}{c^2}, \quad (21)$$

la ecuación (17) puede escribirse como:

$$\dot{r}^2 = A + \frac{2B}{r} + \frac{C}{r^2} + \frac{D}{r^3}. \quad (22)$$

La solución de D&D consiste primeramente en introducir una variable \bar{r} definida así:

$$r = \bar{r} + \frac{D}{2C_0}, \quad (23)$$

donde D es el valor definido en (21) y C_0 es el valor límite que toma C dado en (20) cuando $1/c^2 \rightarrow 0$, esto es, $-H^2$. Es claro que $\dot{r} = \dot{\bar{r}}$.

Al reemplazar el valor de r dado en (23) en (22) se obtiene

$$\begin{aligned} \dot{\bar{r}}^2 &= A + \frac{2B}{\bar{r}} \left(1 + \frac{D}{2C_0\bar{r}} \right)^{-1} + \frac{C}{\bar{r}^2} \left(1 + \frac{D}{2C_0\bar{r}} \right)^{-2} \\ &+ \frac{D}{\bar{r}^3} \left(1 + \frac{D}{2C_0\bar{r}} \right)^{-3}, \end{aligned} \quad (24)$$

la cual, al tomar en expansión en serie de Taylor los términos con exponentes en el lado derecho, *siempre conservando los términos de $1/c^2$ y haciendo cero los de orden superior o igual a $1/c^4$* obtenemos

$$\dot{\bar{r}}^2 = A + \frac{2B}{\bar{r}} + \frac{1}{\bar{r}^2} \left(C - \frac{BD}{C_0} \right) - \frac{DC}{C_0\bar{r}^3} + \frac{D}{\bar{r}^3}. \quad (25)$$

Ahora bien, puesto que la relación

$$\frac{C}{C_0} = \frac{H^2}{H^2} [1 + O(1/c^2)] = 1 + O(1/c^2),$$

el producto $\frac{DC}{C_0}$ es igual a D , pues éste es del orden de $1/c^2$.

Llamando:

$$\bar{C} = C - \frac{BD}{C_0}, \tag{26}$$

la ecuación (25) queda

$$\dot{r}^2 = A + \frac{2B}{r} + \frac{\bar{C}}{r^2}. \tag{27}$$

Nótese que la transformación ha permitido eliminar el término que contiene \bar{r}^{-3} .

En lo que sigue se hará énfasis sólo en el movimiento elíptico, por ser el de mayor importancia astronómica. Si nos guiamos por el proceso de solución de las ecuaciones diferenciales en el movimiento elíptico clásico, que se pueden verificar en cualquier libro de mecánica celeste, podemos definir nuevas constantes adaptando resultados bien conocidos a nuestras necesidades.

Podemos llamar (**Brouwer & Clemence** (1961)):

$$\bar{e} = \sqrt{1 + \frac{CA}{B^2}}, \tag{28}$$

$$\bar{\mu} = B, \tag{29}$$

$$\bar{a} = -\frac{B}{A}, \tag{30}$$

entonces la ecuación (27) queda

$$\dot{\bar{r}}^2 = -\frac{\bar{\mu}}{\bar{a}} + \frac{2\bar{\mu}}{\bar{r}} - \frac{\bar{\mu}\bar{a}(1 - \bar{e}^2)}{\bar{r}^2}, \tag{31}$$

Al definir \bar{n} como:

$$\bar{n} = \sqrt{-\frac{A^3}{B^2}} = \sqrt{\frac{\bar{\mu}}{\bar{a}^3}}, \tag{32}$$

y realizando un proceso de integración directo (**Portilla** (2001)), bien conocido en la literatura, se obtiene:

$$\bar{r} = \bar{a}(1 - \bar{e} \cos u), \tag{33}$$

donde u es una variable de integración que juega el mismo papel de la anomalía excéntrica en el caso clásico y que aquí continuaremos llamando así.

Es igualmente fácil de verificar que la relación entre u y el tiempo t es:

$$u - \bar{e} \sin u = \bar{n}(t - t_0), \tag{34}$$

donde t_0 es una constante de integración que corresponde al tiempo cuando $u = 0$. La constante \bar{e} es llamada excentricidad temporal. Definiendo la anomalía media como:

$$M = \bar{n}(t - t_0), \tag{35}$$

la ecuación (34), versión postnewtoniana de la ecuación de Kepler, queda:

$$u - \bar{e} \sin u = M. \tag{36}$$

Recuperemos la variable original r , esto es, el radio vector, mediante (23):

$$r = \bar{a} + \frac{D}{2C_0} - \bar{a}\bar{e} \cos u.$$

Haciendo

$$a_R = \bar{a} + \frac{D}{2C_0}, \tag{37}$$

$$e_R = \frac{\bar{a}\bar{e}}{\bar{a} + \frac{D}{2C_0}}, \tag{38}$$

obtenemos como ecuación del radio vector en términos de la anomalía excéntrica a:

$$r = a_R(1 - e_R \cos u), \tag{39}$$

donde a_R y e_R son llamados respectivamente semieje mayor radial y excentricidad radial.

Ahora procedemos a resolver la ecuación (15). De nuevo, haciendo el cambio de variable siguiente:

$$r = \tilde{r} + \frac{J}{2I}, \tag{40}$$

donde I y J están dados por (13) y (14).

Al reemplazar el valor de r definido en (40) en la ecuación (15) se obtiene

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{I}{\tilde{r}^2} \left(1 + \frac{J}{2I\tilde{r}}\right)^{-2} + \frac{J}{\tilde{r}^3} \left(1 + \frac{J}{2I\tilde{r}}\right)^{-3}.$$

Tomando la expansión en serie de Taylor de los términos con exponentes en el lado derecho, y teniendo en cuenta que J es del orden de $1/c^2$ se obtiene

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{I}{\tilde{r}^2}. \tag{41}$$

Supongamos que existe una solución del tipo

$$\tilde{r} = \tilde{a}(1 - \tilde{e} \cos u), \tag{42}$$

donde \tilde{a} y \tilde{e} son constantes que no han de confundirse con \bar{a} , \bar{e} ni con a_R y e_R .

Por lo tanto, la ecuación (41) queda

$$\tilde{a}^2(1 - \tilde{e} \cos u)^2 d\theta = I dt. \tag{43}$$

Pero ahora estamos tratando de relacionar u con θ . Ello se logra expresando la diferencial de tiempo en términos de la diferencial de u que se puede obtener a partir de (34). En efecto, de ésta última se deduce

$$(1 - \tilde{e} \cos u) du = \tilde{n} dt.$$

Al reemplazar esta última ecuación en (43) tenemos

$$d\theta = \frac{I}{n\bar{a}^2} \frac{(1 - \bar{e} \cos u)}{(1 - \tilde{e} \cos u)^2} du. \quad (44)$$

Antes de seguir con el proceso de integración es útil expresar ahora ciertas constantes tales como a_R , \bar{a} , \tilde{a} , e_R , \bar{e} y \tilde{e} en términos de constantes más primarias.

El valor de \bar{a} ya fue expresado en términos de constantes iniciales y está dado por (30).

De la ecuación (37) y de (30) obtenemos

$$a_R = -\frac{B}{A} + \frac{D}{2C_0}. \quad (45)$$

Puesto que otra forma de determinar el radio vector es mediante la combinación de (40) y (42), esto es

$$r = \tilde{a} - \tilde{a}\tilde{e} \cos u + \frac{J}{2I}. \quad (46)$$

Comparando con (39) se obtiene

$$\tilde{a} = a_R - \frac{J}{2I}, \quad (47)$$

$$\tilde{e} = \frac{a_R}{\tilde{a}} e_R. \quad (48)$$

Por lo tanto, \tilde{a} está dada por

$$\tilde{a} = -\frac{B}{A} + \frac{D}{2C_0} - \frac{J}{2I}. \quad (49)$$

El valor de \bar{e} se obtuvo de la ecuación (28). El valor de e_R se determina a partir de (38):

$$e_R = \frac{\bar{e}}{1 + \frac{D}{2C_0\bar{a}}},$$

pero, puesto que \bar{a} está dada por (30), tenemos

$$e_R = \frac{\bar{e}}{1 - \frac{DA}{2C_0B}} = \bar{e} \left(1 + \frac{DA}{2C_0B} \right), \quad (50)$$

donde, en el último paso, se aprovechó la circunstancia de que D es del orden de c^{-2} .

El valor de \tilde{e} se halla a partir de (48) que con (47) se obtiene

$$\tilde{e} = \left[\frac{1}{1 - \frac{J}{2Ia_R}} \right],$$

y al reemplazar el valor de a_R dado en (45) y después de algo de álgebra obtenemos

$$\tilde{e} = \left(1 - \frac{JA}{2BI} \right) e_R, \quad (51)$$

o de (50):

$$\tilde{e} = \left(1 - \frac{JA}{2BI} + \frac{DA}{2C_0B} \right) \bar{e}. \quad (52)$$

Nótese que por ser D y J términos del orden de c^{-2} , \tilde{e} y \bar{e} sólo difieren en ese orden de magnitud.

Dicho esto, procedemos a integrar la ecuación (44).

Sea una constante e_θ definida de la siguiente forma:

$$\bar{e} = \left(\frac{\bar{e} + e_\theta}{2} \right) + \epsilon, \quad (53)$$

donde ϵ es del orden de c^{-2} .

De esta última se deduce que

$$e_\theta = \left(\frac{\bar{e} + e_\theta}{2} \right) - \epsilon,$$

que al despejar ϵ da

$$\epsilon = \left(\frac{\bar{e} + e_\theta}{2} \right) - e_\theta,$$

elevando al cuadrado es fácil verificar que

$$\epsilon^2 = \left(\frac{\bar{e} + e_\theta}{2} \right)^2 - \bar{e}e_\theta. \quad (54)$$

Hagamos ahora el siguiente producto:

$$(1 - \bar{e} \cos u)(1 - e_\theta \cos u) = 1 - \bar{e} \cos u - e_\theta \cos u + \bar{e}e_\theta \cos^2 u,$$

al reemplazar en esta última el valor de $\bar{e}e_\theta$ dado en (54) se tiene:

$$(1 - \bar{e} \cos u)(1 - e_\theta \cos u) = 1 - \frac{2(\bar{e} + e_\theta) \cos u}{2} + \left(\frac{\bar{e} + e_\theta}{2} \right)^2 \cos^2 u - \epsilon^2 \cos^2 u,$$

donde ϵ^2 es enteramente despreciable.

Por lo tanto:

$$(1 - \bar{e} \cos u)(1 - e_\theta \cos u) = \left[1 - \left(\frac{\bar{e} + e_\theta}{2} \right) \cos u \right]^2. \quad (55)$$

Ahora, la definición de e_θ se hizo en (53) sin especificar el valor de ϵ . Puesto que \bar{e} y \tilde{e} sólo difieren en un valor del orden de c^{-2} (ver ecuación (52)), podemos definir e_θ así:

$$e_\theta = 2\bar{e} - \bar{e}, \quad (56)$$

de la que se desprende que

$$\tilde{e} = \frac{\bar{e} + e_\theta}{2}. \quad (57)$$

Con ello, la ecuación (55) se puede escribir como:

$$\frac{(1 - \bar{e} \cos u)}{(1 - \tilde{e} \cos u)^2} = \frac{1}{1 - e_\theta \cos u}.$$

Reemplazando esta última expresión en (44) se tiene:

$$d\theta = \frac{I}{n\tilde{a}^2} \frac{du}{(1 - e_\theta \cos u)}.$$

Al integrar da:

$$\theta - \theta_0 = \frac{2I}{\tilde{n}\tilde{a}^2\sqrt{1-e_\theta^2}} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{1+e_\theta}{1-e_\theta}} \tan\left(\frac{u}{2}\right) \right], \quad (58)$$

en donde θ_0 es el valor que toma θ cuando $u = 0$. Aquí, no es evidente que con la integración aparezca un ángulo que es una nueva constante de movimiento, la cual no corresponde a θ_0 , pues como veremos más adelante, éste es función de constantes ya conocidas. El ángulo al que nos referimos es el argumento de latitud del pericentro, ω , y corresponde al ángulo medido sobre el plano orbital existente entre el nodo ascendente y el pericentro de la órbita. La razón de que no sea evidente su existencia se debe al hecho de que la integración se hace entre dos ángulos que se definen con independencia de la orientación de la órbita en el espacio.

Llamando:

$$K_\theta = \frac{I}{\tilde{n}\tilde{a}^2\sqrt{1-e_\theta^2}}, \quad (59)$$

$$A_\theta = 2 \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{1+e_\theta}{1-e_\theta}} \tan\left(\frac{u}{2}\right) \right], \quad (60)$$

entonces podemos escribir (58) como

$$\theta = \theta_0 + K_\theta A_\theta. \quad (61)$$

Nótese que el pericentro se verifica con cada nueva revolución de la anomalía excéntrica ($u = 2\pi$), pero, en el mismo punto la anomalía verdadera es igual a $2\pi + \theta_0$. Ello significa que la línea de las ápsides (desde donde se comienza a medir θ con cada nueva revolución) se va desplazando un valor θ_0 en la misma dirección en que se cuenta θ .

Para obtener el valor de la contante θ_0 es preciso expresar los valores de I , \tilde{e} , \tilde{n} y e_θ en términos de constantes primarias tales como G , m y E .

Obtención de las constantes

El propósito de esta sección es mostrar la relación de algunas de las constantes con las que hemos venido trabajando y cuyas expresiones serán de gran ayuda para mostrar la relación entre la solución de D&D y el caso clásico, así como para identificar constantes tales como θ_0 .

1. El cálculo de a_R

Los valores de A , B y D están dados respectivamente por (18), (19) y (21). Igualmente recordamos que $C_0 = -H^2$. Reemplazando estos valores en (45) tenemos:

$$a_R = -\frac{Gm}{2E} \left[1 + \frac{(7\sigma - 6)E}{c^2} \right] \left[1 + \frac{3(3\sigma - 1)E}{2c^2} \right]^{-1} - \frac{(8 - 3\sigma)Gm}{2c^2}.$$

Al realizar las multiplicaciones correspondientes y ordenar se reduce a

$$a_R = -\frac{Gm}{2E} \left[1 - \frac{(\sigma - 7)E}{2c^2} \right]. \quad (62)$$

2. El cálculo de \tilde{a}

La ecuación (47) permitió definir \tilde{a} . Reemplazando en ésta los valores de (13) y (14) se obtiene

$$\tilde{a} = a_R \left(1 - \frac{Gm(\sigma - 2)}{a_R c^2} \right). \quad (63)$$

3. El cálculo de \tilde{n}

Al reemplazar (18) junto con (19) en (32) tenemos

$$\tilde{n} = \frac{(-2E)^{3/2}}{Gm} \left[1 + \frac{3E}{2c^2}(3\sigma - 1) \right]^{3/2} \left[1 + \frac{(7\sigma - 6)E}{c^2} \right]^{-1},$$

que al realizar los productos indicados se convierte en

$$\tilde{n} = \frac{(-2E)^{3/2}}{Gm} \left[1 - \frac{(\sigma - 15)E}{4c^2} \right]. \quad (64)$$

De la ecuación (62) podemos despejar E para obtener

$$E = -\frac{Gm}{2a_R} \left[1 + \frac{Gm(\sigma - 7)}{4a_R c^2} \right], \quad (65)$$

de la que es fácil llegar a

$$(-2E)^{3/2} = \left(\frac{Gm}{a_R} \right)^{3/2} \left[1 + \frac{3Gm(\sigma - 7)}{8a_R c^2} \right].$$

Reemplazando esta dos últimas ecuaciones en (64):

$$\tilde{n} = \frac{(Gm)^{1/2}}{a_R^{3/2}} \left[1 + \frac{3Gm(\sigma - 7)}{8a_R c^2} \right] \left[1 + \frac{(\sigma - 15)Gm}{8a_R c^2} \right],$$

que se reduce a

$$\tilde{n} = \frac{(Gm)^{1/2}}{a_R^{3/2}} \left[1 + \frac{Gm(\sigma - 9)}{2a_R c^2} \right]. \quad (66)$$

4. El cálculo de \tilde{e}

De la ecuación (28) y de (26) tenemos

$$\tilde{e} = \sqrt{1 + \frac{A}{B^2} \left(C - \frac{BD}{C_0} \right)}. \quad (67)$$

Después de un poco de álgebra es posible llegar a

$$\frac{A}{B^2} = \frac{2E}{G^2m^2} \left[1 + \left(\frac{19}{2}\sigma + \frac{21}{2} \right) \frac{E}{c^2} \right],$$

$$C - \frac{BD}{C_0} = -H^2 - \frac{2(3\sigma - 1)EH^2}{c^2} + \frac{5(\sigma - 2)G^2m^2}{c^2} + \frac{(8 - 3\sigma)G^2m^2}{c^2}. \quad (68)$$

Al reemplazar estas dos últimas ecuaciones en (67) se obtiene:

$$\bar{e} = \left\{ 1 + \frac{2E}{G^2m^2} \left[H^2 \left(1 + \frac{E}{2c^2} (17 - 7\sigma) \right) + \frac{2G^2m^2}{c^2} (1 - \sigma) \right] \right\}^{1/2}. \quad (69)$$

5. El cálculo de e_R

El valor de e_R está dado por (50). Es inmediato verificar que

$$\frac{DA}{2C_0B} = -\frac{(8 - 3\sigma)E}{c^2}.$$

Al reemplazar esta última ecuación al igual que (69) en (50) y realizando los cálculos correspondientes se tiene

$$e_R = \left\{ 1 + \frac{2E}{G^2m^2} \left[H^2 \left(1 + \frac{5E}{2c^2} (\sigma - 3) \right) + \frac{G^2m^2}{c^2} (\sigma - 6) \right] \right\}^{1/2}. \quad (70)$$

Podemos calcular el valor de e_R en términos de \bar{e} . Esto se logra a partir de (50). Reemplazando los valores de A , B y D dados por (18), (19) y (21) respectivamente, que junto con $C_0 = -H^2$ y con ayuda de (65) es fácil llegar a

$$e_R = \left[1 + \frac{Gm}{a_Rc^2} \left(4 - \frac{3}{2}\sigma \right) \right] \bar{e}. \quad (71)$$

6. El cálculo de e_θ

El valor de e_θ está dado por (56). Al reemplazar el valor de \bar{e} dado por (52) en (56):

$$e_\theta = \left(1 + \frac{DA}{C_0B} - \frac{JA}{BI} \right) \bar{e}. \quad (72)$$

El valor de $\frac{DA}{C_0B}$ se halló unas cuantas líneas arriba. De igual forma se tiene:

$$\frac{JA}{BI} = \frac{4E(\sigma - 4)}{c^2}.$$

Entonces, al reemplazar estos valores junto con (69) en (72) tenemos

$$e_\theta = \left\{ 1 + \frac{2E}{G^2m^2} \left[H^2 \left(1 + \frac{E}{2c^2} (\sigma - 15) \right) - \frac{6G^2m^2}{c^2} \right] \right\}^{1/2}. \quad (73)$$

Es igualmente importante encontrar una expresión que relacione e_θ con e_R .

De la ecuación (56) junto con (52) recordando que en esta última J y D son del orden de c^{-2} :

$$e_\theta = 2\bar{e} - \left(1 + \frac{JA}{2BI} - \frac{DA}{2C_0B} \right) \bar{e},$$

y de (51):

$$e_\theta = \left[1 - A \left(\frac{J}{BI} - \frac{D}{2C_0B} \right) \right] e_R. \quad (74)$$

Puesto que

$$\frac{J}{BI} = \frac{2(\sigma - 2)}{c^2}, \quad \frac{D}{2C_0B} = -\frac{(8 - 3\sigma)}{2c^2},$$

se tendrá entonces

$$A \left(\frac{J}{BI} - \frac{D}{2C_0B} \right) = \frac{E\sigma}{c^2},$$

y de (65) finalmente llegamos a

$$e_\theta = \left(1 + \frac{Gm\sigma}{2a_Rc^2} \right) e_R. \quad (75)$$

7. El cálculo de H

De la ecuación (70) se desprende

$$1 - e_R^2 = -\frac{2E}{G^2m^2} \left[H^2 \left(1 + \frac{5E}{2c^2} (\sigma - 3) \right) + \frac{G^2m^2}{c^2} (\sigma - 6) \right],$$

que al reemplazar E con ayuda de (65) y despejar H se convierte en:

$$H = [Gma_R(1 - e_R^2)]^{1/2} \left[1 + \frac{Gm}{2a_Rc^2(1 - e_R^2)} (4 + 2e_R^2 - \sigma e_R^2) \right]. \quad (76)$$

8. El cálculo de K_θ

Ya estamos en posición de calcular K_θ de acuerdo con la ecuación (59).

De las ecuaciones (13), (63) y (64) se determina

$$\frac{I}{\tilde{n}a^2} = \frac{H}{\sqrt{Gma_R}} \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} \left[(3\sigma - 1)E + \frac{Gm}{2a_R}(3\sigma + 1) \right] \right\}. \tag{77}$$

Igualmente, de la ecuación (73) es fácil llegar a

$$1 - e_\theta^2 = -\frac{2E}{G^2m^2} \left[H^2 \left(1 + \frac{E}{2c^2}(\sigma - 15) \right) - \frac{6G^2m^2}{c^2} \right],$$

la cual, al reemplazar E dado por (65) y tomando la raíz cuadrada e invirtiendo da:

$$\frac{1}{\sqrt{(1 - e_\theta)}} = \frac{\sqrt{Gma_R}}{H} \left[1 + \frac{2Gm}{c^2} \left(\frac{1}{a_R} - \frac{3Gm}{H^2} \right) \right]^{-1/2}. \tag{78}$$

De esta última ecuación se puede despejar H^2 para obtener:

$$H^2 = Gm \left\{ a_R(1 - e_\theta^2) - \frac{2Gm}{c^2} [a_R(1 - e_\theta^2) - 3] \right\}. \tag{79}$$

Al calcular K_θ a partir de la primera de las (59) con (77) y (78) tenemos:

$$K_\theta = 1 + \frac{3G^2m^2}{c^2H^2},$$

y reemplazando en esta última la ecuación (79) se tiene

$$K_\theta = 1 + \frac{3Gm}{a_R(1 - e_\theta^2)c^2}. \tag{80}$$

Llamando:

$$\kappa = \frac{3Gm}{a_R(1 - e_\theta^2)c^2}, \tag{81}$$

podemos escribir

$$K_\theta = 1 + \kappa. \tag{82}$$

9. El cálculo de θ_0

Primero que todo debe advertirse que, a diferencia del movimiento elíptico clásico, en la solución de D&D, al ser la anomalía excéntrica u igual a cero el valor de la anomalía verdadera θ no es nulo: es igual a θ_0 , lo cual es aparente si se observan las ecuaciones (59) y (61). Al ser $u = 2\pi$ y en general cualquier múltiplo par entero de π , el valor de K_θ se anula. Pero, al comparar esta ecuación postnewtoniana con la ecuación clásica, se deduce que el valor de θ_0 debe ser un valor pequeño, del orden de c^{-2} . Por lo tanto, una manera de hallar θ_0 es estudiando el comportamiento de (61) para valores muy cercanos a $2n\pi$ con $n = 0, 1, 2, \dots$.

Supóngase que se tiene un valor de u lo suficientemente cercano a $2n\pi$ como para que $(1 + e_\theta)^{1/2}(1 -$

$e_\theta)^{-1/2} \tan(u/2)$ sea muy cercano a cero pero no igual a cero. Con ello podemos deducir que

$$(A_\theta)_{u \approx 2n\pi} \approx 2 \left(\frac{u}{2} \right) \approx u,$$

donde se ha supuesto además que el valor de e_θ es lo suficientemente pequeño como para considerarse despreciable, dentro del orden de la aproximación. Con el fin de obtener θ_0 como un valor positivo vamos a hacer la siguiente consideración. Al completarse casi un período se tendrá que u será muy próximo a 2π , de tal forma que el ángulo se ubicará en el cuarto cuadrante, esto es, $u \approx -2\pi$. Esto se verifica cuando $\theta \approx -2\pi$ por lo que, de (61),

$$-2\pi = \theta_0 - 2K_\theta\pi,$$

esto es

$$\theta_0 = 2\pi(K_\theta - 1). \tag{83}$$

Por lo tanto, de (82),

$$\theta_0 = 2\pi\kappa. \tag{84}$$

Entonces, el valor de la anomalía verdadera, para cada instante de tiempo t , es:

$$\theta = 2\kappa\pi + 2(1 + \kappa) \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{1 + e_\theta}{1 - e_\theta}} \tan \left(\frac{u}{2} \right) \right]. \tag{85}$$

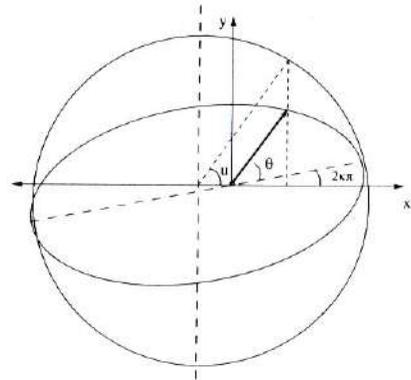


Figura 1: Relación geométrica entre la anomalía verdadera y la excéntrica.

De la definición de κ (ecuación (81)) es evidente que θ_0 es:

$$\theta_0 = \frac{6Gm\pi}{a_R(1 - e_\theta^2)c^2},$$

esto es, el conocido desplazamiento de la línea de las ápsides por cada revolución.

El cálculo de r en función de θ

Es deseable hallar una expresión que dé el radio vector r en función de la anomalía verdadera θ .

La ecuación (61) puede escribirse como

$$A_\theta = \frac{\theta - \theta_0}{K_\theta}. \quad (86)$$

Pero, de la misma definición de A_θ (ecuación (60)), se desprende que

$$\tan\left(\frac{A_\theta}{2}\right) = \sqrt{\frac{1+e_\theta}{1-e_\theta}} \tan\left(\frac{u}{2}\right).$$

Al utilizar las identidades trigonométricas:

$$\tan\left(\frac{A_\theta}{2}\right) = \sqrt{\frac{1-\cos A_\theta}{1+\cos A_\theta}}, \quad \tan\left(\frac{u}{2}\right) = \sqrt{\frac{1-\cos u}{1+\cos u}},$$

es fácil obtener

$$\frac{1-\cos A_\theta}{1+\cos A_\theta} = \left(\frac{1+e_\theta}{1-e_\theta}\right) \left(\frac{1-\cos u}{1+\cos u}\right).$$

Esta última expresión puede deducirse de la siguiente igualdad:

$$1 - e_\theta \cos u = \frac{1 - e_\theta^2}{1 + e_\theta \cos A_\theta}. \quad (87)$$

Ahora bien, de la ecuación (39) podemos escribir

$$\begin{aligned} r &= a_R + \frac{a_R e_R}{e_\theta} - \frac{a_R e_R}{e_\theta} - \frac{a_R e_R e_\theta}{e_\theta} \cos u, \\ &= \frac{e_R}{e_\theta} a_R (1 - e_\theta \cos u) + a_R \left(1 - \frac{e_R}{e_\theta}\right). \end{aligned} \quad (88)$$

Al reemplazar la ecuación (75) junto con (87) en esta última se obtiene

$$r = a_R \left(1 - \frac{Gm\sigma}{2a_R c^2}\right) \left(\frac{1 - e_\theta^2}{1 + e_\theta \cos A_\theta}\right) + \frac{Gm\sigma}{2c^2}. \quad (89)$$

Para nuestros propósitos es adecuado escribir esta ecuación en términos de e_R y con una simbología más apropiada.

De la definición de A_θ dada en (86) y de (83) se desprende

$$A_\theta = \frac{\theta - 2\pi(1 - K_\theta)}{K_\theta},$$

y de (82) se deduce inmediatamente

$$A_\theta = \theta(1 - \kappa) - 2\kappa\pi. \quad (90)$$

Expresando e_θ en función de e_R (ver ecuación (75))

$$r = a_R \left\{ (1 - \Gamma) \left[\frac{1 - (1 + 2\Gamma)e_R^2}{Q} \right] + \Gamma \right\},$$

donde Γ y Δ son:

$$\Gamma = \frac{Gm\sigma}{2a_R c^2}, \quad (91)$$

$$Q = 1 + e_R(1 + \Gamma) \cos[\theta(1 - \kappa) - 2\kappa\pi]. \quad (92)$$

Haciendo las operaciones necesarias y ordenando, tenemos finalmente:

$$r = \frac{a_R(1 - e_R^2)}{Q} \left[1 - \frac{\Gamma(1 + e_R^2 - Q)}{1 - e_R^2} \right] \quad (93)$$

El pericentro ocurre en $u = 0$, esto es, cuando $\theta = 2\kappa\pi$ y el radio vector adquiere un valor igual a $r_p = a_R(1 - e_R)$. El apocentro se presenta cuando $u = \pi$, esto es, cuando $\theta = \pi + 3\kappa\pi$ y el radio vector toma el valor de $r_a = a_R(1 + e_R)$.

Los elementos orbitales postnewtonianos

Las constantes E , \mathbf{H} (esto es H_x , H_y , H_z), t_0 y θ_0 (que está ligada a la existencia del argumento de latitud del pericentro) representan los seis parámetros que, junto con las masas, permiten el cálculo de la posición y velocidad para todo tiempo.

Definimos un sistema de coordenadas cartesiano con origen en el centro de la masa m_1 , y escogemos al plano conformado por los ejes xy como plano fundamental. Esto bien puede representar, por ejemplo, a las coordenadas rectangulares heliocéntricas de un astro en torno del Sol teniendo como plano fundamental a la eclíptica. Supóngase que se conoce para un tiempo t_r las componentes rectangulares tanto de la posición como de la velocidad del cuerpo de masa m_2 en relación con el cuerpo de masa m_1 . Obviamente m_1 y m_2 son conocidas, lo que significa que m y σ también lo son. Por lo tanto, en dicho instante, se conocen el radio vector y la magnitud de la velocidad. Las ecuaciones (8) y (9) permiten, respectivamente, determinar la constante E y la magnitud de la constante H . Ahora bien, puesto que el movimiento está contenido en un plano, es necesario especificar dos ángulos más: la longitud del nodo ascendente, denotada por Ω (el ángulo medido sobre el plano fundamental existente entre el eje x y el punto en que el objeto atraviesa el plano fundamental de sur a norte) y la inclinación del plano orbital i con respecto al plano fundamental.

La relación entre las constantes H_x , H_y y H_z con Ω e i es como sigue.

Al definir un vector unitario perpendicular al plano orbital se obtiene, de la figura 2,

$$\hat{u}_H = \frac{\mathbf{H}}{H} = \sin\Omega \sin i \hat{i} - \cos\Omega \sin i \hat{j} + \cos i \hat{k}, \quad (94)$$

y puesto que

$$\mathbf{H} = H_x \hat{i} + H_y \hat{j} + H_z \hat{k}, \quad (95)$$

se obtiene inmediatamente

$$\begin{aligned} \frac{H_x}{H} &= \sin\Omega \sin i, \\ \frac{H_y}{H} &= -\cos\Omega \sin i, \\ \frac{H_z}{H} &= \cos i, \end{aligned} \quad (96)$$

de las cuales se deduce:

$$\Omega = -\tan^{-1}\left(\frac{H_x}{H_y}\right), \tag{97}$$

$$i = \cos^{-1}\left(\frac{H_z}{\sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}}\right). \tag{98}$$

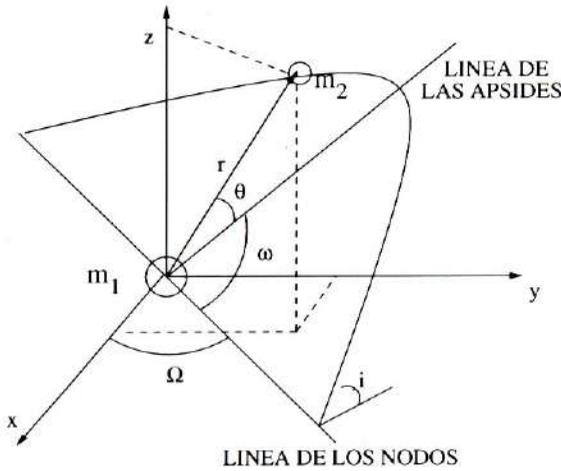


Figura 2: Definición de los elementos Ω , i y ω .

Las componentes H_x , H_y y H_z se pueden calcular utilizando las ecuaciones (7); luego, los valores de Ω e i son calculados inmediatamente.

Habiendo determinado E y H , las constantes A , B , C , D , I y J pueden calcularse inmediatamente. El semieje mayor a_R se puede determinar bien con ayuda de (45) o con (62). Tomaremos como elemento orbital a e_R , el cual se calcula por intermedio de (70). Hecho esto, se halla la anomalía excéntrica u con ayuda de (39). También se puede determinar el valor de la anomalía verdadera θ por intermedio de (85). El valor de \bar{n} se halla con (32). La excentricidad auxiliar \bar{e} puede determinarse con (28). Con lo anterior ya es posible obtener el valor del tiempo del paso por el pericentro t_0 por intermedio de (34), o tal y como se hace en el caso clásico, se puede definir la anomalía media de referencia M_r como elemento orbital en lugar de t_0 , siempre que se especifique un tiempo de referencia t_r :

$$M_r = \bar{n}(t_r - t_0),$$

de tal forma que:

$$M = M_r + \bar{n}(t - t_r).$$

Finalmente, se determina el argumento de latitud del pericentro, esto es, el ángulo existente entre la línea de los nodos y la línea de las apsidales medido sobre el plano orbital. Se puede calcular de la siguiente forma. Un vector unitario \hat{u}_Ω definido sobre el plano de la órbita en la dirección de del nodo ascendente tiene por componentes:

$$\hat{u}_\Omega = \begin{pmatrix} \cos \Omega \\ \text{sen } \Omega \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{99}$$

Puesto que el ángulo existente entre \hat{u}_Ω y el vector unitario en la dirección del radio vector $\hat{u}_r = \mathbf{r}/r$ es el ángulo $\omega + \theta$ tendremos que

$$\hat{u}_\Omega \cdot \hat{u}_r = |\hat{u}_\Omega| |\hat{u}_r| \cos(\omega + \theta).$$

Pero $\hat{u}_r = (x/r, y/r, z/r)$ por lo que

$$\omega = \cos^{-1}\left(\frac{x \cos \Omega + y \text{sen } \Omega}{r}\right) - \theta.$$

Resumiendo, se pueden encontrar seis parámetros independientes que son calculados a partir de las condiciones iniciales, usualmente la posición y la velocidad en un instante determinado, y que llamaremos, en estrecha analogía con el caso clásico, como *elementos orbitales postnewtonianos*, los cuales son: a_R , e_R , i , Ω , ω y t_0 (o M_r).

La diferencia importante entre ambos conjuntos de elementos orbitales, esto es, el de la solución clásica y el de D&D, estriba en la definición del semieje mayor radial a_R y la excentricidad radial e_R (las excentricidades auxiliares \bar{e} y e_θ que entran en las ecuaciones para hallar u y θ son funciones de e_R a través de las ecuaciones (71) y (75)), además de un ligero detalle con el argumento de latitud del pericentro (ver más adelante). El conjunto de elementos orbitales postnewtoniano se reduce al conjunto clásico al tomar $c \rightarrow \infty$: $a_R = a$, $e_R = \bar{e} = e_\theta = e$, $\bar{n} = n$.

El cálculo de la posición y la velocidad

Ya se ha visto cómo se pueden calcular los elementos orbitales postnewtonianos en un instante t_r cualquiera, a partir de componentes rectangulares de la posición y la velocidad. Ahora procedemos a calcular las componentes de la posición y de la velocidad para cualquier otro tiempo t .

Se suponen conocidos los elementos orbitales postnewtonianos — a_R , e_R , i , Ω , ω , t_0 (o M_r) — al igual que el valor de las masas de ambos cuerpos, esto es, conocemos μ y σ .

Con lo visto hasta ahora ya se sabe cómo se pueden determinar los valores del radio vector r y de la anomalía verdadera θ para un tiempo dado t . Obsérvense las ecuaciones (34), (85) y (93) para verificar que la secuencia del cálculo es análoga al caso clásico.

La posición del cuerpo de masa m_2 con respecto a m_1 en relación con el plano orbital está dada por \mathbf{q} :

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} r \cos \theta \\ r \text{sen } \theta \\ 0 \end{pmatrix}$$

Igualmente, las componentes de velocidad vienen dadas por:

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{pmatrix} -r \operatorname{sen} \theta \dot{\theta} + \dot{r} \cos \theta \\ r \cos \theta \dot{\theta} + \dot{r} \operatorname{sen} \theta \\ 0 \end{pmatrix} \quad (100)$$

donde \dot{r} y $\dot{\theta}$ pueden calcularse a partir de (22) y (15). Por otra parte, la ecuación (85) significa, como ya se había comentado, que por cada revolución la línea de las ápsides, esto es, desde donde se mide θ , se está desplazando un ángulo θ_0 en la dirección en que se cuenta θ . De (84) se desprende que la línea de las ápsides se está incrementando un valor $2\kappa\pi$ por cada giro realizado. Como θ y ω (el argumento de latitud del pericentro) están sobre el mismo plano es más conveniente tener en cuenta este corrimiento como un incremento de ω en un valor $2\kappa\pi$ por cada giro completo. Sin embargo, el hecho de que el apocentro suceda cuando $\theta = 3\kappa\pi + \pi$ y no en $2\kappa\pi + \pi$ obliga a que cada vez que se incremente θ en un valor de π se sume $\kappa\pi$.

Entonces el argumento de latitud del pericentro va cambiando con cada nueva revolución de la siguiente forma:

$$\bar{\omega} = \omega + 2\kappa\pi \left[ENT \left(\frac{\bar{n}(t - t_r) + M_r + \pi}{2\pi} \right) \right], \quad (101)$$

donde \bar{n} es el valor definido en (66), t_r es la época de referencia, M_r el valor de la anomalía media en la época de referencia y ENT es la función valor entero. Lo que está en paréntesis cuadrados permite dar cuenta del incremento de θ en $\kappa\pi$ por cada media revolución.

Conocidas las componentes de \mathbf{q} y $\dot{\mathbf{q}}$ definidas sobre el plano de la órbita, el paso siguiente es obtener las componentes de la posición y la velocidad en el sistema de coordenadas que define el plano fundamental. Ello se logra mediante una serie de rotaciones sucesivas de la siguiente forma: ambos vectores son rotados primeramente un ángulo $-\bar{\omega}$ alrededor del eje normal al plano de la órbita; luego otra rotación un ángulo $-i$ alrededor de la línea de los nodos y por último una rotación un ángulo $-\Omega$ alrededor del eje z . Entonces:

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= R_{z(-\Omega)} R_{x(-i)} R_{z(-\bar{\omega})} \mathbf{q}, \\ \dot{\mathbf{r}} &= R_{z(-\Omega)} R_{x(-i)} R_{z(-\bar{\omega})} \dot{\mathbf{q}}. \end{aligned} \quad (102)$$

Llamando $S' = R_{z(-\Omega)} R_{x(-i)} R_{z(-\bar{\omega})}$, donde:

$$\begin{aligned} R_{z(-\alpha)} &= \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\operatorname{sen} \alpha & 0 \\ \operatorname{sen} \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ R_{x(-\alpha)} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\operatorname{sen} \alpha \\ 0 & \operatorname{sen} \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

las componentes de la posición y velocidad están dadas por:

$$\mathbf{r} = S' \mathbf{q}, \quad \dot{\mathbf{r}} = S' \dot{\mathbf{q}}. \quad (103)$$

Explícitamente las componentes cartesianas de la posición son:

$$\begin{aligned} x &= r[\cos(\bar{\omega} + \theta) \cos \Omega - \operatorname{sen}(\bar{\omega} + \theta) \cos i \operatorname{sen} \Omega], \\ y &= r[\cos(\bar{\omega} + \theta) \operatorname{sen} \Omega + \operatorname{sen}(\bar{\omega} + \theta) \cos i \cos \Omega], \\ z &= r[\operatorname{sen}(\bar{\omega} + \theta) \operatorname{sen} i]. \end{aligned} \quad (104)$$

De igual forma, las componentes cartesianas de la velocidad son:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{\dot{r}}{r} x + r\dot{\theta}[-\cos \Omega \operatorname{sen}(\bar{\omega} + \theta) - \operatorname{sen} \Omega \cos i \cos(\Omega + \theta)], \\ \dot{y} &= \frac{\dot{r}}{r} y + r\dot{\theta}[-\operatorname{sen} \Omega \operatorname{sen}(\bar{\omega} + \theta) + \cos \Omega \cos i \cos(\Omega + \theta)], \\ \dot{z} &= \frac{\dot{r}}{r} z + r\dot{\theta}[\operatorname{sen} i \cos(\bar{\omega} + \theta)]. \end{aligned} \quad (105)$$

Un ejemplo

Para determinar el grado de exactitud de la solución de D&D estudiaremos el sistema conformado por el planeta Mercurio alrededor del Sol ignorando la presencia de los demás cuerpos del sistema solar. Tomaremos como componentes cartesianas de la posición y de la velocidad (referidos al plano del ecuador celeste) al siguiente conjunto de valores, válidos para el 28 de junio de 1969 a las 0^h de Tiempo Dinámico Baricéntrico, (Seidelmann, (1992), pág. 304):

$$\begin{aligned} x &= 0.357260212546963715 \text{ U.A.} \\ y &= -0.0915490552856159762 \text{ U.A.} \\ z &= -0.0859810041345356578 \text{ U.A.} \\ \dot{x} &= 0.00336784520455775328 \text{ U.A./día} \\ \dot{y} &= 0.0248893428375858480 \text{ U.A./día} \\ \dot{z} &= 0.0129440715971588809 \text{ U.A./día} \end{aligned}$$

Se ha adoptado como unidad de distancia a la unidad astronómica (U.A.), equivalente a 1.4959787×10^{11} m, y como unidad de tiempo al día solar medio el cual equivale a 86 400 segundos SI. Como es usual en mecánica celeste, se hace:

$$Gm = G(m_1 + m_2) = Gm_1 \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) = k^2 \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right).$$

En las unidades citadas el valor de la constante k , denominada *constante de Gauss*, es:

$$k = 0.01720209895 \frac{\text{U.A.}^{3/2}}{\text{día}}.$$

Para Mercurio, el valor de m_2/m_1 es igual a 1/6 023 600. Los *elementos orbitales postnewtonianos* correspondientes a los valores de las anteriores coordenadas se muestran en el siguiente conjunto de datos:

$$\begin{aligned} a_R &= 0.38709931274830 \text{ U.A.} \\ e_R &= 0.20561661821793 \\ i &= 7.00680530016832 \\ \Omega &= 48.36869109918314 \\ M_r &= 287.77725906209133 \\ \omega &= 29.03698905805728 \end{aligned}$$

donde las variables angulares están dadas en unidades de grados. Para llegar a estos se ha realizado además una rotación de coordenadas alrededor del eje x un ángulo ϵ (la oblicuidad de la eclíptica) con el fin de definir los elementos angulares con respecto al plano de la eclíptica.

A fin de poder analizar el grado de efectividad de la solución D&D se han calculado las componentes cartesianas de la posición y la velocidad de Mercurio a intervalos regulares por 600 días a partir de la fecha de referencia. Los valores así obtenidos con la solución analítica de D&D se han comparado con los resultados de una integración numérica directa de las ecuaciones diferenciales (1). Dicha integración se llevó a cabo con ayuda del integrador Radau, una rutina computacional escrita en FORTRAN, altamente eficiente y optimizada, para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales que se usan en mecánica celeste, ver **Everhart**, (1985).

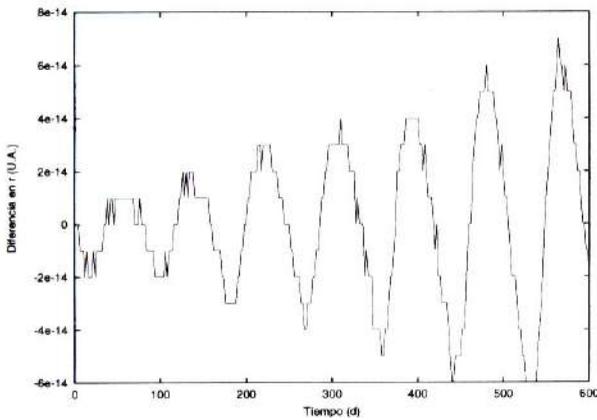


Figura 3: Diferencia entre los radio vectores calculados analítica y numéricamente.

La figura 3 muestra la diferencia entre los valores del radio vector calculados analítica y numéricamente en función del tiempo. Dicha diferencia es del orden de 1×10^{-14} U.A., esto es, del orden de un milímetro. Muestra entonces la gran utilidad que tiene la solución analítica para describir la trayectoria postnewtoniana del planeta Mercurio *comparada* con la integración numérica directa de las ecuaciones diferenciales. El aumento lento de la diferencia conforme avanza el tiempo se debe a los efectos de redondeo que causan una pérdida cada vez más creciente en la exactitud de las últimas cifras significativas característica de las integraciones numéricas.

Por otro lado, la figura 4 muestra la diferencia creciente existente entre el radio vector calculado con el procedimiento de D&D y el calculado con las simples ecuaciones newtonianas (que se logra haciendo en las ecuaciones de D&D a $c \rightarrow \infty$). Desde un inicio se obtienen diferencias del orden de 1×10^{-7} U.A., o sea, unos 15 kilómetros. Si tenemos en cuenta que la línea de las ápsides está precesando es claro que la diferencia tenderá a aumentar con el tiempo.

Es interesante observar el comportamiento de algunos de los elementos orbitales clásicos. Con las componentes de la posición y la velocidad halladas con la solución de D&D para cada instante de tiempo definimos una órbita osculadora clásica, esto es, aplicamos las ecuaciones que permiten el cálculo de los elementos orbitales postnewtonianos y hacemos $c \rightarrow \infty$.

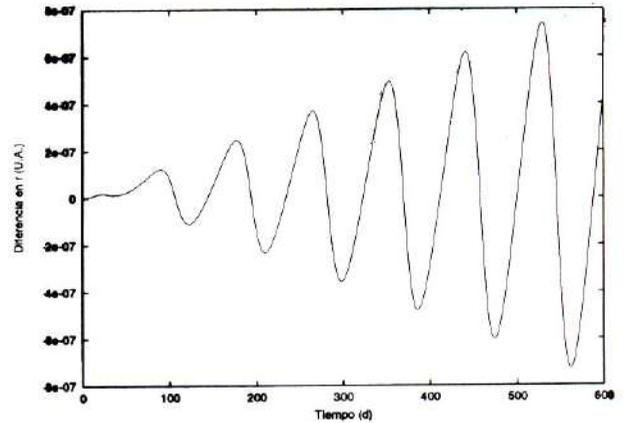


Figura 4: Diferencia entre el radio vector calculado clásicamente y con la solución D&D.

La figura 5 muestra la evolución temporal del semieje mayor a de la órbita del planeta Mercurio. Podemos interpretar este comportamiento diciendo que el semieje mayor oscila alrededor de un valor medio y que la perturbación postnewtoniana no genera cambios seculares en este elemento.

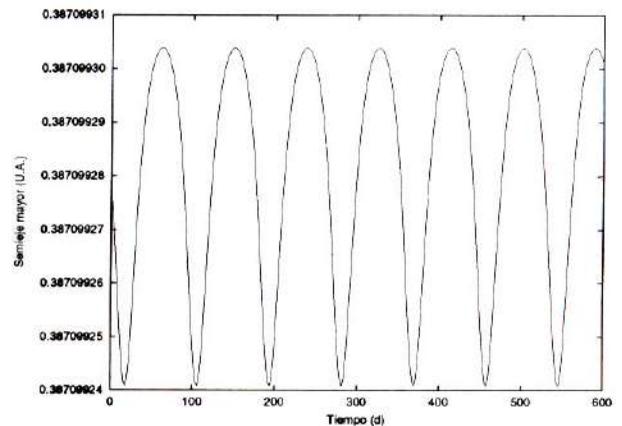


Figura 5: Evolución temporal del semieje mayor clásico de la órbita del planeta Mercurio.

Igual se puede decir del comportamiento de la excentricidad de la órbita de Mercurio que se muestra en la figura 6. El período de oscilación de ambos elementos coincide con el período sideral del planeta que es cercano a los 88 días terrestres.

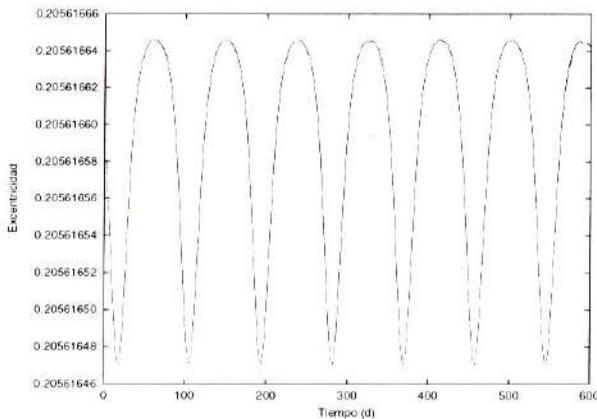


Figura 6: Evolución temporal de la excentricidad clásica en la órbita del planeta Mercurio.

Pero, como es de esperarse, el argumento de latitud del pericentro, que indica el movimiento de la línea de las ápsides, está cambiando secularmente, esto es, está creciendo con el tiempo. Como se trata de un ángulo se dice que está circularizando. En este caso, ver figura 7, el desplazamiento es pequeño y está acompañado por una contribución periódica.

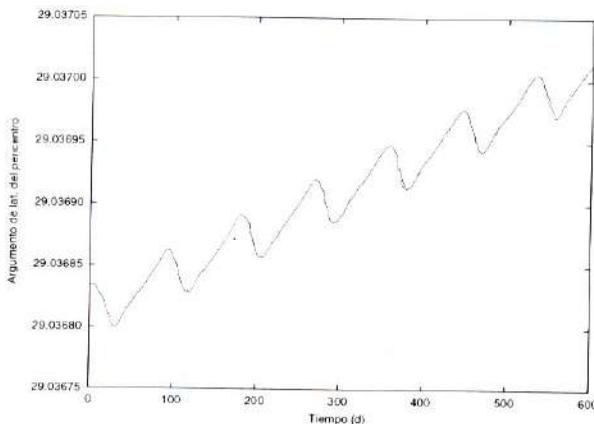


Figura 7: Evolución temporal del argumento de la latitud del pericentro en la órbita del planeta Mercurio.

Conclusiones

Hemos mostrado en detalle la solución propuesta por Damour & Deruelle para la ecuación diferencial del problema de los dos cuerpos postnewtoniano al orden de $1/c^2$. La solución puede verse como una generalización de la clásica solución por coordenadas polares. Las expresiones así obtenidas se reducen a las clásicas ecuaciones al tomar $c \rightarrow \infty$. Las constantes de movimiento se han relacionado con parámetros que hemos llamado “elementos orbitales postnewtonianos”. La diferencia con los elementos

clásicos se reducen a la introducción de una excentricidad radial e_R , un semieje mayor radial a_R y un argumento de latitud del pericentro que se va desplazando a causa de la adición de un término constante cada vez que se completa “media revolución”. El ejemplo con Mercurio alrededor del Sol, ignorando la presencia de los demás planetas, ha mostrado que la solución da cuenta del movimiento del planeta en torno al Sol y de la existencia de la variación periódica del semieje mayor clásico y la excentricidad clásica, así como de la variación secular y periódica en el argumento de latitud del pericentro.

Finalmente, queremos hacer énfasis en que las ecuaciones descritas aquí pueden ser aplicadas únicamente a un sistema aislado conformado por sólo dos masas puntuales y que poseen velocidades “pequeñas” y campos gravitacionales no demasiado intensos. Por puntuales se quiere decir que los cuerpos involucrados se asemejan a partículas, o cuanto menos, que sus dimensiones L son tan pequeñas, comparadas con la distancia r entre ellas, que la relación L/r es completamente despreciable. El modelo no puede describir con precisión el movimiento de ciertos cuerpos astrofísicos con campos gravitacionales muy intensos como pares de estrellas neutrónicas o estrellas masivas, pero sí de un único planeta en órbita alrededor de una estrella como el Sol. Ha sido claro desde un principio que el modelo no incluye la presencia de fuerzas externas como resistencia del medio, presión de radiación, etc.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al profesor Eduardo Brieva por sus útiles comentarios y apropiadas sugerencias.

Bibliografía

- Brouwer, D., Clemence, G. 1961. *Methods of Celestial Mechanics*, Academic Press, New York.
- Brumberg, V. 1991. *Essential Relativistic Celestial Mechanics*. Adam Hilger, Bristol.
- Calura, M., Fortini, P., Montanari, E. 1997. Post-Newtonian Lagrangian Planetary Equations. *Phys. Review D*, **56**:4782-4788.
- Damour, T. 1987. The Problem of Motion in Newtonian and Einstein Gravity, en *Three Hundred Years of Gravitation*, Hawking S. y Israel W. (edi.) Cambridge University Press, Cambridge.
- Damour, T., Deruelle, N. 1985. General Relativistic Celestial Mechanics I. The post-Newtonian Motion. *Ann. Inst. Henri Poincaré*, **43**: 107-132.
- Everhart, E. 1985. An Efficient Integrator that Uses Gauss-Radau Spacings, en *Dynamics of Comets, Their Origin and Evolution*, Carusi and Valsecchi Edi., Reidel Pub. Co., 185-202.
- Haugan, M. 1985. Post-Newtonian Arrival-Time Analysis for a Pulsar in a Binary System. *Ap. J.* **296**: 1-12.

- Lestrade, J. F.** 1981. Perturbations relativistes des orbites planétaires dans la métrique de Schwarzschild généralisée à trois paramètres. Cas de Mercure. *Astron. Astrophys.* **100**: 143-155.
- Portilla J.G.** 2001. Elementos de astronomía de posición, Unibiblos, Bogotá.
- Richardson, D. L., Kelly, T. J.** 1988. Two-Body Motion in the Post-Newtonian Approximation. *Cel. Mech.*, **43**: 193-210.
- Rubincam, D. P.** 1977. General Relativity and Satellite Orbits: the Motion of a Test Particle in the Schwarzschild Metric. *Cel. Mech.* **15**: 21-33.
- Soffel, M. Ruder, H., Schneider, M.** 1987. The Two Body Problem in the (Truncated) PPN-Theory. *Cel. Mech.* **40**: 77-85.
- Soffel, M.** 1989. *Relativity in Astrometry, Celestial Mechanics and Geodesy*, Springer-Verlag, Heidelberg.
- Taylor, J. H., Weisberg, J. M.** 1989. Further Experimental Tests of Relativistic Gravity Using the Binary Pulsar PSR 1913 +16. *Ap. J.* **345**: 434-450.
- Wagoner, R., Will, C.** 1976. Post-Newtonian Gravitational Radiation from Orbiting Point Masses. *Ap. J.* **210**: 764-775.

MODULAR SUMS OF SQUARES

by

Pablo A. Acosta Solarte & Víctor S. Albis¹

Resumen

Pablo A. Acosta Solarte & Víctor S. Albis: Modular sums of squares. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **25**(97): 553-562, 2001. ISSN 0370-3908.

Se calcula el número de soluciones en $[K[X]/(p(X)^r)]^s = L_r^s$ de las ecuaciones $Q_r(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z_r)t_1^2 + \dots + \alpha_s(z_r)t_s^2 = \beta(z_r)$, de coeficientes en L_r y se calcula la correspondiente serie de Poincaré.

Palabras clave: Sumas de cuadrados, series de Poincaré, formas cuadráticas.

Abstract

The number of solutions in $[K[X]/(p(X)^r)]^s = L_r^s$ of equations of the form $Q_r(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z_r)t_1^2 + \dots + \alpha_s(z_r)t_s^2 = \beta(z_r)$, with coefficients in L_r is evaluated. The corresponding Poincaré series are also evaluated.

Key words: Sums of squares, Poincaré series, quadratic forms.

1. Introduction

The aim of this paper is to count the number of solutions of equations of the form $Q_r(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z_r)t_1^2 + \dots + \alpha_s(z_r)t_s^2 = \beta(z_r)$, where $\alpha_i(z_r)$ ($i = 1, \dots, s$), and $\beta(z_r)$ belong to certain finite L -algebras L_r (see *infra*). If each $\alpha_i = 1$, this amounts to count the number of ways an element $\beta(z_r)$ in L_r can be written as a sum of squares in L_r . This is the content of the second section. In the third Section we use

these results to evaluate the Poincaré series (see *infra*) of $Q_r(t_1, \dots, t_s) = \beta(z_r)$.

The results in the second section extend the classical ones for finite fields contained in L. E. Dickson celebrated book [3]. The notations that we will use are those introduced in [1] and [2].

Let thus K be a finite field with q elements, and let $p(X)$ be a monic irreducible polynomial in $K[X]$ of degree m . Then it is known that $K[X]/(p(X)) = L$

¹Departamento de Matemáticas y Estadística, Universidad Nacional de Colombia. Apartado aéreo 95480, Bogotá D. C., Colombia. e-mail: valbis@accefyn.org.co. Parcialmente asupiciado por el Contrato 089-2000 de COLCIENCIAS-UNAB.

is a finite field containing K and such that the dimension of the extension L/K is equal to the degree of the polynomial $p(X)$. Thus L is a field with q^m elements. We will write $\alpha(z_r)$ for the elements of $K[X]/(p(X)^r) = L_r$, $r = 1, 2, \dots$. It is shown in [1] and [2] that $K[X]/(p(X)^r) = L_r$ is a K -algebra with q^{rm} elements and that

$$L_r = \{ \alpha(z_r) = \alpha_0 + \alpha_1 z_r + \dots + \alpha_{r-1} z_r^{r-1} : \alpha_i \in L \},$$

where $z_r^i \neq 0$ if $i = 0, 1, \dots, r-1$ are all different, and $z_r^j = 0$ if $j \geq r$. In fact, $1, z_r, \dots, z_r^{r-1}$ is a basis of the K -álgebra L_r . Its L -dimension is thus r .

If $r \leq v$, the mapping $\pi_{r,v} : L_v \rightarrow L_r$ defined by $\pi_{r,v}(\alpha(z_v)) = \alpha(z_r)$ is a homomorphism of L -algebras.

If $H_v(t_1, \dots, t_s) \in L_v[t_1, \dots, t_s]$ is a polynomial with coefficients in L_v and s indeterminates, then

$$\pi_{r,v}(H_v(t_1, \dots, t_s)) = H_r(t_1, \dots, t_s)$$

is the polynomial in $L_r[t_1, \dots, t_s]$, whose coefficients are the classes modulus $(p(X)^r)$ of the coefficients of $H_v(t_1, \dots, t_s)$.

If $\tau_v \in L_v^s$ is a zero of $H_v(t_1, \dots, t_s)$, and $r \leq v$, we say that τ_v is a *descendant* of τ_r if $\pi_{r,v}(\tau_v) = \tau_r$. In this case we have $H_r(\tau_r) = 0$. We also will say that τ_r is an *ascendant* of τ_v .

A zero $\tau_r \in L_r^s$ of H_r is said to be *regular* (or *non singular*) if

$$\frac{\partial H_1(\pi_{1,r}(\tau_r))}{\partial t_j} = \frac{\partial H_1(\tau_{1,1}, \dots, \tau_{1,s})}{\partial t_j} \neq 0,$$

for some $j = 1, \dots, s$. Otherwise it is said to be *singular*.

Every descendant of a regular zero is regular. Indeed, since

$$\begin{aligned} \pi_{1,n} \left(\pi_{n,m} \left(\frac{\partial H_m(t_1, t_2, \dots, t_s)}{\partial t_j} \right) \right) \\ = \frac{\partial H_1(t_1, t_2, \dots, t_s)}{\partial t_j}, \end{aligned}$$

we see that if τ_n is regular zero and τ_m is a descendant of τ_n , i.e., if $\tau_n = \pi_{n,m}(\tau_m)$ then

$$\begin{aligned} 0 \neq \frac{\partial H_1(\pi_{1,n}(\tau_n))}{\partial t_j} &= \frac{\partial H_1(\pi_{1,n}(\pi_{n,m}(\tau_m)))}{\partial t_j} \\ &= \frac{\partial H_1(\pi_{1,m}(\tau_m))}{\partial t_j}, \end{aligned}$$

for some j .

As in [2], we denote by $c(r, H)$ the number of zeroes of H_r in L_r^s and by $d(r, \tau_1)$ the number of descendants

of τ_1 in L_r^s , where τ_1 is a zero of H_1 en L^s . It is easy to see that

$$c(r, H) = \sum_{\substack{\tau_1 \\ \text{zero of } H_1}} d(r, \tau_1). \tag{1}$$

A form $H_r(t_1, \dots, t_s) \in L_r[t_1, \dots, t_s]$ is said to be an *strongly non-degenerate form* if $(0, \dots, 0) \in L^s$ is the unique singular zero of $H_1(t_1, \dots, t_s)$. In particular, if the characteristic of K is different from 2 and the discriminat disc Q_1 of the quadratic form $Q_1(t_1, \dots, t_s) \in L[t_1, \dots, t_s]$ is not zero, then the quadratic form

$$Q_r(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z_r)t_1^2 + \dots + \alpha_s(z_r)t_s^2 \tag{2}$$

is strongly non-degenerate. In this case, a descendant of $\tau_0 = (0, \dots, 0)$ in L_r^s has the form

$$\tau_r = \left(z_r \sum_{i=1}^{r-1} \tau_{1,i} z_r^{i-1}, \dots, z_r \sum_{i=1}^{r-1} \tau_{s,i} z_r^{i-1} \right),$$

and thus

$$Q_r(\tau_r) = z_r^2 Q_r \left(\sum_{i=1}^{r-1} \tau_{1,i} z_r^{i-1}, \dots, \sum_{i=1}^{r-1} \tau_{s,i} z_r^{i-1} \right). \tag{3}$$

If $r \leq 2$, then (3) is always equal to zero. Therefore $d(2; \tau_0) = q^{ms}$. If $r > 2$, the equation (3) is equal to zero if, and only if,

$$Q_{r-2} \left(\sum_{i=1}^{r-2} \tau_{1,i} z_{r-2}^{i-1}, \dots, \sum_{i=1}^{r-2} \tau_{s,i} z_{r-2}^{i-1} \right) = 0,$$

by virtue of proposition 2.4 of [2]. Consequently,

$$d(r; \tau_0) = c(r-2)q^{2ms}. \tag{4}$$

From now on all the fields considered are supposed to be of characteristic $p \neq 2$.

Let $Q(t_1, \dots, t_s) = a_1 t_1^2 + \dots + a_s t_s^2$ be a quadratic form with coefficients in the finite field \mathbb{F}_q whose characteristic is not 2. We define, for $s = 2m$ or $s = 2m + 1$,

$$\nu(a_1, \dots, a_s) = \nu_Q := \begin{cases} 1 & \text{si } (-1)^m \text{ disc } Q \in \mathbb{F}_q^{\times 2}, \\ -1 & \text{si } (-1)^m \text{ disc } Q \notin \mathbb{F}_q^{\times 2}. \end{cases}$$

We denote by $N(Q, q, b)$ the number of solutions of the equation

$$Q(t_1, \dots, t_s) = a_1 t_1^2 + \dots + a_s t_s^2 = b,$$

($b \in \mathbb{F}_q$) in \mathbb{F}_q^s .

The following results are proved in [3, pp. 46–48]:

Proposition 1.1. Let $Q(t_1, \dots, t_s) = a_1 t_1^2 + \dots + a_s t_s^2$, $s = 2m$, be a quadratic form with $\text{disc } Q \neq 0$. Then

$$N(Q, q, b) = \begin{cases} q^{2m-1} - \nu_Q q^{m-1} & \text{if } b \neq 0, \\ q^{2m-1} + \nu_Q (q^m - q^{m-1}) & \text{if } b = 0. \end{cases}$$

Proposition 1.2. Let $Q(t_1, \dots, t_s) = a_1 t_1^2 + \dots + a_s t_s^2$, $s = 2m + 1$, be a quadratic form with $\text{disc } Q \neq 0$. Then

$$N(Q, q, b) = q^{2m} + \omega(b, a_1, \dots, a_{2m+1}) q^m,$$

where

$$\omega(b, a_1, \dots, a_{2m+1}) = \begin{cases} 1 & \text{if } (-1)^m b \text{disc } Q \in \mathbb{F}_q^{\times 2}, \\ -1 & \text{if } (-1)^m b \text{disc } Q \notin \mathbb{F}_q^{\times 2}, \\ 0 & \text{if } (-1)^m b \text{disc } Q = 0. \end{cases}$$

2. Modular sums of squares

In order to prove the main results in this section we will need the following lemmata.

Lemma 2.1. Let $Q_r(t_1, \dots, t_s) \in L_r[t_1, \dots, t_s]$ be a strongly non-degenerated quadratic form. Then the number of solutions $N_R(r, Q)$ of $Q_r(t_1, \dots, t_s) = 0$ which are descendants of the regular zeroes of Q_1 is given by

$$\left[q^{m(2u-1)} + \nu_{Q_1} (q^{mu} - q^{m(u-1)}) - 1 \right] q^{(r-1)m(s-1)}$$

if $s = 2u$, and by

$$\left[q^{2mu} - 1 \right] q^{(r-1)m(s-1)}$$

if $s = 2u + 1$.

Proof. Let $\tau_1 \in L^s$ be a non-trivial zero of the given quadratic form $Q_1(t_1, \dots, t_s)$. By [2, proposition 2.5, and its proof] this zero always has descendants, and by recurrence we obtain

$$\begin{aligned} d(1, \tau_1) &= 1 \\ d(2, \tau_1) &= d(2-1, \tau_1) q^{m(s-1)} = q^{m(s-1)} \\ &\dots \\ d(r, \tau_1) &= d(r-1, \tau_1) q^{m(s-1)} = \dots = q^{(r-1)m(s-1)}. \end{aligned}$$

Using (1) and propositions 1.1 y 1.2, we see that $N_R(r, Q)$ is given by

$$[c(1, H) - 1] q^{(r-1)m(s-1)} = \left[q^{m(2u-1)} + \nu_{Q_1} (q^{mu} - q^{m(u-1)}) - 1 \right] q^{(r-1)m(s-1)}$$

when $s = 2u$, and by

$$N_R(r, Q) = [c(1, H) - 1] q^{(r-1)m(s-1)} = \left[q^{2mu} - 1 \right] q^{(r-1)m(s-1)}$$

when $s = 2u + 1$. □

Lemma 2.2. Let $Q_r(t_1, \dots, t_s) \in L_r[t_1, \dots, t_s]$ be a strongly non-degenerate quadratic form. Then the number $N_S(r, Q)$ of solutions which descend from $\tau_0 = (0, \dots, 0)$ of $Q_r(t_1, \dots, t_s) = 0$ is given by

$$q^{(r-1)ms} + [c(1, Q) - 1] \frac{q^{(r-2)m(s-1)} - q^{(r-2)ms}}{q^{2m(s-1)} - q^{2ms}} q^{m(s-1)} q^{2ms}$$

if r is even, and by

$$c(1, Q) q^{(r-1)ms} + [c(1, Q) - 1] \times \frac{q^{(r-3)m(s-1)} - q^{(r-3)ms}}{q^{2m(s-1)} - q^{2ms}} q^{2m(s-1)} q^{2ms},$$

if r is odd.

Proof. Accordingly to the results in section 1, the number of descendants of $\tau_0 = (0, \dots, 0)$ is given by

$$\begin{aligned} d(1, \tau_0) &= 1 \\ d(2, \tau_0) &= q^{ms} \\ d(3, \tau_0) &= c(1, Q)q^{2ms} \\ d(4, \tau_0) &= c(2, Q)q^{2ms} = \left(d(2, \tau_0) + [c(1, Q) - 1]q^{m(s-1)} \right) q^{2ms} = q^{3ms} + [c(1, Q) - 1]q^{m(s-1)}q^{2ms} \\ d(5, \tau_0) &= c(3, Q)q^{2ms} = \left(d(3, \tau_0) + [c(1, Q) - 1]q^{2m(s-1)} \right) q^{2ms} = c(1, Q)q^{4ms} + [c(1, Q) - 1]q^{2m(s-1)}q^{2ms} \\ d(6, \tau_0) &= c(4, Q)q^{2ms} = \left(d(4, \tau_0) + [c(1, Q) - 1]q^{3m(s-1)} \right) q^{2ms} = q^{5ms} + [c(1, Q) - 1] \left(q^{3m(s-1)}q^{2ms} + q^{m(s-1)}q^{4ms} \right) \\ d(7, \tau_0) &= c(5, Q)q^{2ms} = \left(d(5, \tau_0) + [c(1, Q) - 1]q^{4m(s-1)} \right) q^{2ms} \\ &= c(1, Q)q^{6ms} + [c(1, Q) - 1] \left(q^{4m(s-1)}q^{2ms} + q^{2m(s-1)}q^{4ms} \right) \\ &\dots \end{aligned}$$

Thus,

$$\begin{aligned} d(r, \tau_0) &= q^{(r-1)ms} + [c(1, Q) - 1] \left(q^{(r-3)m(s-1)}q^{2ms} + q^{(r-5)m(s-1)}q^{4ms} + \dots + q^{3m(s-1)}q^{(r-4)ms} + q^{m(s-1)}q^{(r-2)ms} \right) \\ &= q^{(r-1)ms} + [c(1, Q) - 1] \left(\frac{q^{(r-2)m(s-1)} - q^{(r-2)ms}}{q^{2m(s-1)} - q^{2ms}} q^{m(s-1)}q^{2ms} \right), \end{aligned}$$

if r is even, and

$$\begin{aligned} d(r, \tau_0) &= c(1, Q)q^{(r-1)ms} + [c(1, Q) - 1] \left(q^{(r-3)m(s-1)}q^{2ms} + q^{(r-5)m(s-1)}q^{4ms} \right. \\ &\quad \left. + \dots + q^{4m(s-1)}q^{(r-5)ms} + q^{2m(s-1)}q^{(r-3)ms} \right) \\ &= c(1, Q)q^{(r-1)ms} + [c(1, Q) - 1] \left(\frac{q^{(r-3)m(s-1)} - q^{(r-3)ms}}{q^{2m(s-1)} - q^{2ms}} q^{2m(s-1)}q^{2ms} \right), \end{aligned}$$

if r is odd. \square

Proposition 2.1. Let $Q_r(t_1, \dots, t_s) \in L_r[t_1, \dots, t_s]$ be strongly non-degenerate quadratic form. Then the number of solutions $c(r, Q)$ of $Q_r = 0$ is given by

$$c(r, Q) = N_R(r, Q) + N_S(r, Q)$$

Proof. We know that

$$c(r, Q) = \sum_{\substack{\tau_1 \\ \text{zero of } Q_1}} d(r, \tau_1)$$

and since Q_1 has only one singular zero, namely $\tau_0 = (0, \dots, 0)$, then

$$\begin{aligned} c(r, Q) &= d(r, \tau_0) + \sum_{\substack{\tau_1 \neq \tau_0 \\ \text{zero of } Q_1}} d(r, \tau_1) \\ &= N_S(r, Q) + N_R(r, Q). \end{aligned} \quad \square$$

Next, we consider the equation

$$Q_r(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z_r)t_1^2 + \dots + \alpha_s(z_r)t_s^2 = \beta(z_r). \quad (5)$$

Thus in L , we have the equation

$$\alpha_1(z)t_1^2 + \dots + \alpha_s(z)t_s^2 = \beta(z). \quad (6)$$

If $\beta(z) = 0$ we refer to proposition 2.1. So we may, without lost of generality, suppose now that $\beta(z_r) \neq 0$. In this case it is clear that $(0, \dots, 0)$ is not a solution of (6), so all of its solutions are non singular. Using propositions 1.1 and 1.2, the number of solutions of (6) in L^s is given by

$$q^{m(s-1)} - \nu_{Q_1} q^{m(u-1)},$$

if $s = 2u$. Since all of them are non singular, for each one of them the number of its descendants in L_r^s is $q^{m(r-1)(s-1)}$. Therefore (5) has

$$q^{m(r-1)(s-1)} \left(q^{m(2u-1)} - \nu_{Q_1} q^{m(u-1)} \right)$$

solutions. If $s = 2u + 1$, (6) has

$$q^{2mu} + \omega(\beta(z), \alpha_1(z), \dots, \alpha_s(z))q^{mu}$$

solutions, in L^s . Therefore,

$$q^{m(r-1)(s-1)} \left(q^{2mu} + \omega(\beta(z), \alpha_1(z), \dots, \alpha_s(z)) q^{mu} \right)$$

is the number of solutions of (5) in L_r^s . Thus we have proved the following result:

Proposition 2.2. *Let $Q_r(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z_r)t_1^2 + \dots + \alpha_s(z_r)t_s^2$ be a strongly non-degenerate form in $L_r[t_1, \dots, t_s]$. Then the number of solutions of*

$$Q_r(t_1, \dots, t_s) = \beta(z_r), \quad \beta(z) \neq 0,$$

in L_r^s is given by

$$q^{m(r-1)(s-1)} \left(q^{m(2u-1)} - \nu_{Q_1} q^{m(u-1)} \right)$$

if $s = 2u$ and by

$$q^{m(r-1)(s-1)} \left(q^{2mu} + \omega(\beta(z), \alpha_1(z), \dots, \alpha_s(z)) q^{mu} \right)$$

if $s = 2u + 1$. □

Let us suppose now that the quadratic form is not strongly non-degenerate in $L_r[t_1, \dots, t_s]$. This means that if

$$Q_r(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z_r)t_1^2 + \dots + \alpha_s(z_r)t_s^2,$$

is in $L_r[t_1, \dots, t_s]$, then

$$Q_1(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z)t_1^2 + \dots + \alpha_v(z)t_v^2 + 0t_{v+1}^2 + \dots + 0t_s^2,$$

where $v < s$ (assuming the indicated order without loss of generality).

In this case $(0, \dots, 0) \in L^s$ is not the only singular zero of Q_1 , since $(0, \dots, 0) \in L^v$ can be completed in $q^{m(s-v)}$ ways to a singular zero (also the regular zeroes can be completed in a similar way) in L^s . Using (1), and propositions 1.1 and 1.2, and the preceding remarks we conclude that the value of $c(1, Q)$ is given by

$$\left[q^{m(2u-1)} + \nu(\alpha_1, \dots, \alpha_v)(q^{mu} - q^{m(u-1)}) \right] q^{m(s-v)} \tag{7}$$

when $v = 2u$, and

$$q^{2mu} q^{m(s-v)} \tag{8}$$

when $v = 2u + 1$, where we have written α_i instead of $\alpha_i(z)$.

Lemma 2.3. *Let $Q_r(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z_r)t_1^2 + \dots + \alpha_s(z_r)t_s^2 \in L_r[t_1, \dots, t_s]$ be such that $Q_1(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z)t_1^2 + \dots + \alpha_v(z)t_v^2$ in $L[t_1, \dots, t_s]$, with $v < s$. Then $N_R(r, Q)$ is given by*

$$\left[q^{m(2u-1)} + \nu_{Q_1}(q^{mu} - q^{m(u-1)}) - 1 \right] q^{m[(r-1)(s-1)+(s-v)]}$$

if $v = 2u$, and by

$$\left[q^{2mu} - 1 \right] q^{m[(r-1)(s-1)+(s-v)]}$$

if $v = 2u + 1$.

Proof. Let $\tau_1 \in L^s$ be a regular zero of $Q_1(t_1, \dots, t_s)$. By the proof of Lemma 2.1 we have

$$d(r, \tau_1) = d(r-1, \tau_1) q^{m(s-1)} = \dots = q^{(r-1)m(s-1)}.$$

Using (1) we get

$$N_R(r, Q) = [c(1, H) - q^{m(s-v)}] q^{(r-1)m(s-1)} = \left[q^{m(2u-1)} + \nu_{Q_1}(q^{mu} - q^{m(u-1)}) - 1 \right] q^{(r-1)m(s-1)+m(s-v)}$$

when $v = 2u$, and

$$N_R(r, Q) = [c(1, H) - q^{m(s-v)}] q^{(r-1)m(s-1)} = \left[q^{2mu} - 1 \right] q^{(r-1)m(s-1)+m(s-v)}$$

when $v = 2u + 1$. □

Lemma 2.4. *Let $Q_r(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z_r)t_1^2 + \dots + \alpha_s(z_r)t_s^2 \in L_r[t_1, \dots, t_s]$ be such that $Q_1(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z)t_1^2 + \dots + \alpha_v(z)t_v^2$ in $L[t_1, \dots, t_s]$, with $v < s$. Then $N_S(r, Q)$ is given by*

$$q^{m(s-v)} \left\{ q^{\frac{r-2}{2}m(s-v)} q^{(r-1)ms} + [c(1, Q) - q^{m(s-v)}] \times \frac{q^{(r-2)m(s-1)} - q^{\frac{r-2}{2}m(s-v)} q^{(r-2)ms}}{q^{2m(s-1)} - q^{m(s-v)} q^{2ms}} q^{m(s-1)} q^{2ms} \right\},$$

if r is even, and by

$$q^{m(s-v)} \left\{ c(1, Q) q^{\frac{r-3}{2}m(s-v)} q^{(r-1)ms} + [c(1, Q) - q^{m(s-v)}] \times \frac{q^{(r-3)m(s-1)} - q^{\frac{r-3}{2}m(s-v)} q^{(r-3)ms}}{q^{2m(s-1)} - q^{m(s-v)} q^{2ms}} q^{2m(s-1)} q^{2ms} \right\}$$

if r is odd.

Proof. In this case we have $q^{m(s-v)}$ singular zeroes of Q_1 in L^s . Accordingly to the proof of Lemma 2.2, for each singular zero $\tau_0 \in L^s$ of Q_1 , we have

$$d(1, \tau_0) = 1$$

$$d(2, \tau_0) = q^{ms}$$

$$d(3, \tau_0) = c(1, Q) q^{2ms}$$

$$d(4, \tau_0) = c(2, Q) q^{2ms} = \left\{ d(2, \tau_0) q^{m(s-v)} + [c(1, Q) - q^{m(s-v)}] q^{m(s-1)} \right\} q^{2ms} \\ = q^{m(s-v)} q^{3ms} + [c(1, Q) - q^{m(s-v)}] q^{m(s-1)} q^{2ms}$$

$$d(5, \tau_0) = c(3, Q) q^{2ms} = \left\{ d(3, \tau_0) q^{m(s-v)} + [c(1, Q) - q^{m(s-v)}] q^{2m(s-1)} \right\} q^{2ms} \\ = c(1, Q) q^{m(s-v)} q^{4ms} + [c(1, Q) - q^{m(s-v)}] q^{2m(s-1)} q^{2ms}$$

$$d(6, \tau_0) = q^{2m(s-v)} q^{5ms} + [c(1, Q) - q^{m(s-v)}] \left\{ q^{3m(s-1)} q^{2ms} + q^{m(s-1)} q^{m(s-v)} q^{4ms} \right\}$$

$$d(7, \tau_0) = c(1, Q) q^{2m(s-v)} q^{6ms} + [c(1, Q) - q^{m(s-v)}] \left\{ q^{4m(s-1)} q^{2ms} + q^{2m(s-1)} q^{m(s-v)} q^{4ms} \right\}$$

...

Therefore,

$$d(r, \tau_0) = q^{\frac{r-2}{2}m(s-v)} q^{(r-1)ms} + [c(1, Q) - q^{m(s-v)}] \left\{ q^{(r-3)m(s-1)} q^{2ms} + q^{(r-5)m(s-1)} q^{m(s-v)} q^{4ms} + \dots \right. \\ \left. + q^{3m(s-1)} q^{\frac{r-6}{2}m(s-v)} q^{(r-4)ms} + q^{m(s-1)} q^{\frac{r-4}{2}m(s-v)} q^{(r-2)ms} \right\} \\ = q^{\frac{r-2}{2}m(s-v)} q^{(r-1)ms} + [c(1, Q) - q^{m(s-v)}] \left\{ \frac{q^{(r-2)m(s-1)} - q^{\frac{r-2}{2}m(s-v)} q^{(r-2)ms}}{q^{2m(s-1)} - q^{m(s-v)} q^{2ms}} q^{m(s-1)} q^{2ms} \right\},$$

if r is even, and

$$d(r, \tau_0) = c(1, Q) q^{\frac{r-3}{2}m(s-v)} q^{(r-1)ms} + [c(1, Q) - q^{m(s-v)}] \left\{ q^{(r-3)m(s-1)} q^{2ms} + q^{(r-5)m(s-1)} q^{m(s-v)} q^{4ms} + \dots \right. \\ \left. + q^{4m(s-1)} q^{\frac{r-7}{2}m(s-v)} q^{(r-5)ms} + q^{2m(s-1)} q^{\frac{r-5}{2}m(s-v)} q^{(r-5)ms} \right\} \\ = c(1, Q) q^{\frac{r-3}{2}m(s-v)} q^{(r-1)ms} + [c(1, Q) - q^{m(s-v)}] \left\{ \frac{q^{(r-3)m(s-1)} - q^{\frac{r-3}{2}m(s-v)} q^{(r-3)ms}}{q^{2m(s-1)} - q^{m(s-v)} q^{2ms}} q^{2m(s-1)} q^{2ms} \right\},$$

if r is odd. Consequently, $N_S(r, Q)$ equals

$$q^{m(s-v)} \left\{ q^{\frac{r-2}{2}m(s-v)} q^{(r-1)ms} + [c(1, Q) - q^{m(s-v)}] \times \left\{ \frac{q^{(r-2)m(s-1)} - q^{\frac{r-2}{2}m(s-v)} q^{(r-2)ms}}{q^{2m(s-1)} - q^{m(s-v)} q^{2ms}} q^{m(s-1)} q^{2ms} \right\} \right\},$$

when r is even, and it equals

$$q^{m(s-v)} \left\{ c(1, Q) q^{\frac{r-3}{2}m(s-v)} q^{(r-1)ms} + [c(1, Q) - q^{m(s-v)}] \times \left\{ \frac{q^{(r-3)m(s-1)} - q^{\frac{r-3}{2}m(s-v)} q^{(r-3)ms}}{q^{2m(s-1)} - q^{m(s-v)} q^{2ms}} q^{2m(s-1)} q^{2ms} \right\} \right\}$$

when r is odd. □

Proposition 2.3. *Let $Q_r(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z_r)t_1^2 + \dots + \alpha_s(z_r)t_s^2$ en $L_r[t_1, \dots, t_s]$ be such that $Q_1(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z)t_1^2 + \dots + \alpha_v(z)t_v^2 \in L[t_1, \dots, t_s]$, for $v < s$, then the number of zeroes $c(r, Q)$ is given by*

$$c(r, Q) = N_R(r, Q) + N_S(r, Q) .$$

Proof. It is immediate. □

Let us find now the number of solutions of the equation

$$Q_r(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z_r)t_1^2 + \dots + \alpha_s(z_r)t_s^2 = \beta(z_r), \quad (9)$$

where $\beta(z_r) \in L_r$ is different from zero. In L we have the equation

$$Q_1(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z)t_1^2 + \dots + \alpha_v(z)t_v^2 = \beta(z) , \quad (10)$$

for $v < s$ and $\beta(z) \neq 0$. If $\beta(z) = 0$ we are in the situation of the preceding proposition. Thus, if $\beta \neq 0$ it is now clear that $(0, \dots, 0)$ is not a solution of (10). That means that all the zeroes of (10) are regular. The number of solutions of (10) in L^s accordingly to Proposition 1.1 is

$$\left[q^{m(2u-1)} - \nu_{Q_1} q^{m(u-1)} \right] q^{m(s-v)}$$

if $v = 2u$, and

$$\left[q^{2mu} + \omega(\beta(z), \alpha_1, \dots, \alpha_v) q^{mu} \right] q^{m(s-v)} ,$$

if $v = 2u + 1$. Since all of them are regular, the number of descendants of each of these solutions in L_r^s is $q^{m(r-1)(s-1)}$. Therefore, in L_r^s , (9) has

$$\left[q^{m(2u-1)} - \nu_{Q_1} q^{m(u-1)} \right] q^{m(s-v)+m(r-1)(s-1)}$$

if $v = 2u$, and

$$\left[q^{2mu} + \omega(\beta(z), \alpha_1, \dots, \alpha_v) q^{mu} \right] q^{m(s-v)+m(r-1)(s-1)}$$

in $v = 2u + 1$ solutions.

Proposition 2.4. *Let $Q_r(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z_r)t_1^2 + \dots + \alpha_s(z_r)t_s^2$ be a quadratic form in $L_r[t_1, \dots, t_s]$ such that $Q_1(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z)t_1^2 + \dots + \alpha_v(z)t_v^2$, with $v < s$. Then the number of solutions of*

$$Q_r(t_1, \dots, t_s) = \beta(z_r), \quad \beta(z) \neq 0 ,$$

in L_r^s is given by

$$\left[q^{m(2u-1)} - \nu_{Q_1} q^{m(u-1)} \right] q^{m(s-v)+m(r-1)(s-1)}$$

if $v = 2u$, and by

$$\left[q^{2mu} + \omega(\beta(z), \alpha_1, \dots, \alpha_v) q^{mu} \right] q^{m(s-v)+m(r-1)(s-1)}$$

if $v = 2u + 1$. □

3. Poincaré series

Let $L[[Z]]$ be the algebra of formal power series $\lambda_0 + \lambda_1 Z + \lambda_2 Z^2 + \dots$, where $\lambda_j \in L$. Let $H = H(t_1, \dots, t_s) \in L[[Z]][t_1, \dots, t_s]$ and consider the following formal power series

$$P(H, U) = \sum_{j=0}^{\infty} c(j, H) U^j \in \mathbb{Z}[[U]], \quad (11)$$

where $c(0, H) = 1$. This series is called the *Poincaré series* of the polynomial H . A conjecture of Borevich & Shafarevich says that (11) is a rational function of U . Our purpose in this section is to compute the Poincaré series of a quadratic form and verify the correctness of this conjecture in this particular case.

Using (1) we obtain for (11) the following expression:

$$\begin{aligned} P(H, U) &= c(0, H) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{\tau_1 \text{ zero of } H_1} d(j, \tau_1) U^j \\ &= 1 + \sum_{\tau_1 \text{ zero of } H_1} \sum_{j=1}^{\infty} d(j, \tau_1) U^j . \end{aligned}$$

The series $\sum_{j=1}^{\infty} d(j, \tau_1) U^j$ is called the *contribution of the zero τ_1* to the Poincaré series of H . Thus, if we prove that each one of these contributions is rational function of U , the corresponding Poincaré series will be a rational function. Let us take, thus, the quadratic form

$$Q(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(Z)t_1^2 + \dots + \alpha_s(Z)t_s^2$$

en $L[[Z]][t_1, \dots, t_s]$.

Let us define

$$\pi_r(\alpha_j(Z)) = \lambda_0 + \lambda_1 z_r + \dots + \lambda_{r-1} z_r^{r-1} = \alpha_j(z_r)$$

where $\alpha_j(Z) = \lambda_0 + \lambda_1 Z + \dots + \lambda_k Z^k + \dots$, and z_r is the equivalence class of $p(X)$ modulus $(p(X))^r$. So $\alpha_j(z_r)$ is the equivalence class of $\alpha_j(Z)$, modulus (Z^r) , the ideal generated by Z^r , which in our notation is the equivalence class modulus $(p(X))^r$. Actually, $L[[Z]] = \text{projlim } L_r$ (The details may be found in [1, chapter III]). Also, we are able also to compute the number of zeroes $Q_1(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z)t_1^2 + \dots + \alpha_s(z)t_s^2$, where $\alpha_j(z)$ is the equivalence class modulus $p(X)$ of $\alpha_j(Z)$ (or what amounts to the same thing, $\pi_1(\alpha_j(Z))$).

Let $\tau_1 \in L^s$ be a non singular zero of Q_1 and let $\tau_0 = (0, \dots, 0) \in L^s$ be the unique singular zero of Q_1 . Using the results of the foregoing section, we get

$$d(2, \tau_0) = d(2 - 1, \tau_0)q^{ms} = q^{ms}$$

$$d(r, \tau_0) = c(r - 2, Q)q^{2ms} ,$$

if $r > 2$. And

$$d(r, \tau_1) = d(r - 1, \tau_1)q^{m(s-1)} = \dots = q^{m(r-1)(s-1)}$$

if $r \geq 1$.

Consequently, the contribution of any non singular zero τ_1 of Q_1 is given by

$$U + q^{m(s-1)}U^2 + q^{2m(s-1)}U^3 + \dots + q^{(r-1)m(s-1)}U^r + \dots = \frac{U}{1 - q^{m(s-1)}U}.$$

The contribution of τ_0 is

$$U + q^{ms}U^2 + \sum_{r=3}^{\infty} c(r - 2, Q)q^{2ms}U^r = U + q^{ms}U^2 + q^{2ms}U^2 \sum_{r=3}^{\infty} c(r - 2, Q)U^{r-2}$$

$$= U + q^{ms}U^2 + q^{2ms}U^2 \sum_{k=1}^{\infty} c(k, Q)U^k = U + q^{ms}U^2 + q^{2ms}U^2 [P(U, Q) - 1] .$$

In this case

$$P(U, Q) = 1 + \sum_{\tau_1 \text{ zero of } Q_1} \sum_{r=1}^{\infty} d(r, \tau_1) = 1 + \sum_{r=1}^{\infty} d(r, \tau_0) + \sum_{\substack{\tau_1 \text{ regular} \\ \text{zero of } Q_1}} \sum_{r=1}^{\infty} d(r, \tau_1)$$

$$= 1 + U + q^{ms}U^2 + q^{2ms}U^2 [P(U, Q) - 1] + \frac{(c(1, Q) - 1)U}{1 - q^{m(s-1)}U} .$$

This last equality implies that

$$[P(U, Q) - 1][1 - q^{2ms}U^2] = U + q^{ms}U^2 + \frac{(c(1, Q) - 1)U}{1 - q^{m(s-1)}U} ;$$

therefore,

$$P(U, Q) = 1 + \frac{U + q^{ms}U^2 + \frac{(c(1, Q) - 1)U}{1 - q^{m(s-1)}U}}{1 - q^{2ms}U^2} = 1 + \frac{U[(1 + q^{ms}U)(1 - q^{m(s-1)}U) + c(1, Q) - 1]}{(1 - q^{2ms}U^2)(1 - q^{m(s-1)}U)} .$$

Using the propositions 1.1 and 1.2 we see that $c(1, Q)$ equals

$$q^{m(2u-1)} + \nu_{Q_1}(q^{mu} - q^{m(u-1)})$$

when $s = 2u$ and it equals q^{2mu} when $s = 2u + 1$. We conclude thus that

$$P(U, Q) = 1 + U \left\{ (1 + q^{ms}U)(1 - q^{m(s-1)}U) + q^{m(2u-1)} + \nu_{Q_1}(q^{mu} - q^{m(u-1)}) - 1 \right\} \frac{1}{(1 - q^{2ms}U^2)(1 - q^{m(s-1)}U)}$$

if $s = 2u$, and

$$P(U, Q) = 1 + \frac{U[(1 + q^{ms}U)(1 - q^{m(s-1)}U) + (q^{2mu} - 1)]}{(1 - q^{2ms}U^2)(1 - q^{m(s-1)}U)}$$

if $s = 2u + 1$. Using these results we can now verify that the Poincaré series of a diagonal quadratic form Q such that $\text{disc } Q_1 \neq 0$, is a rational function. More precisely,

Proposition 3.1. *Let $Q(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(Z)t_1^2 + \dots + \alpha_s(Z)t_s^2$ be a non singular quadratic form in $L[[Z]][t_1, \dots, t_s]$, such that $\text{disc } Q_1 \neq 0$. Then its Poincaré series $P(U, Q)$ is given by*

$$1 + U \left\{ (1 + q^{ms}U)(1 - q^{m(s-1)}U) + q^{m(2u-1)} + \nu_{Q_1}(q^{mu} - q^{m(u-1)}) - 1 \right\} \frac{1}{(1 - q^{2ms}U^2)(1 - q^{m(s-1)}U)}$$

when $s = 2u$, and by

$$1 + \frac{U \left[(1 + q^{ms}U)(1 - q^{m(s-1)}U) + (q^{2mu} - 1) \right]}{(1 - q^{2ms}U^2)(1 - q^{m(s-1)}U)}$$

when $s = 2u + 1$. □

Next we find the Poincaré series of a quadratic form $Q(t_1, \dots, t_s) \in L[[Z]][t_1, \dots, t_s]$ for which $\text{disc } Q_1 = 0$.

Proposition 3.2. *Let $Q(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(Z)t_1^2 + \dots + \alpha_s(Z)t_s^2$ be a quadratic form in $L[[Z]][t_1, \dots, t_s]$, such that $Q_1(t_1, \dots, t_s) = \alpha_1(z)t_1^2 + \dots + \alpha_v(z)t_v^2$, with $v < r$. Then the Poincaré series of Q is given by*

$$1 + q^{m(s-v)}U \left\{ (1 + q^{ms}U)(1 - q^{m(s-1)}U) + q^{m(2u-1)} + \nu_{Q_1}(q^{mu} - q^{m(u-1)}) - 1 \right\} \times \frac{1}{(1 - q^{2ms}q^{m(s-v)}U^2)(1 - q^{m(s-1)}U)}$$

if $v = 2u$, and by

$$1 + \frac{q^{m(s-v)}U \left[(1 + q^{ms}U)(1 - q^{m(s-1)}U) + (q^{2mu} - 1) \right]}{(1 - q^{2ms}q^{m(s-v)}U^2)(1 - q^{m(s-1)}U)}$$

if $v = 2u + 1$.

Proof. Let $\tau_1 \in L^s$ be a non singular zero of Q_1 and let $\tau_0 \in L^s$ be a singular one. Using the proof of Proposition 3.1 we see that the contribution of any non singular zero τ_1 of Q_1 is

$$U + q^{m(s-1)}U^2 + q^{2m(s-1)}U^3 + \dots + q^{(r-1)m(s-1)}U^r + \dots = \frac{U}{1 - q^{m(s-1)}U}.$$

The contribution of each τ_0 is

$$U + q^{ms}U^2 + q^{2ms}U^2 [P(U, Q) - 1].$$

Then $P(U, Q)$ is given by

$$\begin{aligned} 1 + \sum_{\substack{\tau_1 \\ \text{zero of } Q_1}} \sum_{r=1}^{\infty} d(r, \tau_1) &= 1 + \sum_{\substack{\tau_0 \text{ singular} \\ \text{zero of } Q_1}} \sum_{r=1}^{\infty} d(r, \tau_0) + \sum_{\substack{\tau_1 \text{ regular} \\ \text{zero of } Q_1}} \sum_{r=1}^{\infty} d(r, \tau_1) \\ &= 1 + [U + q^{ms}U^2] q^{m(s-v)} + q^{2ms}q^{m(s-v)}U^2 [P(U, Q) - 1] + \frac{(c(1, Q) - q^{m(s-v)})U}{1 - q^{m(s-1)}U}. \end{aligned}$$

This last equality implies that

$$[P(U, Q) - 1] [1 - q^{2ms}q^{m(s-v)}U^2] = [U + q^{ms}U^2] q^{m(s-v)} + \frac{(c(1, Q) - q^{m(s-v)})U}{1 - q^{m(s-1)}U};$$

Therefore, $P(U, Q)$ equals

$$1 + \frac{U \left[(1 + q^{ms}U)q^{m(s-v)}(1 - q^{m(s-1)}U) + c(1, Q) - q^{m(s-v)} \right]}{(1 - q^{2ms}q^{m(s-v)}U^2)(1 - q^{m(s-1)}U)}.$$

We know that

$$c(1, Q) = [q^{m(2u-1)} + \nu_{Q_1}(q^{mu} - q^{m(u-1)})] q^{m(s-v)}$$

when $v = 2u$, and

$$c(1, Q) = q^{2mu} q^{m(s-v)}$$

when $v = 2u + 1$. We conclude that $P(Q, U)$ is equal to

$$1 + q^{m(s-v)} U \left\{ (1 + q^{ms} U)(1 - q^{m(s-1)} U) + q^{m(2u-1)} + \nu_{Q_1} (q^{mu} - q^{m(u-1)}) - 1 \right\} \frac{1}{(1 - q^{2ms} q^{m(s-v)} U^2)(1 - q^{m(s-1)} U)}$$

for $v = 2u$, and equals

$$1 + \frac{q^{m(s-v)} U \left[(1 + q^{ms} U)(1 - q^{m(s-1)} U) + (q^{2mu} - 1) \right]}{(1 - q^{2ms} q^{m(s-v)} U^2)(1 - q^{m(s-1)} U)}$$

for $v = 2u + 1$. Using these facts we now can verify that the Poincaré series of a diagonal quadratic form Q , with coefficients in $L[[Z]]$ is a rational function. \square

References

[1] **Albis, V. S.** *Lecciones sobre la aritmética de polinomios*, policopiado. Departamento de Matemáticas y Estadística, Universidad Nacional de Colombia: Bogotá, 1999.

[2] **Albis, V. S. & Chaparro, R.** *On a conjecture of Borevich and Shafarevich*, *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **21** (1997), 313–319. [MR: 98g:11130].

[3] **Dickson, L. E.** *Linear Groups with an Exposition of the Galois Field Theory*. Dover Publi.: New York, 1958.

INFLUENCIA DE LA CANTIDAD DE ÓXIDO DE TITANIO SOBRE LA TEXTURA Y ESTRUCTURA DE SOPORTES DE SILICA PARA LA FABRICACIÓN DE CATALIZADORES PARA LA POLIMERIZACIÓN DE OLEFINAS

por

Rodolfo Alejandro Castillo Córdoba¹

Resumen

Castillo Córdoba, Rodolfo A.: Influencia de la cantidad de óxido de titanio sobre la textura y estructura de soportes de sílica para la fabricación de catalizadores para la polimerización de olefinas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **25**(97): 563-568, 2001. ISSN 0370-3908.

Muestras obtenidas por injerto de diferentes cantidades de óxido de titanio sobre sílice usando isopropóxido de titanio IV en alcohol isopropílico fueron estudiadas usando SBET, volumen de poro del soporte, XRD, ESCA, DRS y mediciones de potencial zeta. Por debajo de una composición de 15% en peso de TiO_2 se observó muy buena dispersión del óxido sobre la sílice aproximándose a una mono capa atómica. Se observó una fuerte interacción entre los óxidos mediante la formación de puentes de Ti-O-Si. La intensidad de esta interacción incrementa con la temperatura, pero puede llegar a sinterizarse.

Abstract

Samples obtained by grafting of various amounts of titania over silica using titanium IV isopropoxide in isopropyl alcohol were studied using SBET, pore volume, XRD, ESCA, DRS, and zeta potential measurements. Very good dispersion of TiO_2 over silica approaching monolayer dispersion was observed for TiO_2 content lower than about 15 wt%. At higher TiO_2 content, TiO_2 crystallites were formed. A strong oxide-oxide interaction with the formation of the Ti-O-Si bond was observed. For a part of TiO_2 , the intensity of this interaction increases with the calcination temperature, but for other parts, formed crystallites.

1. Introducción

El óxido de titanio soportado sobre sílica presenta gran interés como soporte catalítico y como catalizador (1-8), Castillo *et al.* (1) desarrollaron el método de preparación expuesto en este trabajo obteniendo excelentes resultados en la dispersión del TiO_2 sobre la sílice. Reichmann y Bell (2) estudiaron los factores que influenciar la estructura de fase del óxido de titanio soportado y concluyeron que la estructura final obteni-

da depende de los compuestos intermedios formados durante la impregnación del soporte. Fernández *et al.* (3). Observaron que una alta dispersión del óxido de titanio se puede obtener mediante la reacción del alcóxido de titanio IV con la superficie del soporte y subsecuente calcinación. Muñoz *et al.* (4) encontraron que la impregnación del soporte con isopropóxido de titanio IV utilizando como medio hexano permite obtener un soporte con una alta dispersión de titanio. Wauthoz. *et al.* (5) mostraron que la impregnación de la sílice con n-propóxido de Ti IV produce aglomerados de TiO_2 en la superficie del soporte y pobre dispersión. De otro lado, este tipo de soporte se utiliza actualmente como catalizador para la descomposición luminosa de VOC (6-7) y tiene aplicación industrial como soporte para la

* Ingeniero Químico, Master Scientiae en Ingeniería Química, Especialista en Catálisis Básica Aplicada. Monómeros Colombo Venezolanos. E-mail: nrcastil@usa.net

polimerización de olefinas con alta estereospecificidad (8).

En una serie de trabajos previos (9,23) se estudiaron diferentes técnicas de deposición del óxido de titanio sobre la sílice utilizando diferentes precursores de titanio y que demostraron que dependiendo de la técnica utilizada se obtienen soportes con morfologías y dispersiones del óxido de titanio diferentes en cada caso. Por ejemplo si se utiliza la técnica de precipitación de $TiCl_4$ sobre el soporte en una solución acuosa de hidróxido de amonio y posterior lavado y calcinación se obtiene una dispersión de TiO_2 en la parte externa del soporte en cristales aglomerados, mientras que si se realiza mediante la técnica de injerto del $TiCl_4$ sobre la sílice se obtiene la mejor dispersión global en el soporte. Finalmente utilizando la técnica de impregnación con isopropóxido de titanio IV se obtiene la mejor dispersión superficial del óxido de titanio sin aglomeraciones en la superficie.

En este artículo se presentan los resultados obtenidos durante la dispersión del TiO_2 sobre la sílice usando la técnica de impregnación con diferentes cantidades de isopropóxido de titanio IV en solución de isopropanol. Se dio un particular interés a la interacción atómica entre el óxido de titanio y la sílice obtenida ya que esta interacción es un factor preponderante durante la polimerización de olefinas (8).

Las muestras obtenidas fueron caracterizadas mediante los siguientes métodos físico-químicos: Área superficial BET, volumen de poro del soporte, difracción de rayos X (XRD), Espectroscopia de fotoelectrones para análisis químico y superficial (ESCA), Espectroscopia de reflectancia ultravioleta visible (DRS) y mediciones de potencial zeta.

2. Preparación del catalizador.

Un soporte comercial de sílice (Grace) con un área superficial BET de $320 \text{ m}^2/\text{g}$ se

utilizó para la impregnación de todas las muestras con óxido de titanio. La sílice fue primero calcinada en aire a 600°C por espacio de 12 horas. El método de impregnación consiste en hacer reaccionar el isopropóxido de titanio IV con la superficie hidroxilada de la sílice. El soporte fue añadido a la solución de alcohol isopropílico como solvente y la cantidad deseada de isopropóxido de titanio IV. Después de agitar durante una hora aproximadamente el solvente fue evaporado en forma continua a 70°C . El sólido resultante fue secado a 120°C por espacio de 12 h y calcinado a 500°C durante 20 horas.

Se prepararon muestras con contenidos de óxido de titanio entre 2.0 y 20.0 % en peso depositado sobre la sílice. Todas las muestras fueron preparadas en una atmósfera seca de nitrógeno y se utilizaron reactivo grado analítico. Una parte de las muestras se calcinó a 815°C por espacio de 8 horas.

Para efectos comparativos se preparó una muestra por medio de una mezcla mecánica entre un óxido de TiO_2 grado analítico con una superficie BET de $55.4 \text{ m}^2/\text{g}$ y la sílice (SiO_2).

3. Caracterización de las muestras.

3.1 *Superficie específica BET.* Las mediciones se realizaron utilizando un equipo marca Micromeritics Asap 2000 para trabajar con N_2 líquido a -196°C y usando N_2 como gas de absorción.

3.2 *Espectroscopia de fotoelectrones para análisis químico (ESCA).* Espectros de fotoelectrones de rayos X fueron llevados a cabo en un espectrometro SSI X-probe (SSX-100/206) de Fisons, conectado a una interfase computarizada. Para la producción de rayos X se usó un ánodo de Al como fuente (energía del $AlK\alpha$ de 1486.6 eV), operando a 10 keV y 12 mA . Las muestras fueron comprimidas en pequeñas cápsulas y soportadas en un

carrusel en forma horizontal. La presión dentro de la cámara de análisis se mantuvo alrededor de 3×10^{-7} Pa. Las líneas del C_{1s} , O_{1s} , Si_{2p} , Ti_{2p} fueron medidas y comparadas con las líneas de referencia del C_{1s} (C-C, C-H) de 284.8 eV. La relación atómica Ti/Si fue calculada mediante la relación de intensidades obtenidas en los análisis y corregidas por medio de la ecuación Scofield (11). Las relaciones teóricas Ti/Si fueron calculadas a través del modelo propuesto por Kerkhof y Moulijn (12), la cual describe el comportamiento de un cubrimiento de óxido de titanio ideal en forma de monocapas atómicas.

3.3 *Potencial Zeta.* Las mediciones de potencial Zeta fueron llevadas a cabo en un equipo marca PEN KEM Zeta Meter 500 usando 25 mg de muestra suspendida por medio de ultrasonido y dispersada en 200 ml de una solución con 10^{-3} M de KCL. El ajuste de pH se realizó con soluciones 10^{-3} M de KOH y HCl. Los valores del potencial Zeta fueron obtenidos por medio de mediciones de migración electrofóretica obtenidas mediante el uso de la ecuación de Smoluchowski (15). El punto isoeléctrico (IEP), fue tomado en el momento en el que el pH de la solución hace que la partícula quede con carga cero. El cubrimiento aparente de la muestra fue calculado por medio de la ecuación desarrollada previamente(9).

3.4 *Espectroscopia de reflectancia ultravioleta visible (DRS).* Los análisis de reflectancia fueron llevados a cabo e equipo marca CARY 1756. Los espectros fueron tomados en el rango de 210 a 700 nm usando BaSO4 como referencia.

3.5 *Difracción de rayos X.* La difracción de rayos X fue realizada en un difractor Philips PW 1050 conectado a una computadora.

4. Resultados.

4.1 Resultados BET.

La figura 1 muestra los resultados de la superficie específica BET y el volumen de poro para diferentes muestras de diferentes cantidades de TiO_2 sobre la sílice. Ambos disminuyen cuando el contenido de TiO_2 aumenta. La disminución de área específica es debida a la mayor deposición de TiO_2 . Sin embargo es menos dramática para contenidos de TiO_2 entre 10 y 22% en peso.

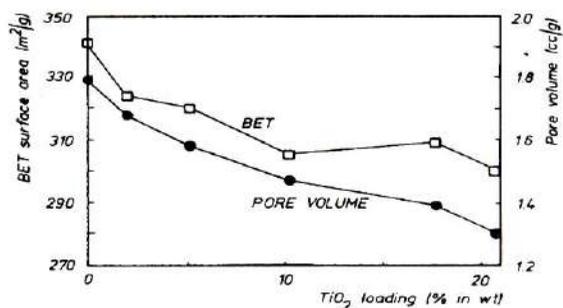


FIG. 1. BET surface area and pore volume as a function of the percentage of TiO_2 loading by weight.

4.2 ESCA

Los resultados del análisis ESCA son presentados en la tabla 1. Para varias composiciones de TiO_2 , las energías de unión son correspondientes con la energía de unión de los átomos de titanio Ti^{4+} (458-459 eV) reportados por Wauthoz *et al.* (5), Raupp and Dumesic (16), Mukhopadhyay and Garofalini (17), and Wei *et al.* (18). De otro lado, en las muestras las energías de unión correspondientes al Ti_{2p} son de 0.8 a 1.9 eV mayores que las encontradas para el óxido puro de TiO_2 (anatasa). Adicionalmente, la energía de unión del titanio disminuye en el sentido del incremento del contenido del TiO_2 . Cuando las muestras con contenidos de 5.2 y 17.8% en peso son sometidas a un proceso adicional de calcinación a 815 °C por 8 h, se observa un incremento en la energía de unión del Ti_{2p} de 0.5 a 0.6 eV.

TABLA 1.
Análisis de ESCA

Sample	% TiO ₂	g Ti / g Si	at Ti/nm ²	I(Ti2p)/I(Si2p)	BE (eV) Ti2p 3/2
	20.9	0.339	5.25	0.0916	458.9
	17.8	0.278	4.34	0.1048	458.8
Calcinada a 815°C	17.8	0.278	4.80	0.0836	459.3
	10.3	0.147	2.55	0.0641	459.3
	5.2	0.072	1.26	0.0370	459.3
Calcinada a 815°C	5.2	0.072	1.41	0.0356	459.9
	2	0.026	0.46	0.0180	459.3
TiO ₂	100	-	-	-	458.0

Las mediciones teóricas de la relación de intensidades $I_{Ti_{2p}}/I_{Si_{2p}}$, se presentan en la Figura 2. Los puntos experimentales para las muestras con contenidos de óxido de titanio menores de 17.8% en peso corresponden con la línea teórica. Para contenidos mayores se encuentran debajo de la línea.

Las Figuras 3 y 4 muestran la línea del espectro del oxígeno O_{1s} para la mezcla mecánica (15% en peso de TiO₂) y para la

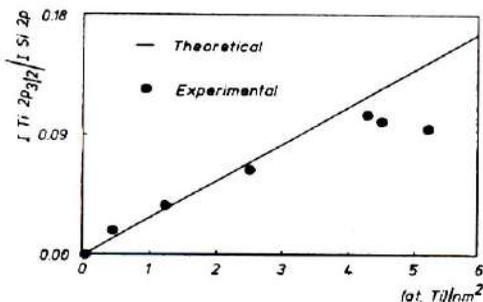


FIG. 2. Calculated and measured XPS intensities. Y-axis is the XPS Ti/Si atomic ratios. X-axis is the number of Ti atoms by the surface area of silica.

muestra con 17.8% en peso de TiO₂ calcinada a 815 °C, respectivamente. La Figura 3 muestra que la diferencia entre las energías de unión del O_{1s} de los dos componentes es de aproximadamente 3.6 eV. El pico más grande corresponde con la posición del oxígeno del SiO₂ puro (532.97 eV), mientras que el pico pequeño (529.36 eV) corresponde con la posición del oxígeno del puente Ti-O del TiO₂ puro. En la figura 4 se pueden observar los dos componentes pero la diferencia entre los

dos picos es de aproximadamente 2.4 eV. El pico más grande a 532.90 eV corresponde a la línea del O_{1s} del puente Si-O del SiO₂ puro, pero el pico más pequeño a 530.53 eV no corresponde con el esperado para el TiO₂ puro. Este cambio de energía puede ser atribuido al puente Ti-O-Si, de acuerdo con los resultados encontrados por Mukhopadhyay and Garofalini (17), y Mohai *et al.* (19).

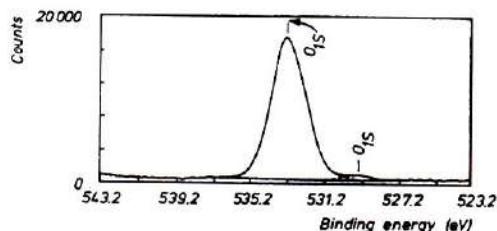


FIG. 3. O_{1s} photoelectron peak from TiO₂ + SiO₂ mechanical mixture with 15 wt% TiO₂.

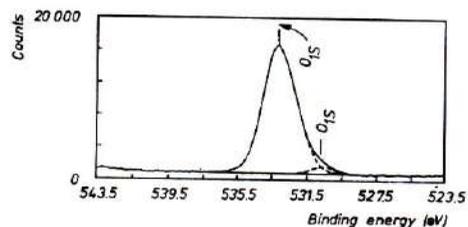


FIG. 4. O_{1s} photoelectron peak from sample prepared by grafting containing 17.8 wt% of TiO₂ calcined at 815°C.

4.3 Potencial Zeta.

La figura 5 muestra las variaciones de la superficie aparente cubierta para las diferentes muestras, medida con los datos obtenidos del potencial Zeta. Para contenidos de TiO₂ de 20.9% en peso, cerca del 85% de la superficie de la muestra es cubierta por el dióxido de titanio.

4.4 Reflectancia difusa UV-Vis.

La figura #6 muestra el espectro de absorción para la transferencia de banda para las muestras con contenidos de TiO₂ de 5.2 y 17.8 % y para la muestra de la mezcla mecánica de 15%. Para la muestra de mezcla mecánica de óxidos se aprecia un máximo de absorción a 320 nm. La muestra con contenido de 5.2% muestra un máximo de absorción cercano a 290 nm. La muestra preparada con 17.8% de TiO₂ muestra dos máximos de absorción

localizados a 290 y 320 nm respectivamente.

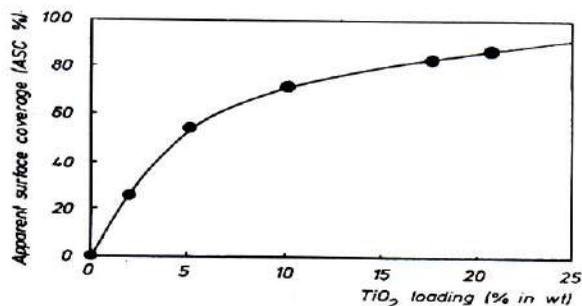


FIG. 5. Variation of the apparent surface coverage (ASC, in%) with the amount of TiO₂ loading over silica (wt%).

4.5 Difracción de rayos X.

Cristales de anatasa únicamente fueron detectados para contenidos de 17.8% y mayores. A composiciones mas bajas no se detecto ningún pico.

5. Discusión.

5.1 Textura y dispersión del óxido de Titanio sobre la Sílice.

Los resultados confirman que se obtiene una buena dispersión del TiO₂ sobre la Sílice usando la técnica de injerto utilizando alcoxido, demostrado previamente por Castillo *et al.*(1,9,23). Los resultados también confirman que usando esta técnica, se pueden obtener muy buenas dispersiones para composiciones menores del 15% en peso. Los cálculos teóricos del cubrimiento atómico de TiO₂ sobre la superficie de la Sílice, predice que debe de estar alrededor del 19% en peso (4).

Los resultados obtenidos en los análisis ESCA y Potencial Zeta también confirman esta buena dispersión a estas composiciones. Los resultados de ESCA mostrados en la figura 2 muestran que los puntos experimentales que contienen menos de 17.8% en peso se encuentran perfectamente alineados con la línea teórica, correspondiente de acuerdo al modelo a una monocapa atómica. Para estas composiciones se puede deducir que todas estas muestras contienen una excelente dispersión sin la aparición de

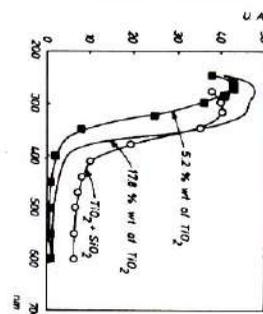


FIG. 6. UV-Vis diffuse reflectance. Absorption edge of Ti-O charge transfer band for samples loading 5.2 and 17.8 wt% of TiO₂ and the mechanical mixture containing 15 wt% of TiO₂. Y-axis is in arbitrary units. X-axis is absorption edge in nanometers.

cristales o aglomeraciones de TiO₂ en la superficie. Este resultado esta de acuerdo con el obtenido para el potencial Zeta. Los valores de ASC indican que las muestras con contenidos entre 17.8% y 20.9% de TiO₂ están cubriendo la superficie entre un 82 y 85% con el dióxido de titanio.

La Difracción de rayos X también confirma buenas dispersiones para estas composiciones ya que no se observan picos los cuales son ocasionados por grandes aglomeraciones del oxido sinónimo de mal cubrimiento.

Sin embargo, una perdida en el área superficial y el volumen de poro se observa como consecuencia de la deposición del dióxido de titanio. Esta perdida puede ser atribuida al taponamiento de los poros del soporte.

Para las composiciones mayores del 17.8% los puntos experimentales de la figura 2 se encuentran debajo de la línea teórica. Esto puede ser explicado por la formación de cristales o aglomeraciones del TiO₂, resultado confirmado mediante la difracción de rayos X. La formación de aglomeraciones también puede apreciarse para muestras con bajos contenidos de TiO₂ pero calcinadas a 815°C (XRD).

5.2 Interacción entre el oxido de Titanio

y la Sílice. Formación del puente Ti-O-Si.

Un resultado importante en los análisis de ESCA lo constituye el hecho del incremento en las energías de unión de las

muestras (0.8-1.9 eV) comparadas con el TiO₂ puro (anatasa) (Tabla 1). Se detectó una disminución en las energías de unión de los electrones del Ti2p_{3/2} cuando el contenido de TiO₂ aumenta. Esto puede explicarse debido al hecho que bajos contenidos prácticamente todo el Ti interactúa con el Si de la sílice. Las altas energías de unión reflejan la coordinación en tetraedros del Ti en la interacción fuerte Ti-O-Si. A composiciones altas de TiO₂ las contribuciones de la coordinación de los átomos de Ti corresponden a la encontrada en las contribuciones hexaédricas de los puentes de Ti y oxígeno en el dióxido de titanio (Rutilo o Anatasa), permitiendo una disminución en la energía de enlace. El cambio del ambiente de coordinación en las muestras es confirmado por los resultados de DRS (Fig 6). Las diferencias entre los picos de absorción son debidas a los diferentes ambientes del Ti en las muestras preparadas por injerto del alcóxido y el TiO₂ puro.

La asociación del TiO₂ y el SiO₂ se da a través del puente Ti-O-Si el cual depende fuertemente de la concentración de TiO₂ en la muestra. Los trabajos de Greigor *et al* (21) y Sandstrom *et al.* (22) sobre muestras de vidrios de óxido de titanio y silicio muestran que, para muestras que contienen aproximadamente 9% de Ti⁴⁺, el titanio ocupa una forma en tetraedros similar a la del Si en el SiO₂. Para cantidades menores del 5% la configuración es octaédrica. Por encima de 9% la configuración es octaédrica/tetraédrica incrementándose esta relación para composiciones mayores y al 15% es identificable la aparición de rutilo como segunda fase (21, 22).

Estos cambios en la coordinación (o en la naturaleza de los ligandos) del titanio inducen cambios en el pico del oxígeno O_{1s} tal y como se mostró en las figuras 3 y 4. Dado que el Ti es más electropositivo que el Si, las energías de unión de los átomos de oxígeno se reducen cuando el puente Si-O-Si es reemplazado por el puente Ti-O-Si haciéndolo de carácter más iónico, permitiendo ser al átomo de oxígeno ligeramente más negativo, explicando la variación de energías de unión del pico de O_{1s} en las muestras analizadas. Este mismo efecto puede explicar el incremento en las energías de unión del pico del Ti2p_{3/2} producido por la asociación con el puente Ti-O-Si el cual a su vez favorecido por el incremento de la temperatura.

5. Conclusiones

El injerto de la sílice de un área específica de 320 m²/g con isopropóxido de titanio en isopropanol permite una muy buena dispersión cercana a una monocapa atómica para composiciones cercanas a 18%.

Existe una interacción fuerte óxido-óxido entre el Ti y el Si debido a la formación de puentes Ti-O-Si. El grado de esta interacción decrece con el contenido de

TiO₂ y se incrementa con el incremento de la temperatura de calcinación.

REFERENCIAS

- Castillo, R., Koch, B., Ruiz, P., and Delmon, B., *J. of Catal.* 161, 524-529 (1996).
- Reichmann, M and Bell A. *Appl Catal.* 32,315 (1987).
- Fernández, A., Leyrer, J., González, A., Muñoz, G., Knozinger, K., *J Catal.* 112,489 (1988).
- Muñoz and Munera, G., "Studies and Surface science in Catalysis N° 63. Preparation of Catalyst V". P 627. Elsevier, Amsterdam, 1991.
- Wauthoz, P., Ruwet, M., Machej, T., and Grange, P., *Appl. Catal.* 69, 149 (1991).
- Mohammad Hossein Habibi, Shahram Tangestaninejad and Bahram Yadollahi. *Applied Catalysis B: Environmental* 2001, 33:1:57-63.
- Kyenong Youl and Seung Bin Parka. *Applied Catalysis B: Environmental* 2000, 25:4:249-256.
- Castillo, R., Koch, B., Ruiz, P., and Delmon, B., *European Patent* 638359 A1.
- Castillo, R., Koch, B., Ruiz, P., and Delmon, B., *B. J. Mater. Chem.* 4(6) 903 (1994).
- Bryson, C.E., III. *Surf Sci.* 189/190, 59 (1987).
- Scotfield, J., *J Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* 8, 129 (1976).
- Kerkhot, F.B, and Moulijn, J., *J Phys. Chem.* 83, 1612 (1979).
- Penn D.R., *J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom.* 9,29, (1976).
- Siuda, R., "Surface Science", Vol. 177. P L1011. North Holland, Amsterdam, 1976.
- Smoluchowski, M., in "Handbuch der Elektrizitat und der Magnetism". Vol. 2. P. 366. Leipzig, 1914.
- Raupp, G.B, and Dumesic, J., *J Phys. Chem.* 89, 5240 (1985).
- Mukhopadhyay, S., and Garofalini, S., *J. Non-Cryst. Solids* 126, 202(1990).
- Wei, Z., Xin, Q., Guo, X., Sham, E., Grange, P., and Delmon, B. *Appl. Catal* 63, 305 (1990).
- Mohai, M., Bertóti, I., and Revesz, M. *Surf Interface Anal.* 15, 364 (1990).
- Forger, K., and Anderson, J.R., *Appl. Catal.* 23, 139 (1986).
- Greigor, R., Lytle, F., Sandstrom, D., Wong, J., and Shultz, P., *J. Non-Cryst. Solids.* 41,201 (1980).
- Sandstrom, D., Lytle, F., Wei, P., Greigor, B., Wong, J., and Shultz, P., *J. Non-Cryst. Solids.* 41,201 (1980).
- Castillo, R., Koch, B., Ruiz, P., and Delmon, B., "Scientific Bases for Preparation of Heterogeneous Catalyst." September 1998. Belgium.

AMBROSINOSTEROL: UN NUEVO 5α , 8α -EPIDIOXIESTEROL CITOTÓXICO AISLADO DE LA ESPONJA MARINA *AXINYSSA AMBROSIA*

por

Natalia V. Petrichtcheva^a, Carmenza Duque^{*a} y Yoshinori Fujimoto^b

Resumen

Petrichtcheva, N., Duque Carmenza & Fujimoto Y.: Ambrosinosterol: un nuevo 5α , 8α epidioxiesterol citotóxico aislado de la esponja marina *Axinyssa ambrosia*. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **25**(97): 569-577, 2001. ISSN 0370-3908.

Del extracto metanol-acetona (1:1) de la esponja marina *Axinyssa ambrosia* recolectada en el Caribe colombiano, se aisló e identificó una mezcla de $5\alpha,8\alpha$ -epidioxiesteroles con actividad citotóxica contra varias líneas de células cancerosas. Entre los epidioxiesteroles identificados sobresale por su concentración el $5\alpha,8\alpha$ -epidioxi-(24R)-etilcolesta-6,22-dien-3 β -ol **6**, seguido por el $5\alpha,8\alpha$ -epidioxi-[(24R)+(24S)]-etilcolesta-6,22-dien-3 β -ol **7**, $5\alpha,8\alpha$ -epidioxi-(22E,24S)-etilcolesta-6,22,25(27)-trien-3 β -ol **2**, $5\alpha,8\alpha$ -epidioxi-colesta-6,22-dien-3 β -ol **3**, $5\alpha,8\alpha$ -epidioxi-(22E,24 ξ)-etilcolesta-6,9(11),22-trien-3 β -ol **4** y el $5\alpha,8\alpha$ -epidioxi-(22E,24S)-etilcolesta-6,22,25(27)-trien-3 β -ol **5**. Es importante anotar que esta es la primera vez en la naturaleza que se aísla e identifica al $5\alpha,8\alpha$ -epidioxi-(22E,24S)-etilcolesta-6,22,25(27)-trien-3 β -ol **5**, ambrosinosterol, como compuesto de origen natural. Su estructura fue determinada por métodos espectroscópicos (IR, EM y RMN) y por síntesis de compuestos análogos. También se reportan por primera vez los datos espectroscópicos para el compuesto sintético (22E,24R)-etilcolesta-5,22,25-trien-3 β -ol **8**.

Palabras clave: Metabolitos bioactivos, Citotoxicidad, Esteroides, Epidioxiesteroles, Esponjas marinas, *Axinyssa*.

^a Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, A.A. 14490, Bogotá, Colombia.

^b Department of Materials Science, Tokyo Institute of Technology, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8551, Japan.

* A quien debe enviarse la correspondencia. Tel: 571-3165000 ext. 14472. Fax: 571-3165220. E-mail: eduqueb@ciencias.unal.edu.co

Abstract

The metanol-acetone (1:1) extract of the marine sponge *Axinyssa ambrosia* collected along the Colombian Caribbean coasts afforded a mixture of $5\alpha,8\alpha$ -epidioxyterols, which showed cytotoxicity against cancer cells. Among the isolated and identified compounds the $5\alpha,8\alpha$ -epidioxi-(24R)-methylcholesta-6,22-dien-3 β -ol **6** was found as the major constituent followed by $5\alpha,8\alpha$ -epidioxo-[(24R)+(24S)]-ethylcholesta-6,22-dien-3 β -ol **7**, $5\alpha,8\alpha$ -epidioxo-(22E,24S)-methylcholesta-6,22,25(27)-trien-3 β -ol **2**, $5\alpha,8\alpha$ -epidioxo-cholesta-6,22-dien-3 β -ol **3**, $5\alpha,8\alpha$ -epidioxo-(22E,24 ξ)-methylcholesta-6,9(11),22)-trien-3 β -ol **4** and $5\alpha,8\alpha$ -epidioxo-(22E,24S)-ethylcholesta-6,22,25(27)-trien-3 β -ol **5**. The structures of compounds **1-7** were established by spectral methods (IR, MS and NMR). The absolute stereochemistry at C-24 of the epidioxo **5** was determined by comparing its spectral data with synthetic analogs. This is the first time that compound **5**, ambrosinosterol, is found in nature. Moreover, the unpublished spectral data for the synthetic compound (22E,24R)-ethylcholesta-5,22,25-trien-3 β -ol **8** are also reported.

Key words: Bioactive metabolites, Cytotoxicity, Steroids, Epidioxysterols, Marine sponges, *Axinyssa*.

Introducción

Durante las dos últimas décadas epidioxiesteroles, más comúnmente endoperóxidos $5\alpha,8\alpha$ - con diferentes cadenas laterales han sido frecuentemente aislados de fuentes marinas como esponjas, tunicados, corales, anémonas, orejas de mar, algas y de fuentes terrestres como líquenes y hongos (Castel, 1992; Castel 1999; Yaoita *et al.*, 1998). Esta clase de compuestos ha mostrado interesantes actividades biológicas, por ejemplo antitumoral contra líneas celulares de cáncer de seno y sarcoma, inhibidor de inflamación y promoción de tumores en piel de ratones, inmunosupresiva, antiviral contra el virus de la influenza, efecto estimulante de la germinación y crecimiento de plantas, etc. (Castel, 1992; Castel, 1999). Estudios recientes han mostrado que a los epidioxiesteroles puede atribuírseles también un importante papel como anticolonizadores en esponjas marinas (Tomono *et al.*, 1998; Sera *et al.*, 1999).

Durante nuestros continuos estudios en búsqueda de metabolitos marinos bioactivos (Martínez *et al.*, 1995; Martínez *et al.*, 1997; Duque, 1998), recientemente, nosotros encontramos que el extracto en metanol/acetona (1:1) de la esponja *Axinyssa ambrosia* mostró actividad citotóxica significativa contra líneas tumorales P-388 (linfoma de ratones), A-549 (carcinoma de sangre humana), HT-29 (carcinoma de colon humano). Este hecho nos impulsó a examinar la composición química de esta esponja. Así, el presente trabajo describe el aislamiento y caracterización de los epidioxiesteroles **1-7**, aislados e identificados de la esponja marina *A. ambrosia* recolectada en la Costa Caribe Colombiana, como responsables de la actividad citotóxica mostrada por el extracto crudo de la

esponja. Hasta nuestro conocimiento, esta es la primera vez que se reporta en la naturaleza el aislamiento del epidioxi **5** cuya estructura fue determinada como $5\alpha,8\alpha$ -epidioxo-(22E,24S)-etilcolesta-6,22,25(27)-trien-3 β -ol (ambrosinosterol).

Resultados y Discusión

Del fraccionamiento por cromatografía instantánea del extracto MeOH/acetona (1:1) de la esponja *A. ambrosia*, se obtuvo una subfracción con actividad citotóxica al eluir con benceno/AcOEt (10:2). Esta subfracción al ser examinada por cromatografía en capa delgada (CCD) mostró una mancha con $R_f = 0.12$, la cual después de ser aislada utilizando CC en sílica gel (eluyente benceno/AcOEt, 5:3) y analizada por espectrometría de masas mostró ser una mezcla compleja de epidioxiesteroles. Esta mezcla fue separada por cromatografía líquida de alta eficiencia (CLAE) preparativa como se describe en la sección de Materiales y Métodos hasta obtener 7 compuestos puros.

La tabla 1 muestra los epidioxiesteroles identificados, su concentración en la mezcla (expresada en % relativo) y las técnicas espectroscópicas empleadas en su identificación. El análisis cuantitativo fue hecho usando la técnica de la normalización de las áreas. Como puede verse en la Tabla 1, los epidioxiesteroles identificados son todos $5\alpha,8\alpha$ -epidioxo, de ellos el 93.5% en peso tienen núcleo Δ^6 y solo el 5.5% presentaron núcleo $\Delta^{6,9(11)}$. En cuanto a las cadenas laterales la mayoría de ellos presentó estructuras convencionales a excepción de los epidioxi **2** y **5** los cuales mostraron insaturación entre el C-25 y el C-27, la cual es muy rara en la naturaleza. Entre los

compuestos identificados sobresalen por su concentración el 5 α ,8 α -epidioxi-(24R)-etilcolesta-6,22-dien-3 β -ol **6** y el 5 α ,8 α -epidioxi-[(24R)+(24S)]-etilcolesta-6,22-dien-3 β -ol **7**, seguidos por el 5 α ,8 α -epidioxi-(22E,24S)-etilcolesta-6,22,25(27)-trien-3 β -ol **2** y el 5 α ,8 α -epidioxi-colesta-6,22-dien-3 β -ol **3**. A nivel de compuestos minoritarios se encontraron el 5 α ,8 α -epidioxi-(22E,24 ξ)-etilcolesta-6,9(11),22)-trien-3 β -ol **4** y el 5 α ,8 α -epidioxi-(22E,24S)-etilcolesta-6,22,25(27)-trien-3 β -ol **5**. Es importante anotar que esta es la primera vez en la naturaleza que se aísla e identifica al 5 α ,8 α -epidioxi-(22E,24S)-etilcolesta-6,22,25(27)-trien-3 β -ol,

ambrosinosterol (Figura 1), como compuesto de origen natural. A continuación se describe en detalle como se hizo su identificación.

Ambrosinosterol (epidioxi **5**) fue obtenido en muy pequeña cantidad (aprox.1 mg) como un polvo blanco amorfo. Su espectro IR mostró una absorción fuerte a 3398 cm^{-1} debida al grupo hidroxilo y bandas en 1075, 1043, 1026, 965, 754 cm^{-1} atribuibles al grupo peroxi. Otras bandas que aparecen en el espectro IR y que vale la pena mencionar, son aquellas en 2956, 1456, 1373 y 1647 cm^{-1} características de la presencia de grupos alifáticos y de insaturación.

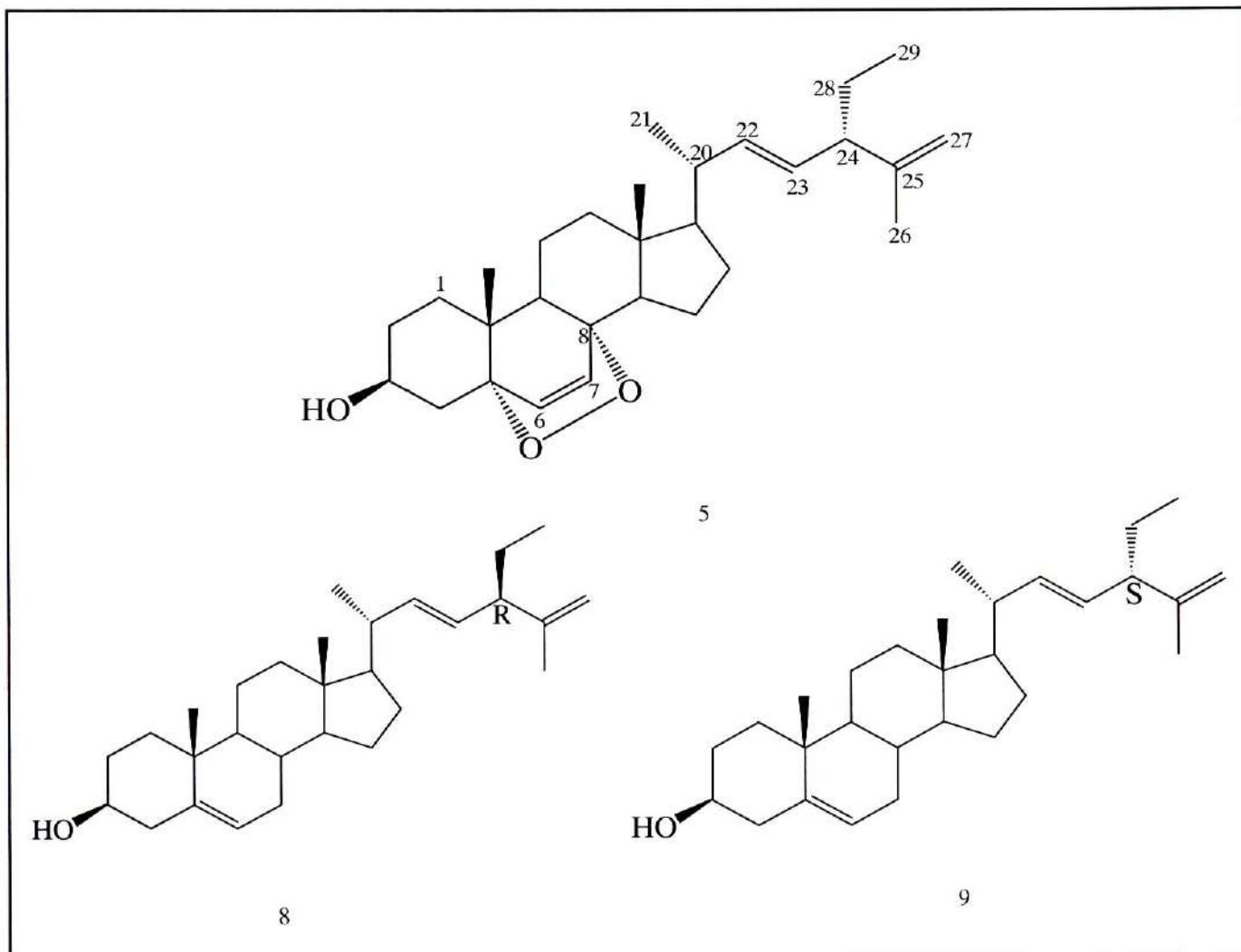
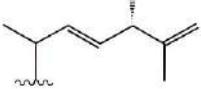
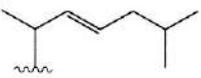
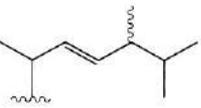
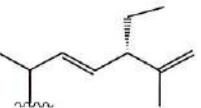
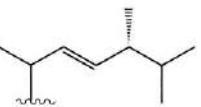
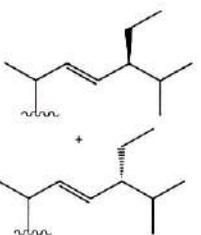
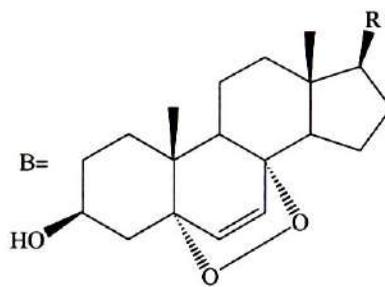
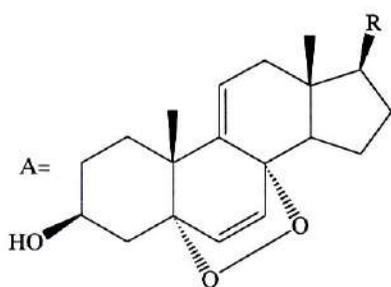


Figura 1. 5 α ,8 α -Epidioxi-(22E,24S)-etilcolesta-6,22,25(27)-trien-3 β -ol **5**, (ambrosinosterol), nuevo compuesto citotóxico aislado de la esponja marina *Axinyssa ambrosia* y sus homólogos sintéticos (22E,24R)-etilcolesta-5,22,25-trien-3 β -ol **8** y (22E,24S)-etilcolesta-5,22,25-trien-3 β -ol **9**.

Tabla 1. 5 α ,8 α -Epidioxiesteroides aislados de la esponja marina *Axinyssa ambrosia*.

No	M	Núcleo	Cadena lateral	% relativo	Identificado por
1	412	A	C ₈ H ₁₇ con una insaturación	t	EM
2	426	B		7.1	IR, EM, RMN- ¹ H, RMN- ¹³ C
3	414	B		8.2	IR, EM, RMN- ¹ H, RMN- ¹³ C
4	426	A		5.5	IR, EM, RMN- ¹ H
5	440	B		3.0	IR, EM, RMN- ¹ H, RMN- ¹³ C, ¹ H- ¹ H COSY, síntesis de análogos
6	428	B		61.0	IR, EM, RMN- ¹ H, RMN- ¹³ C, DEPT, HMOC, HMBC
7	442	B		14.2	IR, EM, RMN- ¹ H, RMN- ¹³ C

tr = menor del 1 %



El espectro de masas de alta resolución FAB indicó una fórmula molecular de C₂₉H₄₅O₃ para MH⁺ y el espectro de masas en impacto electrónico mostró un ión molecular en m/z 440 de baja intensidad, concordante con la fórmula C₂₉H₄₄O₃ para M⁺ y los fragmentos típicos para 5 α ,8 α -epidioxiesteroles (Gunatilaka *et al.*, 1981): m/z 408 (M-O₂), 422 (M-H₂O), 390 (M-O₂-H₂O), 375 (M-O₂-H₂O-CH₃). El núcleo esteroidal Δ^6 pudo ser deducido debido a la presencia del ión m/z 349 (M-O₂-CH₂CH₂CH₂OH) y del ión m/z 253 (M-O₂-cadena lateral-H₂O) de mayor intensidad que el ión m/z 251 (Gunatilaka *et al.*, 1981). La cadena lateral del epidioxi **5** fue calculada como C₁₀H₁₇ a partir del ión m/z 271 (M-O₂-cadena lateral).

Los datos de RMN-¹H (Tabla 2) para el compuesto **5** confirmaron una estructura de 5 α ,8 α -epidioxiesterol con doble enlace en el C-6, por ejemplo, señales dobletes en δ 6.50 y 6.24 para los protones del C-6 y del C-7, respectivamente, con una J = 8.5 Hz indicando estereoquímica Z; señales singletes anchos en δ 0.88 para el CH₃-19 y en δ 0.82 para el CH₃-18 y una señal heptete para un proton oximetino axial en δ 3.96 (H-3), (Gunatilaka *et al.*, 1981). También se observaron en el espectro una señal doblete en δ 1.00 atribuible al CH₃-21 cuando hay insaturación en el C-22 (Duque *et al.*, 1983), un singlete en δ 1.65 que integra para tres protones (presumible un CH₃ sobre un doble enlace), dos singletes anchos integrando cada uno para un hidrógeno en δ 4.69 y 4.71 indicando la presencia de un doble enlace metileno terminal (el ¹H-¹H COSY mostró que estos dos hidrógenos acoplan entre sí y con la señal metilo en δ 1.65, demostrando así la presencia de la subunidad isopropilideno en este compuesto) y una señal multiplete para 2H en δ 5.19 indicando la presencia de otro doble enlace. Experimentos de doble resonancia irradiando el H-20 en δ 2.04 (asignación hecha por ¹H-¹H COSY) y el H-24 en δ 2.42, permitieron simplificar las señales multipletes en δ 5.23 y 5.19 y calcular una J = 15.2 Hz, para los protones olefinicos del C-22 y C-23, permitiendo deducir una geometría E para este doble enlace. Finalmente, se observó también un triplete en δ 0.82 correlacionando en el espectro ¹H-¹H COSY con un metileno en δ 1.34-1.50 mostrando también la presencia de un grupo etilo adicional en la cadena. El espectro de RMN-¹³C (Tabla 2) mostró señales para 29 átomos de carbono. La presencia de un grupo peroxi en el compuesto **5** fue confirmada por las señales en δ 82.16 y 79.40 de los carbonos cuaternarios C-5 y C-8, respectivamente, los cuales sostienen el oxígeno del grupo peroxi y por las señales de metinos olefinicos en δ 135.44 para el C-6 y en δ 130.73 para el C-7 (Iguchi *et al.*, 1993). Adicionalmente, las señales de

carbonos olefinicos en δ 136.52 y 130.65 confirmaron el doble enlace en el C-22 y las señales en δ 148.43 y 109.66 la presencia de un metileno terminal. Todos estos datos espectroscópicos y el análisis arriba presentado permitieron concluir una estructura de Δ^6 -5 α ,8 α -epidioxiesterol con una cadena lateral de 10 átomos de carbono, insaturada en el C-22 y con un grupo etilo y un grupo isopropilideno como sustituyentes, cuyo único arreglo posible, de acuerdo a la fórmula de la cadena lateral C₁₀H₁₇ (deducida del espectro de masas), es estar los dos unidos al C-24. De esta suerte, la estructura del compuesto **5** pudo asignarse como 5 α ,8 α -epidioxi-(22E,24 ξ)-etilcolesta-6,22,25(27)-trien-3 β -ol.

Debido a la pequeña cantidad de compuesto **5** aislado (menor de 1 mg), la asignación de las señales en RMN no pudo ser hecha utilizando las técnicas bidimensionales usuales de HMBC y HMQC. Así, las señales de RMN para los carbonos e hidrógenos del núcleo fueron asignadas por comparación de nuestros datos con los presentados por Iguchi *et al.* (1993) y por Kim *et al.* (1997) para epidioxiesteroles con núcleo Δ^6 -5 α ,8 α y las correspondientes a la cadena lateral por comparación de nuestros datos con las señales de los compuestos análogos **8** y **9** (esteroisoméricos en el C-24), sintetizados por nosotros para este trabajo (Figura 1, Tabla 2), como se menciona en la sección de Materiales y Métodos. Los resultados de esta comparación permitieron establecer que los desplazamientos de los carbonos de la cadena lateral del compuesto sintético **9**, con una estereoquímica 24S, particularmente aquellos para C-24 a C-29, concuerdan muy bien con los mostrados por ambrosinosterol. De esta forma pudo asignarse la estructura de 5 α ,8 α -epidioxi-(22E,24S)-etilcolesta-6,22,25(27)-trien-3 β -ol, para el compuesto **5** (ambrosinosterol). La tabla 2 muestra la asignación de todas las señales para los hidrógenos y los carbonos de este nuevo epidioxiesterol.

Los ensayos de actividad biológica realizados contra las células cancerígenas (P-388⁴, A-549, HT-29) para la mezcla de epidioxiesteroles y para algunos de los componentes mayoritarios incluyendo el compuesto **5**, mostraron buenos resultados de toxicidad (CI₅₀ de 2.5, 5.0, 5.0 ppm para la mezcla y de 2.5, 2.5, 2.5 ppm para los epidioxiesteroles mencionados). De acuerdo a estos resultados y a los encontrados por otros investigadores para compuestos de estructura química similar, podemos prever la importancia de estos epidioxiesteroles en futuras aplicaciones en el área de la salud. La abundante existencia de los epidioxiesteroles en varios organismos terrestres y marinos confirma una vez mas su importancia en la naturaleza.

Tabla 2. Datos de RMN para el epidioxiesterol **5**, y sus análogos sintéticos **8** y **9** (δ en CDCl_3 , 400 y 125 MHz)

Posición	5		8	9
	δ_{H}	δ_{C}	δ_{C}	δ_{C}
1		34.71	37.24	37.24
2		30.14	31.65	31.63
3	3.96 (1H, m)	66.48	71.79	71.78
4		36.95	42.26	42.23
5		82.16	140.74	140.74
6	6.24 (1H, d, J=8.5 Hz)	135.44	121.68	121.67
7	6.50 (1H, d, J=8.5 Hz)	130.73	31.87	31.87
8		79.40	31.87	31.87
9		51.11	50.13	50.13
10		36.95	36.50	36.50
11		23.40	21.05	21.04
12		39.36	39.65	39.65
13		44.58	42.29	42.28
14		51.70	56.80	56.82
15		20.68	24.29	24.30
16		28.79	28.53	28.69
17		56.10	56.01	55.85
18	0.82 (3H, s)	12.86	12.04	12.04
19	0.88 (3H, s)	18.17	19.39	19.38
20	2.04 (1H, m)	39.72	40.11	40.17
21	1.00 (3H, d, J=6.4Hz)	20.72	20.85	20.78
22	5.23 (1H, dd, J=15.2, 7.3 Hz)	136.52	137.32	137.18
23	5.19 (1H, dd, J=15.2, 6.4 Hz)	130.65	129.93	130.01
24	2.42 (1H, q, J=6.4 Hz)	51.96	51.86	51.97
25		148.43	148.58	148.60
26	1.65 (3H, s)	20.21	20.28	20.20
27	4.69, 4.71 (2H, br s)	109.66	109.44	109.50
28	1.34-1.50 (2H, m)	25.70	25.64	25.68
29	0.83 (3H, t, J=7.3 Hz)	12.13	12.04	12.13

Materiales y Métodos

General

Los puntos de fusión se obtuvieron en el fusiómetro Fisher-Johns. Los espectros de IR fueron registrados en un espectrofotómetro Perkin Elmer FT-IR Poragon 500. Los espectros de RMN-¹H y ¹³C fueron obtenidos en CDCl₃ en los equipos Bruker DRX-600 y Jeol JNM-GSX500 usando TMS como estándar interno. Los espectros de masas (IE, 70 Ev) se obtuvieron por entrada directa en un equipo Shimadzu modelo QP-5050 A y para la espectrometría de masas FAB de alta resolución se usó un equipo JEOL JMS-AX505H. La cromatografía líquida de alta eficiencia fue hecha utilizando un cromatógrafo Merck-Hitachi L-6000 A, equipado con un detector UV-visible L-4250. Las columnas empleadas fueron Lichrochart RP-18 (125 x 4 mm d.i., 5 μ m) y Ultrasphere ODS (75 x 4.6 mm d.i., 3 μ m). Como eluyentes usaron mezclas de MeOH-H₂O, en proporción 95:5 con flujo 0.7 ml/min, MeOH-H₂O, 86:14 con flujo 1.2ml/min y CH₃CN-H₂O, 85:15 con flujo 0.5 ml/min. Para cromatografía en columna tradicional se usó sílica gel (0.063-0.200 mm/70-230 mesh ASTM). Para la cromatografía en capa delgada se usaron cromatoplasas de aluminio, Sílica gel 60 F₂₅₄. La visualización de los compuestos en CCD fue realizada por medio de aspersión de las placas con una solución de ácido fosfomolibdico al 20% en etanol con posterior calentamiento a 110°C.

Material biológico

La esponja *Axinyssa ambrosia* (algunos individuos, 1.5 kg, peso húmedo) fue recolectada por SCUBA en la bahía de Santa Marta (Colombia) a una profundidad de 20-26 metros, luego fue congelada y guardada antes de ser usada. Muestras de referencia de dicha esponja se encuentran depositadas en el Instituto de Ciencias Naturales-Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá) [ICN-MHN(Po) 0173] y en las colecciones del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR en Santa Marta (INV.POR 0522).

Extracción y purificación

La esponja congelada fue cortada en trozos pequeños y sometida a una extracción con metanol/acetona (1:1) a temperatura ambiente durante 24 horas. El extracto fue concentrado y el residuo obtenido se fraccionó por cromatografía bajo vacío sobre sílica gel eluyendo en gradiente discontinuo con 250 ml de cada uno de los siguientes solventes: hexano, hexano/acetato de etilo (11:1), hexano/acetato de etilo (5:3) y metanol. La fracción

eluida con hexano/acetato de etilo 5:3 fue sometida a fraccionamiento por CC repetitiva sobre sílica gel usando como eluyente hexano/acetato de etilo (5:3) hasta obtener 230 mg de la mezcla de epidioxiesteres. La separación de esta mezcla se hizo por CLAE preparativa en fase reversa con una columna Lichrochart RP-18 (125 x 4 mm d.i., 5 μ m) y MeOH/H₂O 95:5 a un flujo 0.7 ml/min como eluyente, dando como resultado los compuestos puros **1** (menos de 1 mg), **6** (80 mg) y **7** (19 mg). La fracción eluida en el intervalo entre 8 y 10 minutos fue recolectada y sometida nuevamente a CLAE preparativa, pero esta vez en una columna Ultrasphere ODS (75 x 4.6 mm d.i., 3 μ m) usando MeOH/H₂O, 86:14, a un flujo de 1.2 ml/min hasta obtener los compuestos puros **2** (8 mg) y **5** (menos de 1 mg). De manera similar a lo mencionado anteriormente la fracción eluida en el intervalo de tiempo entre 16 a 18 minutos fue recolectada y finalmente sometida a una nueva separación en una columna Ultrasphere ODS (75 x 4.6 mm d.i., 3 μ m) usando CH₃CN/H₂O 85:15 a un flujo de 0.5 ml/min hasta obtener los compuestos puros **3** (11 mg) y **4** (7 mg).

Síntesis del (22E,24R)-etilcolesta-5,22,25-trien-3 β -ol (8): Al compuesto conocido (22E,24R)-6 β -metoxi-3 α ,5-cicloestigma-22-en-26-ol (597 mg, 1.35 nmoles) (Fujimoto *et al.*, 1984) disuelto en THF (16 ml) se le añadieron cloruro de 2-nitrofenilselenilo (1.52 g, 6.72 nmoles) y n-Bu₃P (1.67 ml, 6.72 nmoles). La mezcla se agitó durante una hora y media a temperatura ambiente y luego se adicionaron 30 ml de H₂O₂ al 30%, se continuó con la agitación por una hora mas. La mezcla de reacción fue extraída con acetato de etilo y el producto crudo de reacción fue purificado por CC sobre sílica gel usando como eluyente hexano/acetato de etilo (30:1) para dar 515 mg del exometileno puro. Este último compuesto fue sometido a reflujo durante tres horas disuelto en dioxano/agua (4:1, 18 ml) conteniendo una cantidad catalítica del p-TsOH.H₂O (aprox. 0.5 mg). La mezcla de reacción fue extraída con éter etílico y luego sometida a cristalización en metanol, hasta obtener el compuesto puro (22E,24R)-etilcolesta-5,22,25-trien-3 β -ol, cuyos datos espectroscópicos se muestran más adelante.

Síntesis del (22E,24S)-etilcolesta-5,22,25-trien-3 β -ol (9): Para obtener este compuesto se siguió el mismo procedimiento anterior pero usando como material de partida el (22E,24S)-6 β -metoxi-3 α ,5-cicloestigma-22-en-26-ol (Fujimoto *et al.*, 1984). Los datos espectroscópicos para este esteroisómero, el 24S, se muestran más adelante. Este esteroisómero también fue aislado de las raíces de *Ajuga reptans* var. *atropurpurea* (Yagi *et al.*, 1996).

5 α ,8 α -Epidioxi-(22E,24S)-metilcolesta-6,22,25(27)-trien-3 β -ol (2): cristales blancos; p.f.114-116°C. IR (KBr)

γ_{\max} 3398, 2955, 1644, 1457, 1374, 1074, 1043, 1026, 968, 888 cm^{-1} ; RMN- ^1H (500 MHz, CDCl_3) δ 0.82 (3H, s, H_3 -18), 0.89 (3H, s, H_3 -19), 1.00 (3H, d, $J=8.2$ Hz, H_3 -21), 1.08 (3H, d, $J=8.5$ Hz, H_3 -28), 1.67 (3H, s, H_3 -27), 2.71 (1H, q, $J=8.6$ Hz, H-24), 3.97 (1H, m, H-3), 4.70 (2H, br s, H-26), 5.22 (1H, m, H-22), 5.26 (1H, m, H-23), 6.25 (1H, d, $J=10.35$ Hz, H-6), 6.50 (1H, d, $J=10.65$ Hz, H-7); RMN- ^{13}C (125 MHz, CDCl_3) δ 34.66 (C-1), 30.09 (C-2), 66.45 (C-3), 36.93 (C-4), 82.14 (C-5), 135.41 (C-6), 130.69 (C-7), 79.39 (C-8), 51.03 (C-9), 36.89 (C-10), 20.61 (C-11), 39.30 (C-12), 44.55 (C-13), 51.64 (C-14), 23.37 (C-15), 28.63 (C-16), 56.10 (C-17), 12.84 (C-18), 18.16 (C-19), 39.57 (C-20), 20.61 (C-21), 135.31 (C-22), 131.86 (C-23), 43.57 (C-24), 149.71 (C-25), 108.85 (C-26), C-27?, 18.81 (C-28); EM (70 eV) m/z (int. rel.) 426 (M^+ , $\text{C}_{28}\text{H}_{42}\text{O}_3$, 9), 408 ($\text{M}^+-\text{H}_2\text{O}$, 2), 394 (M^+-O_2 , 61), 361 ($\text{M}^+-\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_3$, 29), 335 ($\text{M}^+-\text{O}_2-\text{C}_3\text{H}_7\text{O}$, 17), 271 (M^+-O_2 -cadena lateral-2H, 6), 253 ($\text{M}^+-\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$ -cadena lateral, 14), 211 (fisión del anillo D-2H- H_2O , 11), 81 (100).

5 α ,8 α -Epidioxi-colesta-6,22-dien-3 β -ol (3): sólido blanco de p.f. 126-128 °C; IR (KBr) γ_{\max} 3386, 2953, 1645, 1459, 1378, 1076, 1044, 1027, 968 cm^{-1} ; RMN- ^1H (600 MHz, CDCl_3) δ 0.81 (3H, s, H_3 -18), 0.85 (3H, d, $J=6.6$ Hz, H-26), 0.85 (3H, d, $J=6.6$ Hz, H-27), 0.88 (3H, s, H_3 -19), 0.99 (3H, d, $J=6.6$ Hz, H-21), 3.96 (1H, m, H-3), 5.18 (1H, dd, $J=8.4$, 15 Hz, H-22), 5.28 (1H, dt, $J=7.2$, 15 Hz, H-23), 6.24 (1H, d, $J=8.4$ Hz, H-6), 6.50 (1H, d, $J=8.4$ Hz, H-7); RMN- ^{13}C (150 MHz, CDCl_3) δ 34.63 (C-1), 30.03 (C-2), 66.40 (C-3), 36.92 (C-4), 82.14 (C-5), 135.38 (C-6), 130.72 (C-7), 79.4 (C-8), 51.02 (C-9), 36.87 (C-10), 20.63 (C-11), 39.27 (C-12), 44.52 (C-13), 51.64 (C-14), 22.25 (C-15), 28.50 (C-16), 56.03 (C-17), 12.81 (C-18), 18.15 (C-19), 39.68 (C-20), 20.60 (C-21), 137.41 (C-22), 126.79 (C-23), 41.87 (C-24), 28.5 (C-25), 22.25 (C-26), 22.3 (C-27); EM (70 eV) m/z (int. rel.) 414 (M^+ , $\text{C}_{27}\text{H}_{42}\text{O}_3$, 4), 396 ($\text{M}^+-\text{H}_2\text{O}$, 2), 382 (M^+-O_2 , 56), 349 ($\text{M}^+-\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_3$, 31), 323 ($\text{M}^+-\text{O}_2-\text{C}_3\text{H}_7\text{O}$, 20), 271 (M^+-O_2 -cadena lateral-2H, 7), 253 ($\text{M}^+-\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$ -cadena lateral, 15), 211 (fisión del anillo D-2H- H_2O , 9).

5 α ,8 α -Epidioxi-(24 ξ)-metilcolesta-6,9(11),22-trien-3 β -ol (4): sólido blanco; IR (KBr) γ_{\max} 3384, 2959, 2873, 1668, 1460, 1375, 1076, 1034, 978, 933 cm^{-1} ; RMN- ^1H (600 MHz, CDCl_3) δ 0.73 (3H, s, H_3 -18), 0.82 (3H, d, $J=7.24$ Hz, H_3 -26), 0.83 (3H, d, $J=6.6$ Hz, H_3 -27), 0.91 (3H, d, $J=6.6$ Hz, H_3 -28), 1.00 (3H, d, $J=6.6$ Hz, H_3 -21), 1.09 (3H, s, H_3 -19), 3.98 (1H, m, H-3), 5.15 (1H, dd, $J=9$, 15 Hz, H-23), 5.22 (1H, dd, $J=8.4$, 15 Hz, H-22), 5.43 (1H, dd, $J=4.2$, 1 Hz, H-11), 6.29 (1H, d, $J=8.4$ Hz, H-6), 6.60 (1H, d, $J=9$ Hz, H-7); EM (70 eV) m/z (int. rel.) 426 (M^+ , $\text{C}_{28}\text{H}_{42}\text{O}_3$, 7), 411 (M^+-CH_3 , 13), 408 ($\text{M}^+-\text{H}_2\text{O}$, 11), 394 (M^+-O_2 , 16), 376 (M^+ -

$\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$, 29), 361 ($\text{M}^+-\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_3$, 5), 251 ($\text{M}^+-\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$ -cadena lateral, 71), 249 ($\text{M}^+-\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$ -cadena lateral-2H, 11), 209 (fisión del anillo D-2H- H_2O , 15), 69 (100)

5 α ,8 α -Epidioxi-(22E,24S)-etilcolesta-6,22,25(27)-trien-3 β -ol (5): sólido blanco; IR (KBr) γ_{\max} 3398, 2956, 1647, 1456, 1373, 1075, 1043, 1026, 965, 754 cm^{-1} ; RMN- ^1H y RMN- ^{13}C , ver Tabla 2; EMAR-FAB m/z 441.3392 (calculada para $\text{C}_{29}\text{H}_{45}\text{O}_3$, 441.3396), EM (70eV) m/z (int. rel) 440 (M^+ , $\text{C}_{29}\text{H}_{45}\text{O}_3$, 4), 422 ($\text{M}^+-\text{H}_2\text{O}$, 16), 408 (M^+-O_2 , 64), 375 ($\text{M}^+-\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_3$, 31), 349 ($\text{M}^+-\text{C}_3\text{H}_7\text{O}-\text{O}_2$, 16), 271 (M^+-O_2 -cadena lateral-2H, 8), 253 ($\text{M}^+-\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$ -cadena lateral, 17), 211 (fisión del anillo D-2H- H_2O , 11), 55 (100)

5 α ,8 α -Epidioxi-24(R)-metilcolesta-6,22-dien-3 β -ol (6): sólido blanco de p.f. 175-177 °C; IR (KBr) γ_{\max} 3519, 3316, 2955, 1662, 1646, 1456, 1377, 1075, 1043, 1026, 968 cm^{-1} ; RMN- ^1H (500 MHz, CDCl_3) δ 0.81 (3H, s, H_3 -18), 0.81 (3H, d, $J=6.6$ Hz, H_3 -27), 0.82 (3H, d, $J=7.2$ Hz, H_3 -26), 0.87 (3H, s, H_3 -19), 0.90 (3H, d, $J=6.6$ Hz, H_3 -28), 0.99 (3H, d, $J=6.6$ Hz, H_3 -21), 3.96 (1H, m, H-3), 5.14 (1H, dd, $J=7.8$, 15.0 Hz, H-22), 5.20 (1H, dd, $J=7.9$, 15.2 Hz, H-23), 6.24 (1H, d, $J=8.4$ Hz, H-6), 6.50 (1H, d, $J=8.4$, H-7); RMN- ^{13}C (125 MHz, CDCl_3) δ 34.66 (C-1), 30.09 (C-2), 66.46 (C-3), 36.90 (C-4), 82.14 (C-5), 135.39 (C-6), 130.73 (C-7), 79.41 (C-8), 51.05 (C-9), 36.94 (C-10), 20.86 (C-11), 39.31 (C-12), 44.54 (C-13), 51.66 (C-14), 23.38 (C-15), 28.64 (C-16), 56.17 (C-17), 12.85 (C-18), 18.16 (C-19), 39.72 (C-20), 20.61 (C-21), 135.18 (C-22), 132.29 (C-23), 42.75 (C-24), 33.04 (C-25), 19.64 (C-26), 19.94 (C-27), 17.54 (C-28); EM (70 eV) m/z (int. rel) 428 (M^+ , $\text{C}_{28}\text{H}_{44}\text{O}_3$, 7), 410 ($\text{M}^+-\text{H}_2\text{O}$, 15), 396 (M^+-O_2 , 61), 363 ($\text{M}^+-\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_3$, 25), 337 ($\text{M}^+-\text{O}_2-\text{C}_3\text{H}_7\text{O}$, 15), 271 (M^+-O_2 -cadena lateral-2H, 7), 253 ($\text{M}^+-\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$ -cadena lateral, 14), 211 (fisión del anillo D-2H- H_2O , 8), 55 (100).

5 α ,8 α -Epidioxi-24(R+S)-etilcolesta-6,22-dien-3 β -ol (7): sólido blanco de p.f. 161-162 °C; IR (KBr) γ_{\max} 3396, 2956, 2870, 1648, 1458, 1377, 1075, 1043, 1025, 970, 834 cm^{-1} ; ^1H -RMN (500 MHz, CDCl_3) δ 0.79 (3H, d, $J=8.85$ Hz, H_3 -27), 0.79 (3H, d, $J=9.45$ Hz, H_3 -26), 0.82 (3H, s, H-18), 0.83 (3H, $J=7.95$ Hz, H_3 -29), 0.88 (3H, s, H-19), 1.01 (3H, d, $J=8.25$ Hz, H_3 -21), 3.97 (1H, m), 5.04 (1H, dd, $J=10.4$, 17.4 Hz, H-22), 5.14 (1H, dd, $J=10.4$, 13.75 Hz, H-23), 6.25 (1H, d, $J=10.65$ Hz, H-6), 6.51 (1H, d, $J=10.65$ Hz, H-7); ^{13}C -RMN (125 MHz, CDCl_3) δ 34.63 (C-1), 30.06 (C-2), 66.43 (C-3), 36.91 (C-4), 82.11 (C-5), 135.36 (C-6), 130.71 (C-7), 79.38 (C-8), 51.02 (C-9), 36.89 (C-10), 20.88 (C-11), 39.29 (C-12), 44.50 (C-13), 51.64 (C-14), 23.35 (C-15), 28.85 (C-16), 56.07 (C-17), 12.41 (C-18), 12.80 (C-18), 18.13 (C-19), 18.95 (C-19), 39.99 (C-20), 20.66 (C-21), 137.57 (C-22), 129.88 (C-23), 51.17 (C-24), 51.12

(C-24), 31.81 (C-25), 31.75 (C-25), 18.95 (C-26), 18.88 (C-27), 25.32 (C-28), 21.07 (C-29), 21.11 (C-29); EM (70 eV) m/z (int.rel.) 442 (M⁺, C₂₉H₄₆O₃, 2), 424 (M⁺-H₂O, 2), 410 (M⁺-O₂, 13), 377 (M⁺-O₂-H₂O-CH₃, 7), 351 (M⁺-O₂-C₃H₇O, 4), 271 (M⁺-O₂-cadena lateral-2H, 4), 253 (M⁺-O₂-H₂O-cadena lateral, 5), 211 (fisión del anillo D-2H-H₂O, 4), 55 (100)

(22E,24R)-etilcolesta-5,22,25-trien-3 β -ol (8): RMN-¹H (400 MHz, CDCl₃) δ 0.69 (3H, s, H-18), 0.83 (3H, t, J=7.3 Hz, H₃-29), 1.01 (3H, s, H₃-19), 1.02 (3H, d, J=6.8 Hz, H₃-21), 1.65 (3H, s, H₃-27), 2.42 (1H, m, H₃-24), 3.52 (1H, m, H-3), 4.70 (1H, d, J=1.4 Hz, H-26), 4.69 (1H, s ancho, H-26), 5.16 (1H, dd, J=7.8, 15.6 Hz, H-22), 5.25 (1H, dd, J=8.3, 15.4 Hz, H-23), 5.35 (1H, d, J=5.4 Hz, H-5); RMN-¹³C (125 MHz, CDCl₃) ver Tabla 2.

(22E,24S)-etilcolesta-5,22,25-trien-3 β -ol (9): Cristales blancos de p.f. 147°C (desde metanol); RMN-¹H (400 MHz, CDCl₃) δ 0.69 (3H, s, H₃-18), 0.83 (3H, t, J=7.3 Hz, H₃-29), 1.00 (3H, s, H₃-19), 1.01 (3H, d, J=6.6 Hz, H₃-21), 1.65 (3H, s, H₃-27), 2.42 (1H, m, H₃-24), 3.52 (1H, m, H-3), 4.70 (2H, d, J=1.6 Hz, H₂-26), 5.17 (1H, dd, J=7.3, 15.4 Hz, H-22), 5.24 (1H, dd, J=8, 15.4 Hz, H-23), 5.35 (1H, d, J=2 Hz, H-5); RMN-¹³C (125 MHz, CDCl₃) ver Tabla 2.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación otorgada por Colciencias para la realización del presente trabajo. De manera muy especial se le agradece a la empresa farmacéutica Biomar S. A. por la realización de los ensayos de citotoxicidad contra líneas celulares cancerosas.

Bibliografía

- Casteel, D. A. 1999. Peroxy Natural Products. Nat. Prod. Rep. 16: 55-73.
 1992. Peroxy Natural Products. Nat. Prod. Rep. 9: 289-312.
 Duque, C., A. Bernal, R. De Correa, M. Morisaki & N. Ikekawa. 1983. Free sterols of the sea urchin *Echinometra lucunter*. Chem. Pharm. Bull. 31, 1366-1369.

- Duque, C. 1998. Búsqueda de compuestos bioactivos a partir de organismos marinos del Caribe Colombiano. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 22 (85): 527-537.
 Fujimoto, Y., M. Kimura, F. A. M. Khalifa & N. Ikekawa. 1984. Side chain structural requirement for utilization of sterols by the silk worm for growth and development. Non-stereoselective utilization of the 24-stereoisomeric pairs of 24-alkylsterols. Chem. Pharm. Bull. 32 (11): 4372-4381.
 Gunatilaka, A. A. L., Y. Gopichand, F. J. Schimtz & C. Djerassi. 1981. Minor and trace sterols in marine invertebrates. 26. Isolation and structure elucidation of nine new 5 α ,8 α -epidioxy sterols from four marine organisms. J. Org. Chem. 46 (19): 3860-3866.
 Iguchi, K., H. Shimura, Z. Yang & Y. Yamada. 1993. A new 5 α ,8 α -epidioxy sterol from the Okinawan marine sponge of the *Acinysssa* genus. Steroids 58, 410-413.
 Kim, D. S., N-In, Baek., S. R. OH, K. Y. Jung, I. S. Lee, J. H. Kim & H-K. Lee. 1997. Anticomplementary activity of ergosterol peroxide from Naematoloma fasciculare and reassignment of NMR data. Arch. Pharm. Res., 20 (3): 201-205.
 Martínez, A., C. Duque, N. Sato, R. Tanaka & Y. Fujimoto. 1995. (18R)-Variabilin from the sponge *Ircinia felix*. Nat. Prod. Lett. 6: 1-6.
 Martínez, A., C. Duque, N. Sato & Y. Fujimoto. 1997. (8Z, 13Z, 20Z)-strobilin and (7Z, 13Z, 20Z) felixinin: New furanosesterterpene tetrone acids from marine sponges of the genus *Ircinia*. Chem. Pharm. Bull. 45 (1): 181-184.
 Sera, Y., K. Adachi & Y. Shizuri. 1999. A new epidioxy sterol as an antifouling substance from a Palauan marine sponge *Lendenfeldia chondrodes*. J. Nat. Prod. 62 (1): 152-154.
 Tomono, Y., H. Hirota & N. Fusetani. 1998. Antifouling compounds against barnacle (*Balanus amphitrite*) larvae from the marine sponge *Acantella cavernosa*. In *Sponge Sciences. Multidisciplinary Perspectives*. Springer-Verlag (ed), Tokyo, 413-424.
 Yagi T., M. Morisaki, T. Kushiro, H. Yoshida & Y. Fujimoto. 1996. Biosynthesis of 24b-Alkyl-D25-sterols in Hairy Roots of *Ajuga reptans* var. *atropurpurea*. Phytochemistry 41 (4): 1057-1064.
 Yaota, Y., K. Amemiya, H. Ohnuma, K. Furumura, A. Masaki, T. Matsuki & M. Kikuchi. 1998. Sterol constituents from five edible mushroom. Chem. Pharm. Bull. 46 (6): 944-950.

PATTERNS OF SPONGE (PORIFERA, DEMOSPONGIAE) DISTRIBUTION IN REMOTE, OCEANIC REEF COMPLEXES OF THE SOUTHWESTERN CARIBBEAN¹

by

Sven Zea²

Abstract

Zea, S.: Patterns of sponge (Porifera, Demospongiae) distribution in remote, oceanic reef complexes of the Southwestern Caribbean. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **25**(97): 579-592, 2001. ISSN 0370-3908.

Sponge abundance data were obtained in depths from 2.5 to 22 m at Albuquerque Cays, Serrana Bank and Roncador Bank, three remote atolls of the Southwestern Caribbean Sea (San Andrés and Old Providence Archipelago, Colombia). Although the number of sponge species (96 overall, 52 to 61 per atoll) was comparable to that in reef areas in the continental shelves, the density (atoll means 22.5 to 58.3 ind.20m⁻²) was noticeably lower, possibly due to lower amounts of suspended organic matter. Cluster and Correspondence Analyses of stations showed that sponge distribution patterns were apparently stochastic, both at small and large scale, and only weakly related to major environmental variables. Inverse Analysis, however, revealed that the majority of sponges had marked habitat preferences, but that their within-habitat distribution was patchy. Short-distance dispersal of free-living larvae and migration of adults by rafting, coupled to the remoteness of the atolls, implies that the identity and timing of arrival of propagules is a random event. Together, the local proliferation of founder populations and the haphazard effect of perturbations, give rise to a strong heterogeneity, in a scale of tens of meters to hundreds of kilometers, in the dominance within the same habitat type.

Key words: Sponges, Porifera, Distribution, Stochastic, Caribbean.

-
- ¹ Work presented to assume as Corresponding Member of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences, Cartagena, September 7, 2001. Contribution 710 of Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives De Andreis - INVEMAR, and 186 of the Marine Biology Graduate Program, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.
 - ² Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia (Departamento de Biología) - INVEMAR, Cerro Punta de Betín, AA 10-16, Santa Marta, Colombia, szea@invemar.org.co.

Resumen

Se obtuvieron datos de abundancia de esponjas en profundidades entre 2.5 y 22 m en Cayos Albuquerque, Banco Serrana y Banco Rondador, tres atolones remotos del Caribe suroccidental, (Archipiélago de San Andrés y Providencia, Colombia). Aunque el número de especies de esponjas (96 en total, 52 a 61 por atolón) fue comparable con el de arrecifes en plataformas continentales, la densidad (promedios por atolón de 22.5 a 58.3 ind./20m²) fue notablemente más baja, posiblemente debido a menores cantidad de materia orgánica en suspensión. Análisis de Clasificación y de Correspondencia de las estaciones mostró que los esquemas de distribución de las esponjas son aparentemente estocásticos, tanto a pequeña como a gran escala, y apenas débilmente relacionados con las variables ambientales principales. Empero, Análisis Inverso reveló que la mayoría de las especies presentaron preferencias marcadas por el hábitat, pero su distribución dentro de cada uno fue en mosaico. Dispersión a corta distancia de las larvas y migración por balseo de los adultos, aunado a lo remoto de los atolones, hace que la identidad y el momento de arribo de propágulos sea un evento azaroso. Juntos, la proliferación local de las poblaciones fundadoras y el efecto azaroso de perturbaciones, producen una fuerte heterogeneidad, en una escala de decenas de metros a centenares de kilómetros, en la dominancia dentro de un mismo tipo de hábitat.

Palabras clave: Esponjas, Porifera, Distribución, Estocástico, Caribe.

Problem

Sponges are important benthic components of reef environments in the Caribbean Sea. They are quite abundant, and can grow especially large in the deeper parts of the reefs, below about 15-20 m; in shallow areas, they are usually found in cryptic, non-exposed sides of corals and hard substrata (Goreau, 1967; Sarà & Valecet, 1973; Vasseur, 1985; Álvarez *et al.*, 1990; Díaz *et al.*, 1990; Schmahl, 1990; Schubauer *et al.*, 1990; Zea, 1993a; Maldonado & Young, 1996a). These patterns are explained by the faster growth rates of photosynthetic organisms like algae and corals, which in well illuminated habitats, outgrow and smother sponge recruits and juveniles (Wilkinson & Trott, 1985; Zea, 1993a, 1993b). Strong turbulence from surge may also contribute in preventing sponges from becoming abundant or grow tall in shallow areas (Sarà *et al.*, 1979; Schmahl, 1990; Muricy *et al.*, 1991; Parra & Zea, submitted). Mid-depth (4-15 m), calm, slightly turbid reef lagoons may also harbor important sponge populations (Wiedenmayer, 1977; Bonem & Stanley, 1977; Maldonado & Young, 1998).

While carrying out baseline surveys of coral reefs in remote, oceanic islands and atolls of the Southwestern Caribbean Sea (see Díaz *et al.*, 1995; 1996a; 2000), it became evident that there was a great deal of heterogeneity in sponge composition and abundance in physiognomically similar stations within a given reef zone, more than expected from previous experience in continental reefs. In this paper, the patterns of sponge distribution and abundance in three remote, oceanic

Caribbean atolls are described, and their strong stochastic component is interpreted in terms of paucity of dispersal coupled to happenstance events after colonization.

Study area

The Archipelago of San Andrés and Old Providence, Colombia, comprises a series of oceanic islands, atolls and coral shoals lined up in a NNE direction and extending over nearly 500 km along the Lower Nicaraguan Rise off the Central American Continental Shelf (Fig. 1) (Geister, 1975; 1992; Kocurko, 1977; Díaz *et al.*, 1995; Geister & Díaz, 1996). Both geomorphologic and ecological zonation patterns are quite similar among these reef-complexes, governed mainly by the effect of a northeast trade wind fetch of over two-thousand kilometers (Geister, 1975, 1977, 1983; 1992; Díaz *et al.*, 1996b).

From east to west, five main geomorphologic features are evident in the upper atoll platform (Fig. 2). (a) An abrasional windward fore-reef terrace with poor coral development of mixed diversity, and profuse gorgonian growth. (b) The emergent windward peripheral reef of hydrocorals, zoanthids and crustose coralline algae. (c) The lagoonal basin with patch, ribbon and anastomosed reefs, dominated by the *Montastraea* spp. coral species complex. (d) A series of detached peripheral reefs, some crown with crustose coralline algal pavements or with ramose *Acropora palmata* and cerebroid *Diploria strigosa* corals, interspersed over the shallow areas of the leeward margin of the lagoon. (e) The leeward fore-reef terrace, rather bare in shallow sites and with diverse, developed

carpets of mixed coral species in deeper waters (see also Díaz *et al.*, 1996b, and Sánchez *et al.*, 1997).

Materials and methods

Three atolls, one in the southern side and two in the northern side of the Archipelago, were surveyed for sponge density on board R/V Ancón from INVEMAR, Santa Marta. The southernmost atoll, Albuquerque Cays, was surveyed during May to June 1994. The other two, Serrana Bank and Roncador Bank, were surveyed from May to June 1995. Five reef zones were sampled: (1) the deeper parts (15-22 m) of the windward fore-reef terrace (FT), (2) shallow (2.5-4 m), protected lagoonal patch reefs of the *Montastraea* spp. - *Acropora cervicornis* type (LS), (3) mid-depth to deep (4-14 m), lagoonal ribbon and anastomosed reefs of the *Montastraea* spp. type (LD), (4) shallow areas (6-9 m) of the leeward terrace with sparse coral growth (TS) and, (5) deep areas (15-18 m) of the leeward fore-reef terrace and the upper reef slope (TD). Neither at the windward peripheral reef (0-4 m in depth) nor at the shallow exposed *Acropora palmata* - *Diploria strigosa* lagoonal and leeward peripheral reefs (0-3 m in depth), detailed censuses of sponge density were carried out due to turbulence and shallowness.

Forty-two stations were surveyed by SCUBA, each spanning a plot of about 20 x 20 m of homogeneous coral composition, located in depths between about 2.5 m and 22 m. In each station, three 10 m-long chains were laid over the bottom, following its relief, in parallel to each other and to the depth contour. Individuals of each sponge species were visually counted by moving over a 1 m-wide belt transect along each chain. The width of the transect was judged by a hand-held, 1 m-long rod. Species were visually identified in the field, and fragments of those posing difficulties were collected for closer examination on board and in the laboratory. These are being deposited at the INVEMAR sponge collection. A list of all sponges found within the whole plot was also made. Additional reef community data were obtained by the author and other team divers, either from visual observations over the whole plot (total percent live coral cover, proportion of dead coral [from total live + dead], and total sponge cover), or from the percentage of chain links overlaying a given type of sessile organism (total percent cover of sponges, live coral, algal forms, or other animals). The latter data were obtained from the analysis of in-situ close-up video images recorded while swimming over the chains. Stations were ranked qualitatively from 0 to 3 in their degree of exposure to waves (0=null, 1=low, 2=mid, 3=high) according to their placement in relation to the

predominant direction of the wind and waves, and their depth. The median depth of each station was taken as a variable for the analyses. A rugosity index, representing the overall relief of the bottom, was calculated from the ratio of the total chain length (10 m) to the straight line between its extremes, which was measured in-situ with a metered tape. All data from the 3 belt transects were pooled in a single value. Sponge density was normalized as number of individuals in 20 m². The area censused in each station (3 belt transects combined) varied between 17.3 m² and 27.0 m². On average, only 69.7±2.1 % (±1 standard error) of the species observed in the entire area of each station were found within the belt transects (range 36 % to 100 %). However, as in most sponge communities (e.g. Álvarez *et al.*, 1990; Díaz *et al.*, 1990; Valderrama, 2001), there were a few to several abundant species, and many rare ones. Hence, the censused area was large enough to estimate the abundance of the dominant species in each station, and thus was considered representative to describe the local sponge community.

To determine whether the patterns of species composition and abundance of sponges across stations were related to reef zonation, environmental variables and other benthic community components, stations were grouped by Normal Cluster Analyses according to (1) species composition (Jackard's similarity index) and, (2) species density ($\log_{10}[x+1]$ transformation, Bray-Curtis distance index), in both cases using the unweighed pair group average clustering method (Dunn & Everitt, 1982; Field *et al.*, 1982; Digby & Kempton, 1987). Further ordination of stations was carried out on untransformed density data using Detrended Reciprocal Averaging -DRA (cf. Pimentel & Smith, 1985; = Detrended Correspondence Analysis, cf. Hill, 1979), with the option of down weighing the effect of rare species. DRA station scores for the first four axes were correlated to the environmental variables to find those possibly influencing the patterns of sponge distribution, and to raw species densities to find those species associated with the patterns. Non-parametric, Spearman rank correlation coefficients were used (Siegel & Castellan, 1988).

Species characteristic to the various reef zones were found using the Kaandorp (1986) and de Kluijver (1991) Inverse Analysis. Mean densities and frequencies of occurrence (percentage of stations where the species occurred) in each sampled reef zone were recalculated for each species. Characteristic species were those having 70% to 90% of their cumulative density (from highest to lowest) within a zone or group of zones (grouped according to geomorphology and/or environmental variables).

Total per-station sponge densities were compared between reef zones and atolls by a 2-way ANOVA and Scheffe's multiple comparisons tests. Given the scarcity of data for some of the zones, only the windward fore-reef terrace (FT), deep lagoon (LD) and leeward fore-reef terrace (TD) were compared in this test. Type III sums of squares were used to account for the unbalanced replication (SAS Institute, 1981). Homogeneity of cell (reef zone*atoll combination) variances and normality of data were checked by the Bartlett's and Kolmogorov-Smirnov tests, respectively (Sokal & Rohlf, 1981).

Results

Patterns of species distribution

Ninety six sponge species or morphotypes were found in the belt transects. The greatest overall densities (mean of all 42 stations) were found in *Pseudaxinella zeai* (3.8 ind.20m⁻²), *Ectyoplasia ferox* (2.5 ind.20m⁻²), *Cliona* sp. 1 (a morphotype of the *Cliona aprica* – *C. langae* – *C. caribbaea* species complex, 2.5 ind.20m⁻²), *Aplysina archeri* (2.2 ind.20m⁻²), *Agelas dispar* (dark brown morphotype, 2.1 ind.20m⁻²), *Agelas sventres* (1.9 ind.20m⁻²), *Aka brevitubulata* (1.9 ind.20m⁻²), *Scopalina ruetzleri* (1.8 ind.20m⁻²), *Ailochroia crassa* (1.8 ind.20m⁻²), *Aplysina fulva* (1.2 ind.20m⁻²), and *Aplysina fistularis* (1.1 ind.20m⁻²). The species with the highest abundances wherever they occurred were *Agelas sventres* (mean 27.1 ind.20m⁻² in 3 stations), *Pseudaxinella zeai* (mean 16.0 ind.20m⁻² in 10 stations), *Agelas wiedenmayeri* (mean 12.5 ind.20m⁻² in 3 stations), and *Ulosa funicularis* (mean 7.1 ind.20m⁻² in 4 stations). The number of sponge species in the three transects of each station varied between 4 and 26, while total sponge density varied between 5.6 and 126 ind.20m⁻².

The Cluster Analysis of stations by the density of their constitutive sponge species (Fig. 3) yielded groups of stations with no consistent relationship to reef zone, depth, degree of wave exposure or atoll. The same occurred in the classification of station by species presence-absence (not shown). In the classification by density, some groups included stations located at one atoll, but belonging to different ecological regimes. For example, all stations of Group D were from Roncador, but across four different reef zones. Group C included mostly Serrana deep stations, but from both the calm lagoon and the wave-exposed, windward fore-reef terrace (Fig. 3).

In the ordination of the data by DRA, axis 1 accounted for 39.7% of the variance in sponge abundance, while axis 2 to 4 accounted for 25.1%, 18.9% and 16.4%,

respectively. This broad dispersion of variance among axes indicated a great deal of heterogeneity in sponge distribution patterns. Nevertheless, in contrast to the results by the Cluster Analyses, a weak pattern of distribution in relation to certain prevalent environmental conditions emerged with DRA. Stations of the five reef zones sampled both overlapped and were segregated in the ordination space of the first two DRA axes (Fig. 4A). Also, Roncador stations certainly segregated on one side (Fig. 4B), indicating a geographical component in sponge distribution and abundance. Stations were also slightly segregated by depth (Fig. 4C), and depth was significantly correlated to ordination axis 2 scores ($r_2 = +0.44$, $p = 0.005$, $n = 42$), with the shallower stations located mainly on the lower side of the ordination space. The degree of wave exposure was also segregated in the ordination space (Fig. 4D), being significantly correlated to axis 1 scores, although in a lower degree than depth ($r_1 = +0.37$, $p = 0.02$, $n = 42$). Other variables such as cover of live and dead coral, cover of algal forms, and rugosity, were not correlated to the ordination space. The density of only three sponge species was found to be correlated to axis 1 scores, and thus to the degree of wave exposure (*Aplysina archeri*, $r_1 = -0.73$, $p = 0.0000$; *Mycale laevis*, $r_1 = +0.32$, $p = 0.04$; *Aplysina, cauliformis*, $r_1 = -0.35$, $p = 0.02$), and only two were correlated to the second axis, and hence to depth (*Aplysina archeri*, $r_2 = +0.44$, $p = 0.005$; *Amphimedon compressa*, $r_2 = +0.33$, $p = 0.04$). The total cover of sponges was also significantly correlated to axis 2 ($r = +0.37$, $p = 0.02$).

In Table 1, the results of the Inverse Analysis to find species characteristic to the various reef zones are shown. The rectangles mark those reef zones or group of zones (according to geomorphology and/or environmental variables) within which each species is characteristic, i.e., is included within 70% (boldfaced) to 90% (boldfaced italics) of its cumulative density (from greatest to lowest). Underlined data indicate that a species occurs in the reef zone in more than 60% of its stations. Overall mean densities per atoll are also included.

Twenty-one species were found to be eurytopic (Table 1A), living either in all reef zones (6 species) or in diverse and extreme environmental conditions. Remarkably, very few values are underlined, indicating that most species occurred in a few the stations at each reef zone.

For most of the remaining species, there were definitely certain ecological preferences. In Table 1B the 22 species characteristic to deep waters are highlighted. Note again, nevertheless, that only two species had a frequency of occurrence larger than 60% in one (*Niphates digitalis*) or

Table 1. Inverse Analysis. Mean density (± 1 standard error) for each sponge at each reef zone (across atolls) and each atoll (across reef zones). The rectangles mark those reef zones or groups of zones (according to geomorphology and/or environmental variables) to which each species is characteristic, i.e., including 70% (boldfaced) to 90% (boldfaced italics) of each species cumulative density (from greatest to lowest). Underlined data indicate that the species occurs in the reef zone in more than 60% of its sampled stations. A. Eurytopic species, B. Deep-water species, C. Fore-reef terrace species, D. Lagoon species, E. Shallow lagoon species, F. Leeward species, G. Species living in turbulent sites

	Windward fore-reef terrace	Lagoon shallow (protected)	Lagoon deep	Leeward shallow terrace	Leeward fore-reef terrace	Albuquerque Cays	Serrana Bank	Roncador Bank	
Code	FT	LS	LD	TS	TD	ALB	SER	RON	
# of stations	8	3	21	2	8	10	15	17	
C. Fore-reef terrace species									
<i>Aplysina cauliformis</i> , tubes	2,71 \pm 1,11	-	0,29	0,17	-	1,43 \pm 0,98	0,09 \pm 0,09	0,68 \pm 0,32	1,65 \pm 0,61
<i>Hyrtios proteus</i>	0,11 \pm 0,11	-	-	-	-	0,16 \pm 0,15	-	0,05 \pm 0,05	
<i>Ircinia</i> sp. 2, dirty	0,51 \pm 0,27	-	-	-	-	0,34 \pm 0,34	0,34 \pm 0,19	0,10 \pm 0,10	
<i>Mycale laxissima</i>	0,21 \pm 0,21	-	0,04 \pm 0,04	-	-	0,22 \pm 0,15	0,16 \pm 0,11	0,11 \pm 0,07	
<i>Phorbas amaranthus</i>	0,42 \pm 0,22	-	0,05 \pm 0,05	-	-	0,67 \pm 0,32	0,18 \pm 0,11	0,11 \pm 0,07	
<i>Plakinastrella onkodes</i>	0,20 \pm 0,13	-	-	-	-	0,10 \pm 0,10	0,08 \pm 0,08	0,05 \pm 0,05	
<i>Pachypellina podatypa</i>	0,35 \pm 0,23	-	-	-	-	0,26 \pm 0,26	-	0,11 \pm 0,10	
? <i>Pseudaxinella</i> ?n.sp.1	0,11 \pm 0,11	-	-	-	-	0,12 \pm 0,11	0,12 \pm 0,07	-	
Windward fore-reef terrace									
<i>Agelas clathroides</i>	0,20 \pm 0,13	-	-	-	-	-	0,11 \pm 0,07	-	
<i>Aka coralliphaga</i>	0,21 \pm 0,21	-	-	-	-	-	0,11 \pm 0,11	-	
<i>Agelas sventres</i>	10,18 \pm 6,10	-	-	-	-	-	0,37 \pm 0,35	4,47 \pm 2,87	
<i>Agelas sceptrum</i>	0,09 \pm 0,09	-	-	-	-	0,07 \pm 0,07	-	-	
<i>Agelas wiedenmayeri</i>	4,68 \pm 2,77	-	-	-	-	0,30 \pm 0,28	-	2,03 \pm 1,31	
<i>Callyspongia plicifera</i>	0,11 \pm 0,11	-	-	-	-	-	0,06 \pm 0,05	-	
<i>Clathria spinosa</i>	0,11 \pm 0,11	-	-	-	-	-	-	0,05 \pm 0,05	
<i>Eurypon laughlini</i>	0,20 \pm 0,20	-	-	-	-	-	0,10 \pm 0,10	-	
Black indet. sponge	0,12 \pm 0,11	-	-	-	-	0,09 \pm 0,09	-	-	
<i>Geodia neptuni</i>	0,54 \pm 0,31	-	-	-	-	-	0,21 \pm 0,15	0,07 \pm 0,07	
<i>Halisarca coerulea</i>	0,11 \pm 0,11	-	-	-	-	-	0,06 \pm 0,05	-	
<i>Jaspis</i> sp. 1	0,10 \pm 0,10	-	-	-	-	-	0,05 \pm 0,05	-	
<i>Myrmekioderma gyroderma</i>	0,10 \pm 0,10	-	-	-	-	-	-	0,05 \pm 0,05	
<i>Plakortis angulospiculatus</i>	0,24 \pm 0,16	-	-	-	-	0,07 \pm 0,07	-	0,07 \pm 0,07	
<i>Ptilocaulis marquezii</i>	0,30 \pm 0,30	-	-	-	-	-	-	0,14 \pm 0,14	
? <i>Pseudaxinella</i> ?n.sp. 2	0,20 \pm 0,13	-	-	-	-	0,07 \pm 0,07	0,06 \pm 0,05	-	
<i>Pseudaxinella tubulosa</i>	0,21 \pm 0,21	-	-	-	-	-	0,11 \pm 0,11	-	
<i>Strongylacidon</i> sp. 2, red	0,11 \pm 0,11	-	-	-	-	-	-	0,05 \pm 0,05	
<i>Topsentia ophiuraphidites</i>	0,72 \pm 0,72	-	0,04 \pm 0,04	-	-	-	0,06 \pm 0,06	0,34 \pm 0,33	
Leeward fore-reef terrace									
<i>Clathria bulbotoxa</i>	-	-	-	-	0,36 \pm 0,26	0,08 \pm 0,08	-	0,12 \pm 0,12	
Encrust. indet sponge	-	-	-	-	0,11 \pm 0,11	0,09 \pm 0,09	-	-	
Haplosclerida indet sp. 1	-	-	-	-	0,56 \pm 0,56	-	0,30 \pm 0,29	-	
<i>Xestospongia</i> sp. 2	-	-	-	-	0,12 \pm 0,11	-	0,06 \pm 0,06	-	
<i>Xestospongia muta</i>	-	-	-	-	0,19 \pm 0,19	-	0,10 \pm 0,10	-	

two (*Ailochroia crassa*) reef zones. Thus, most of all these species, although always found in deep water, were patchily and sparsely found in the studied atolls.

Thirty-two species were characteristic to the fore-reef terraces (Table 1C), 8 found both in the windward and the

leeward, 19 exclusive to the windward and 5 to the windward terraces. Again, the low frequency of occurrence is noticeable. Likewise, 14 species were characteristic to the lagoon, 2 in general, 1 to the shallow and 11 to the deep lagoon (Table 1D). There were also species found

preferentially in shallow waters, others in the leeward side of atolls, and still others in the most turbulent sites sampled (Table 1E to G).

The three atolls shared 32 species (Table 1). Overall, 59 species occurred in at least two atolls, while 37 were found exclusively in one atoll. A geographical component in the distribution of some species was evident: while Serrana and Roncador Banks, closer together in the northern part of the San Andrés Archipelago, shared exclusively 14 species, Albuquerque, far to the south, shared exclusively only 7 species with Serrana and 4 species with Roncador. Interestingly, although Roncador Bank stations appeared segregated from Albuquerque and Serrana stations in the ordination space (Fig. 4B), it was not due to the presence there of many unique species (only 10 there, vs. 7 at Albuquerque and 20 at Serrana), but to differences in the abundance of most common forms (Table 1).

The conclusions of these analyses are that, besides some widespread and eurytopic species, most sponges have ecological preferences in relation to depth and degree of wave exposure, which are the main factors determining reef physiognomy. However, their occurrence in any given reef zone is rather heterogeneous and patchy at the scale of tens of meters to hundreds of kilometers. As one moved several tens to a few hundreds of meters within a physiognomically homogeneous reef zone, the pattern of dominance changed from one species to another; also, as one moved to another atoll in the same reef zone, yet another species, however widely distributed, was the numerical dominant. Additionally, no single proximate factor in the current bottom composition of the reefs (e.g.,

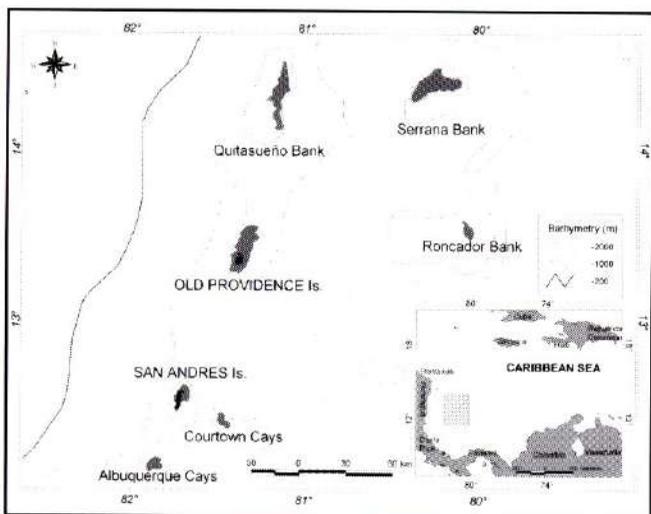


Figure 1 Map of the Southwestern Caribbean Sea with the location of Colombian islands, atolls and banks.

coral cover, coral death, algal cover, bottom rugosity, etc.) seemed to affect sponge distribution.

Total density and species richness

Differences between reef zones in total sponge density per-station also depended on the atoll (Fig. 5), due to a significant interaction between reef zone and atoll (2-way ANOVA comparing windward fore-reef terrace, deep lagoon and leeward fore-reef terrace zones across the 3 atolls, $F=3.689$, $p=0.02$). At the windward fore-reef terrace, Roncador had the greatest mean density (100.8 ind./20m²), while at the deep lagoon, the highest mean density occurred at Serrana (64.6 ind./20m²) (Fig. 5A). However, only at this latter zone there were significant differences in density between atolls (Scheffe multiple comparison, $p<0.05$). Overall (Fig. 5B), the windward fore-reef terrace and Serrana Bank showed the greatest density (69.4 ind./20 m² and 58.3 ind./20m², respectively).

Regarding number of species, the total number was in general higher at Serrana for all reef zones, excepting the

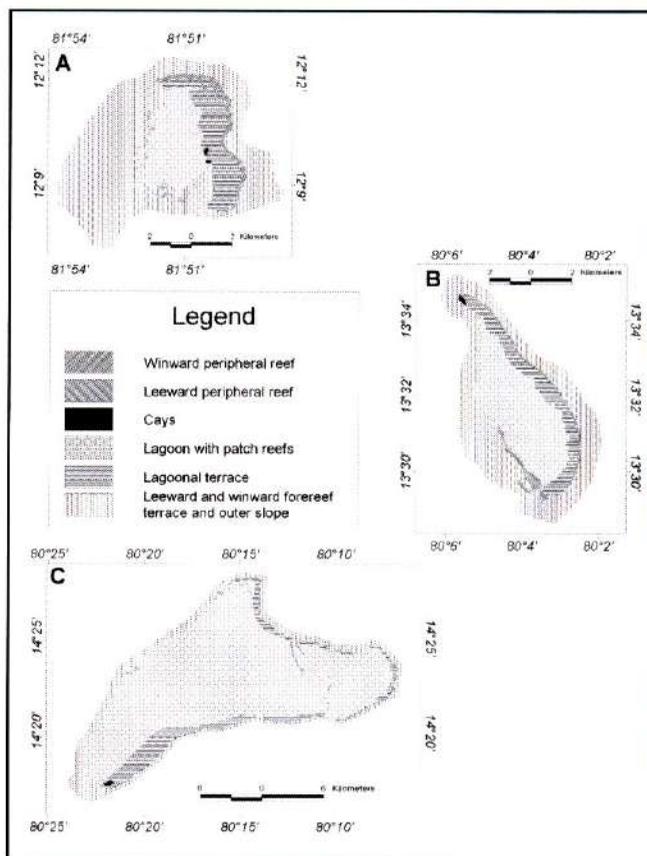


Figure 2. Geomorphologic features of studied atolls. A. Albuquerque Cays. B. Roncador Bank. C. Serrana Bank.

leeward shallow terrace (Figs. 5C), and in total (Fig. 5D, 74 species at Serrana vs. 52 at Albuquerque and 61 at Roncador). Also, as expected, in general the deeper reef zones held a greater diversity of sponges (Fig. 5D).

Discussion

The generally lower densities of sponges found at the studied atolls, in comparison to those found in reef areas

on the continental shelves, are probably due to the effect of lower amounts of suspended organic matter in oceanic islands and banks. As most oceanic and continental Caribbean sponges are predominantly filter-feeding to mixotrophic (i.e., depend more on filtration than on photosynthates from endosymbionts, in contrast to Indo-Pacific oceanic sponges being predominantly phototrophic), less suspended material in oceanic areas implies less food and hence lower densities (cf. Wilkinson, 1987;

Group - Station - Atoll - Reef zone

A 26	ALB	LD	-----I-----I
A 31	ALB	LD	-----I-----I
A 29	ALB	LD	-----I-----I
A 46	ALB	LD	-----I-----I
A 79	SER	LD	-----I-----I
A 80	SER	LD	-----I-----I
A 89	SER	LS	-----I-----I

B 28	ALB	LD	-----I-----I
B 33	ALB	LD	-----I-----I
B 34	ALB	FT	-----I-----I
B 37	ALB	TD	-----I-----I
B 94	SER	FT	-----I-----I
B 97	SER	TD	-----I-----I

C 83	SER	FT	-----I-----I
C 100	SER	LD	-----I-----I
C 113	SER	LD	-----I-----I
C 114	RON	LD	-----I-----I
C 87	SER	TD	-----I-----I
C 101	SER	LD	-----I-----I
C 84	SER	LD	-----I-----I
C 85	SER	LD	-----I-----I
C 93	SER	LD	-----I-----I
C 98	SER	LD	-----I-----I

D 105	RON	TS	-----I-----I
D 106	RON	TD	-----I-----I
D 109	RON	FT	-----I-----I
D 110	RON	LD	-----I-----I
D 116	RON	LD	-----I-----I
D 117	RON	TD	-----I-----I
D 122	RON	TD	-----I-----I

E 47	ALB	FT	-----I-----I
E 91	SER	FT	-----I-----I
E 120	RON	FT	-----I-----I
E 123	RON	FT	-----I-----I
E 127	RON	TD	-----I-----I
E 121	RON	LD	-----I-----I

F 107	RON	LS	-----I-----I
F 108	RON	LD	-----I-----I
F 118	RON	LS	-----I-----I

G 36	ALB	TD	-----I-----I
G 81	SER	TS	-----I-----I
G 112	RON	LD	-----I-----I

Atoll:

ALB = Albuquerque Cays
SER = Serrana Bank
RON = Roncador Bank

Reef Zone:

FT = windward fore-reef terrace
LS = lagoon, shallow protected
LD = lagoon, deep
TS = leeward shallow terrace
TD = leeward fore-reef terrace

Figure 3. Cluster Analysis of studied stations. Codes A to G are groups of stations defined by their analysis. For each station, its number, and the atoll and reef zone where they belong, are given.

Wilkinson & Cheshire, 1989; 1990). For example, mean sponge densities (measured with the same method employed here) of 87.2 ind.20m⁻² have been found at Urabá Gulf, in the boundary between South and Central America in the Caribbean (Valderrama & Zea, submitted), in comparison to the per-atoll means of 22.5 ind.20m⁻² to 58.3 ind.20m⁻² found in this study. A similar pattern of greater densities in sites closer to continental runoff has been found in the ubiquitous Caribbean sponge genus

Ircinia (Parra & Zea, submitted). Northern Cuba offshore reefs also harbor larger populations (Alcolado, 1999). However, greater water transparency and lower suspended food in the oceanic atolls seem to favor high overall (e.g. *Pseudaxinella zeai*, *Cliona aprica* – *C. langae* – *C. caribbaea*, *Aplysina archeri*) or local (*Pseudaxinella zeai*, *Agelas wiedenmayeri*, *Ulosa funicularis*) densities of mixotrophic species with photosynthetic endosymbionts (see Rützler, 1990; Vicente, 1990), while

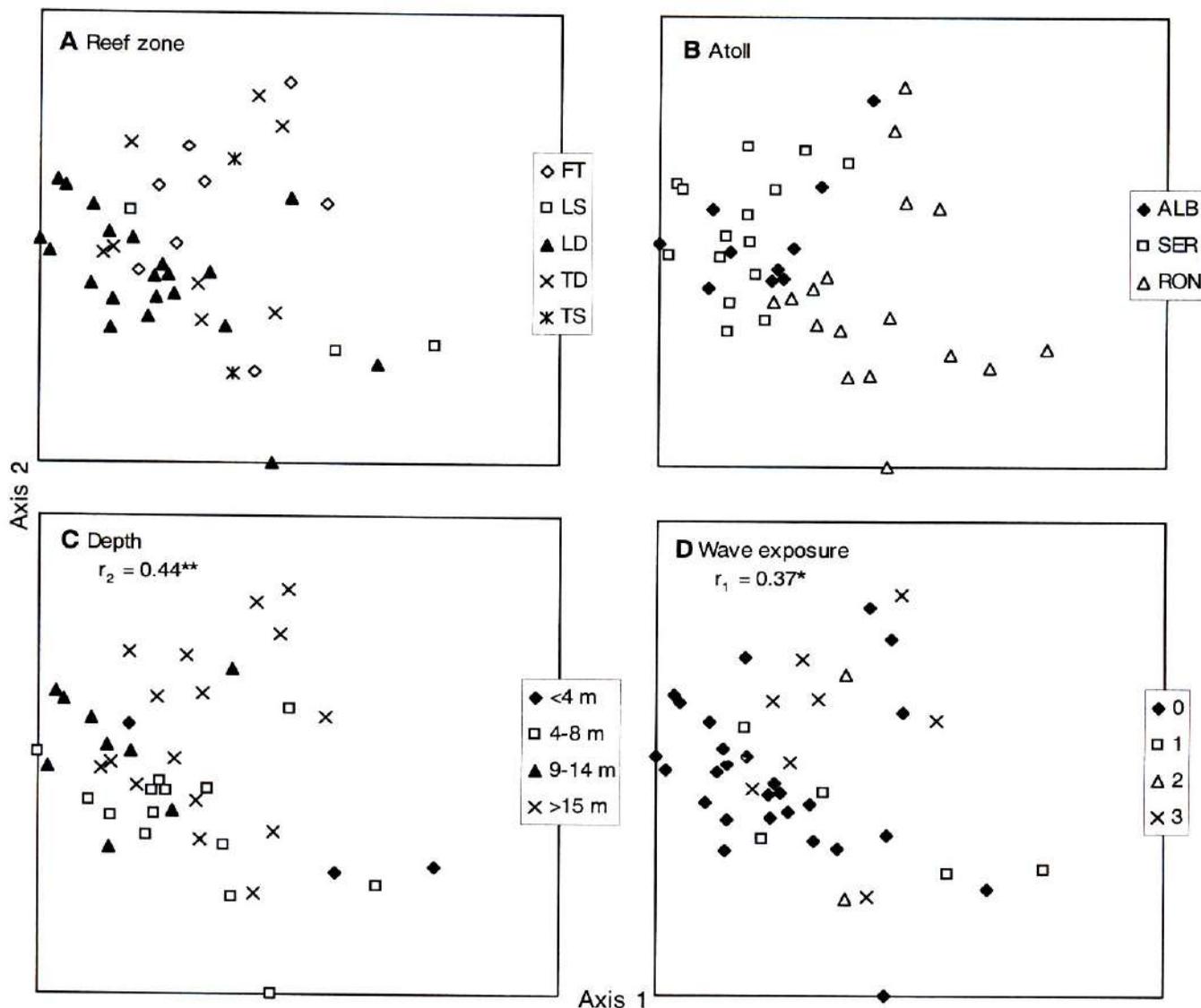


Figure 4. Detrended Reciprocal Averaging (DRA) ordination plot of the first two axes. For each plot, the points represent the position of each of the 42 stations in the ordination space; symbols represent reef zones (A), atoll (B), depth ranges (C), and degree of wave exposure (D). For wave exposure ranks, see materials and methods text. Reef zone and atoll codes are those of Fig. 3.

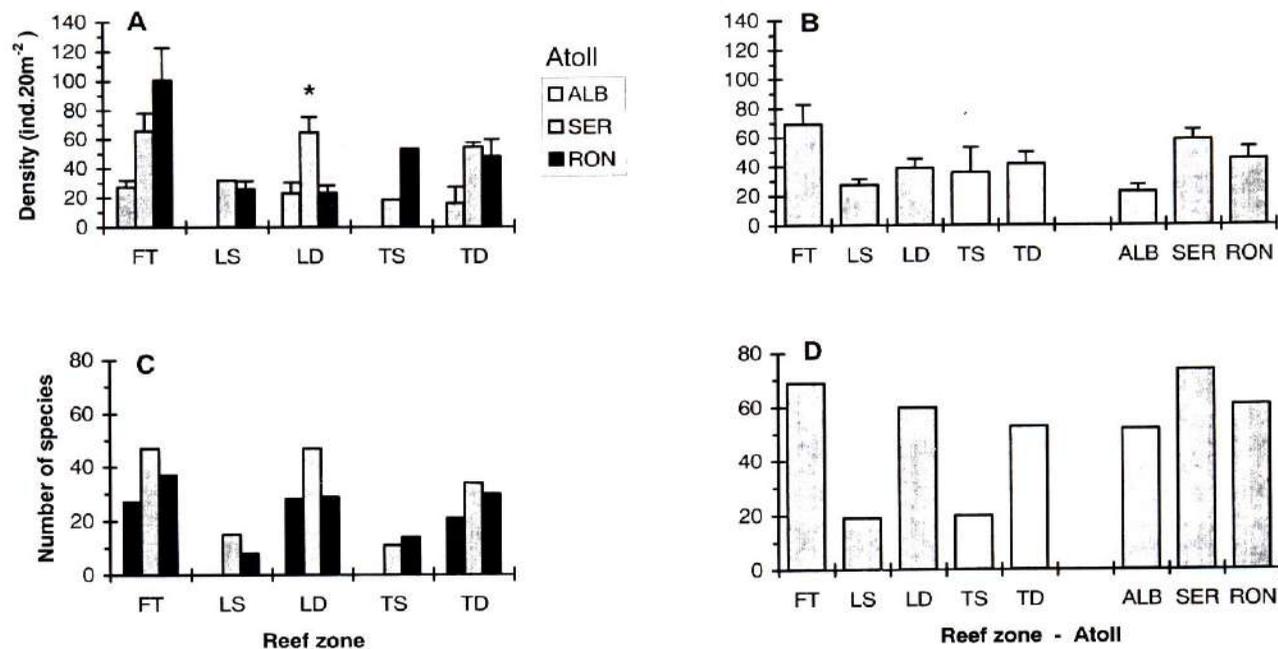


Figure 5. Mean sponge density (A) for each reef zone within each atoll, and (B) overall for each reef zone and atoll (error bars are +1 standard error). Total number of sponge species (C) for each reef zone within each atoll, and (D) overall for each reef zone and atoll. *= atoll significantly different from the others at a given zone (Scheffe multiple comparison within the reef zone, $P < 0.05$, after two-way ANOVA comparing only FT, LD and TD zones). Codes as in Fig. 3.

entirely heterotrophic sponges are more favored in areas exposed to continental runoff (see **Valderrama, 2001, Valderrama & Zea**, submitted).

In contrast to density, species richness in the studied oceanic atolls is not particularly different from other oceanic or continental areas. This occurs because the density is more evenly spread among several species in the atolls, being more concentrated in a few species in other denser areas (see **Valderrama & Zea**, submitted).

Usually, most studies of sponge distribution patterns within a type of community (e.g., reef, rocky shore, seagrass, mangrove, soft bottom) have found a close relationship between these patterns and the predominant, local or widespread, abiotic and/or biotic environmental variables. Recurrent and consistent patterns of sponge distribution at a small to mid scale (e.g., centimeters to hundreds of meters) have been attributed to various environmental variables, the most important being the depth gradient (wave-exposure, abrasion, light regime and

competition with photosynthetic organisms, contrasting surface water conditions), the availability of vertical to overhanging and cryptic habitats, closeness to runoff or pollution sources, distance from shore, and larval behavior and dispersal (e.g., **Rützler, 1972; Sarà & Valecet, 1973; Vasseur, 1985; Alcolado & Herrera, 1987; Alcolado, 1985; 1989; Muricy, 1989; Wilkinson & Cheshire, 1989; Álvarez et al., 1990; Díaz et al., 1990; Schmahl, 1990; Muricy et al., 1991; Zea, 1993a; Maldonado & Young, 1996a; Uriz et al., 1998; Lehnert & Fischer, 1999; de Voogd et al., 1999; Valderrama, 2001**). However, some studies have hinted a degree of heterogeneity at both larger and smaller scales, unexplained by the direct effect of environmental variables. At the larger scale, for example, **Reed & Pomponi (1997)** found that the diversity of deep reef and upper continental slope throughout most of the Bahamas is highly variable despite the similarity of the environmental variables across the full geographic range. In summarizing sponge distribution patterns across several Cuban reefs, **Alcolado (1990)** found it difficult to predict

which species would dominate in any given reef site not continuously subjected to extreme conditions (e.g., turbulence, pollution). **Alcolado** (1999), also reported the existence of a stochastic component of species distribution, especially in deep (>10 m) reef localities, throughout a 456 km-long reef tract off Northern Cuba. **de Voogd et al.** (1999) were able to attribute cross-shelf sponge distribution patterns Indonesian reefs to several environmental variables, but found heterogeneity in the distribution of species in a relatively large subset of the sampled stations. **Panzini & Pronzato** (1985) encountered unpredictable sponge distribution patterns across rather uniform sea-grass meadows in the Mediterranean. **van Soest** (1993) found dramatic changes in species composition and abundance in similar soft bottoms in the Mauritanian shelf in West Africa, due in part to a restricted exchange of larvae across a mud barrier separating them. Unexplained heterogeneity at small scales has also been shown in several studies (e.g., **Alcolado**, 1979; **Muricy et al.**, 1991; **Rützler et al.**, 2000), usually attributed to the synergistic effect of various environmental variables or to the consequences of small-scale random factors related to larval dispersal and settlement (e.g., **Zea**, 1993b; **Uriz et al.**, 1998). Also, a great deal of local heterogeneity in species composition may be due to a high rate of individual (and partly of species) turnover through time, as some die and others recruit and grow (**Hughes**, 1996; **Wulff**, 1999). Hence, the degree of unexplained heterogeneity at a given scale depends on the balance between the various deterministic vs. stochastic processes shaping community structure (see **Alcolado**, 1999).

At the studied atolls, neither in the classification of stations by presence-absence of species, nor in the classification or ordination by species density, was there a clear pattern of sponge distribution in relation to major environmental variables at small (within reef zones) and large (across zones, between atolls) scale. Usually, presence-absence classification or ordination give information on the higher-scale processes affecting communities, while abundance classification or ordination yield a lower-scale effect of recent perturbation and recolonization events (**Allen & Starr**, 1982). In this case, a strong stochastic component in species distribution was evident at both scales. One could argue, on the other hand, that this lack of consistency in distribution is the result of not having normalized density data in terms of availability of those particular microhabitats that sponges prefer (e.g., crevices, bare substratum, etc.) (**Alcolado**, 1979; **Díaz et al.**, 1990; **González**, 1992). However, physiognomic features did not vary much within habitats both within and among atolls, due to the strong effect of

the predominant turbulence in shaping atoll reef geomorphology (**Díaz et al.**, 2000). In addition, abundance patterns were neither correlated to reef bottom components (which may somehow reflect availability of microhabitats), nor to bottom rugosity (which is correlated to availability of crevices).

The strong stochastic component of sponge distribution at the studied atolls can be interpreted in terms of dispersal. It has become evident that many sponge larvae do not disperse far from their mother. Some have negatively buoyant eggs that drop to the bottom after external fertilization, or that are released in strands of mucus which sink to the bottom close to their mother; yet some others have crawling larvae (**Reiswig**, 1976; **Ayling**, 1978, 1980; **Hoppe & Reichert**, 1987; **Hoppe**, 1988; **Fromont**, 1988; **Ilan & Loya**, 1990; **Maldonado & Young**, 1996b; **Maldonado et al.**, 1997; **Uriz et al.**, 1998; for cases of longer larval life see e.g., **Ilan & Loya**, 1988; **Kaye & Reiswig**, 1991; **Uriz et al.**, 1998). One also finds a trend of greater larval recruitment where the adults live in higher densities (**Zea**, 1993b), and of higher young mortality with longer swimming by the larvae (**Maldonado & Young**, 1999). Also, sponge larvae are seldom found in planktonic tows, and a bottom plankton sampler is needed to capture them (**Sarà & Vacelet**, 1973; **Rützler et al.**, 1980). This short-distance dispersal occurs in many non-solitary animals such as some stony corals, soft corals, bryozoans, and tunicates (**Jackson**, 1986). It implies that adults may be aggregated at a scale of decimeters to meters (e.g., **Díaz et al.**, 1990; **Alcolado**, 1989). Additionally, processes at the small scale may generate patterns at the larger scale. **Uriz et al.** (1998) found that the discontinuous geographic distribution and localized small-scale aggregation of one species of sponge in the Mediterranean were related to the very short-distance dispersal of its crawling larvae, while the geographical ubiquity and small-scale randomness of another species were due to larvae with greater dispersal capabilities.

The studied atolls, of Miocene origin (**Geister**, 1975; 1992), presumably were formed sufficiently long ago to allow the opportunity of most common Caribbean sponge species to be present, as it was found during this study (see species lists on Table I), arriving as larvae or as adults drafting in floating objects (cf. **Jackson**, 1986). However, given the presumed generalized paucity of dispersal, coupled to the relative remoteness of these atolls, the identity and timing of arrival of propagules becomes a random event. Thus, at the larger scale (hundreds of km), differences in species dominance between atolls are to be expected. Also, once a species arrives, it can spread locally

conforming a founder population. Hence, at a lower spatial scale (in reef zones within atolls), a patchiness in the density and dominance, as the one found, is to be expected. Moreover, after major disturbing events, like hurricanes, storms or epizootics, localized and discriminated extinctions can occur, as well as random dispersal by breaking and reattachment (Wilkinson & Cheshire, 1988; Wulff, 1995; 1999; Wilkinson & Thompson, 1997), allowing survival of some species or recolonization of a random sample of the spatially adjacent species pool, adding to the heterogeneity of sponge distribution. Hence, the strong stochastic component in sponge distribution created at lower scales (local colonization and perturbation) also has a strong effect at the higher scale in the studied atolls. This contrasts with the temporal stability of sponges at the community level (in terms of total cover, richness and diversity) in Jamaican deep reefs, which is maintained by constant recruitment and steady mortality (Hughes, 1996). Remoteness and greater exposure to waves and storms enhance the stochastic trends in sponge distribution in these atolls, in comparison to other areas.

At present it is difficult to interpret the striking difference in total sponge density among atolls, overall and for a given reef zone. Perhaps past disturbance events have lowered density; the lowest overall density at Albuquerque could have been a result of the near pass of Hurricane Joan in 1988. Also, the wide and open lagoon of Serrana Bank may allow a longer residency time of the waters and thus greater opportunity for planktonic blooms to occur and remain, providing additional food for benthic filter feeders.

Despite the strong stochastic component in sponge distribution, most species were found to have a certain preference for one or more reef zones, especially in relation to depth and degree of wave exposure, which are the main factors determining general reef physiognomy. This shows that predominant, biotic and/or abiotic environmental variables are also affecting sponge distribution in various ways. As expected, deeper reef areas hold a greater number of species and usually a greater density than shallower areas. On the other hand, current reef physiognomy and composition, which is the result of recent widespread disturbances (see Zea *et al.*, 1998) does not seem to be affecting sponge distribution, at least at the spatial and temporal scale it was studied, although an increase in sponge density may be expected as recent coral death continues to free hard bottom space (Zea, 1994, but see Hughes, 1996).

These results call for caution when using sponges as bioindicators. Stochastic heterogeneity at various scales

can confound results of simple observational studies comparing "pristine" with "impacted" sites. As is already being explored (e.g., Alcolado & Herrera, 1987; Muricy, 1989; Muricy *et al.*, 1991; Zea, 1994), it is first necessary to take into account the degree of response of the sponge community in general, and species in particular, to local deterministic forces.

Acknowledgments

This research was carried out within the framework of the project "Bioecological and environmental evaluation of reefal areas of the Colombian Caribbean, I", funded by the "Fondo Colombiano para el Fomento de la Ciencia y la Tecnología" – COLCIENCIAS (Grant Nr. CO-2105-09-023-93), and carried out by the Coral Reef Research Group of the "Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras" – INVEMAR. Team leader, Juan Manuel Díaz, and co-workers Jaime Garzón-Ferreira, Luz Stella Mejía, Guillermo Díaz-Pulido and Juan Armando Sánchez are sincerely thanked for their help and comradeship during the cruises, and for their effort in gathering the complementary field data. Thanks to their discussions on board I became aware and started to wonder about the strong random component seen in the sponge distribution. Captain José Polo and the crew of R/V Ancón were very helpful and hospitable, aiding me in one way or another to withstand the constant feeling of motion sickness while on board. Jörn Geister (Geologisches Institut, Universität Bern, Switzerland), provided valuable insights in oceanic reef geomorphology. My students Lina M. Barrios, Fernando Parra, Diego Valderrama and Mateo López have since made many tasks related to data organization and computer fiddling easier. The National University of Colombia has always given me ample research time. I am greatly indebted to INVEMAR, where I grew and matured as a professional scientist, for these 20 years of hospitality. I dedicate the honor of becoming a Corresponding Member of the Colombian Academy of Sciences to INVEMAR. Also to my wife and children, for their support and patience. And finally, to my mother, to make her proud of her years of dedication.

References

- Alcolado, P.M. 1979. Estructura ecológica de la comunidad de esponjas de un perfil costero de Cuba. *Cien. Biol.* 3: 105-127.
- . 1985. Estructura ecológica de las comunidades de esponjas en Punta del Este, Cuba. *Rep. Invest. Acad. Cienc. Cuba* 38: 1-65.
- . 1989. Estructura ecológica de las comunidades de esponjas del arrecife de Rincón de Ganabo, Cuba. *Rep. Invest. Inst. Oceanol.* 10: 1-16.

- _____. 1990. General features of Cuban sponge communities. In: Rützler, K. (ed.). *New perspectives in sponge biology*. Smithsonian Institution Press, Washington, DC, pp. 351-357.
- _____. 1999. Comunidades de esponjas de los arrecifes del archipiélago Sabana-Camagüey, Cuba. *Bol. Invest. Mar Cost.*, **28**: 95-124.
- & A. Herrera. 1987. Efectos de la contaminación sobre las comunidades de esponjas en el litoral de la Habana, Cuba. *Rep. Invest. Inst. Oceanol.* **68**: 1-17.
- Allen, T.F.H. & T.B. Starr. 1982. *Hierarchy, perspectives for ecological complexity*. Univ. Chicago Press, Chicago.
- Álvarez, B., M.C. Díaz, & R. Laughlin. 1990. The sponge fauna on a fringing coral reef in Venezuela, I: composition, distribution, and abundance. In: Rützler, K. (ed.). *New perspectives in sponge biology*. Smithsonian Institution Press, Washington, DC, pp. 358-366.
- Ayling, A.L. 1978. *Population biology and competitive interactions in subtidal sponge dominated communities of temperate waters*. Ph.D. Dissertation, Univ. Auckland, Auckland.
- _____. 1980. Patterns of sexuality, asexual reproduction and recruitment in some subtidal marine Demospongiae. *Biol. Bull.* **158**(3): 271-282.
- Bonem, R.M. & D. Stanley, Jr. 1977. Zonation of a lagoonal patch reef: analysis, comparison, and implications for fossil biohermal assemblages. *Proc. 3rd. Int. Coral Reef Symp.*, Miami **2** (Geology): 175-181.
- Díaz, M.C., B. Álvarez, & R. Laughlin. 1990. The sponge fauna on a fringing coral reef in Venezuela, II. Community Structure. In: Rützler, K. (ed.). *New perspectives in sponge biology*. Smithsonian Institution Press, Washington, DC, pp. 367-375.
- 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. Colección Jorge Álvarez LLeras **7**, Acad. Col. Cienc. Exact. Fis. Nat., Bogotá.
- _____. G. Díaz-Pulido, J. Garzón-Ferreira, J. Geister, J.A. Sánchez & S. Zea. 1996. Atlas de los arrecifes coralinos del Caribe colombiano. I. Complejos arrecifales oceánicos. Serie Publicaciones Especiales **2**, INVEMAR, Santa Marta.
- _____. J.A. Sánchez, S. Zea & J. Garzón-Ferreira. 1996b. Morphology and marine habitats of two southwestern Caribbean atolls: Albuquerque and Courtown. *Atoll Res. Bull.* **435**: 1-33.
- _____. L.M. Barrios, M.H. Cendales, J. Garzón-Ferreira, J. Geister, M. López-Victoria, G.H. Ospina, F. Parra-Velandia, J. Pinzón, B. Vargas-Ángel, F.A. Zapata & S. Zea. 2000. Áreas Coralinas de Colombia. Serie Publicaciones Especiales **5**, INVEMAR, Santa Marta.
- Digby, P.G.N. & R.A. Kempton. 1987. *Multivariate analysis of ecological communities*. Chapman and Hall, London.
- Dunn, G. & B.S. Everitt. 1982. *An introduction to mathematical taxonomy*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Field, J.G., K.R. Clarke, & R.M. Warmick. 1982. A practical strategy for analysing multispecies distribution patterns. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **8**: 37-52.
- Fromont, J. 1988. Aspects of the reproductive biology of *Xestospongia testudinaria* (Great Barrier Reef). *Proc. 6th. Int. Coral Reef Symp.*, Australia, **2**: 685-691.
- Geister, J. 1975. Riffbau und geologische Entwicklungs-geschichte der Insel San Andrés (westliches Karibisches Meer, Kolumbien). *Stutt. Beitr. Naturk. (Geol., Paläont.)* **15**: 1-203.
- _____. 1977. The influence of wave exposure on the ecological zonation of Caribbean coral reefs. *Proc. 3th. Int. Coral Reef Symp.*, Miami **1**: 23-29.
- _____. 1983. Holozäne westindische Korallenriffe: Geomorphologie, Ökologie und Facies. *Facies* **9**: 173-284.
- _____. 1992. Modern reef development and Cenozoic evolution of an oceanic island/reef complex: Isla de Providencia (western Caribbean Sea, Colombia). *Facies* **27**: 1-70.
- _____. & J.M. Díaz. 1996. Oceanic atolls, barrier reefs and elevated fossil reefs of the archipelago of San Andrés and Providencia (Colombia): a field guide. *Excursion Field Guide*, 8th. Int. Coral Reef. Symp., Panama.
- González C., D. 1992. Las comunidades del bajo arrecifal profundo Imelda, Isla Barú, Caribe colombiano: IV. Evaluación estructural preliminar de las esponjas (Porifera). *Mem. VIII Sem. Nal. Cienc. Tecnol. Mar.*, Santa Marta: 316-327.
- Goreau, T.F. 1967. Gigantism and abundance in the macrobenthos of Jamaican coral reefs. *Proc. Assoc. Is. Mar. Labs. Caribb.* **7**: 26-27.
- Hill, M.O. 1979. DECORANA. A Fortran Program for Detrended Correspondence Analysis and Reciprocal Averaging. Section of Ecology and Systematics, Cornell University, Ithaca, New York.
- Hoppe, W.F. 1988. Reproductive patterns in three species of large coral reef sponges. *Coral reefs* **7**(1): 45-50.
- _____. & M.J.M. Reichert. 1987. Predictable annual mass release of gametes by the coral reef sponge *Neofibularia nolitangere* (Porifera: Demospongiae). *Mar. Biol.* **94**: 277-285.
- Hughes, T.P. 1996. Demographic approaches to community dynamics: a coral reef example. *Ecology* **77**(7): 2256-2260.
- Ilan, M. & J. Loya. 1988. Reproduction and settlement of the coral reef sponge *Niphates* sp. (Red Sea). *Proc. 6th. Int. Coral Reef Symp.*, Australia **2**: 745-749.
- _____. 1990. Sexual reproduction and settlement of the coral reef sponge *Chalinula* sp. from the Red Sea. *Mar. Biol.* **105**: 25-31.
- Jackson, J.B.C. 1986. Modes of dispersal of clonal benthic invertebrates: consequences for species' distribution and genetic structure of local populations. *Bull. Mar. Sci.* **39**(2): 588-606.
- 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.
- Kaye, H. & H.M. Reischwig. 1991. Sexual reproduction in four Caribbean commercial sponges. III. Larval behaviour, settlement and metamorphosis. *Invert. Reprod. Dev.* **19**(1): 25-35.
- Kluijver, M.J. de. 1991. Sublittoral hard substrate communities off Helgoland. *Helgolander Meeresunters.* **45**: 317-344.

- Kocurko M.J.** 1977. Preliminary survey of modern marine environments of San Andrés Island, Colombia. *Tulane Stud Geol Paleont* 13(3):111-134.
- Lehnert, H. & H. Fischer.** 1999. Distribution patterns of sponges and corals down to 107 m off North Jamaica. *Mem. Qld. Mus.* 44: 307-316.
- Maldonado, M., S.B. George, C.M. Young & I. Vaquerizo.** 1997. Depth regulation in parenchymella larvae of a demosponge: relative roles of skeletogenesis, biochemical changes and behavior. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 148: 115-124.
- _____ & **C.M. Young.** 1996a. Bathymetric patterns of sponge distribution on the Bahamian slope. *Deep-Sea Res.* 43(6): 897-915.
- _____ 1996b. Effects of physical factors on larval behavior, settlement and recruitment of four tropical demospunges. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 138: 169-180.
- _____ 1998. Limits on bathymetric distribution of keratose sponges: a field test in deep water. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 174: 123-139.
- _____ 1999. Effects of the duration of larval life on postlarval stages of the demosponge *Sigmadocia caerulea*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 232: 9-21.
- Muricy, G.** 1989. Sponges as pollution-biomonitors at Arraial do Cabo, Southeastern Brazil. *Rev. Brasil Biol.* 49(2): 347-354.
- Muricy, G., E. Hajdu, M. Custodio, M. Klautau, C. Russo & S. Peixinho.** 1989. Sponge distribution at Arraial do Cabo, SE Brazil. *Proc. VII Symp. Coast. Ocean. Manag., Long Beach, U.S.A., ASCE Publs.* 2: 1183-1196.
- Panzini, M. & R. Pronzato.** 1985. Distribution and ecology of epiphytic Porifera in two *Posidonia oceanica* (L.) Delile meadows of the Ligurian and Tyrrhenian Sea. *P.S.Z.N.I: Mar. Ecol.* 6(1): 1-11.
- Parra-Velandia, F. & S. Zea.** Submitted. Influencia de turbidez y turbulencia en la distribución y abundancia de las esponjas del genero *Ircinia* (Porifera: Demospongiae) en el área de Santa Marta, Caribe colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.*
- Pimentel, R.A. & J.D. Smith.** 1985. *BIOSTAT. A tutorial manual.* Sigma Soft, Placentia, California.
- Reed, J.K. & s. Pomponi.** 1997. Biodiversity and distribution of deep and shallow water sponges in The Bahamas. *Proc. 8th. Coral Reef Sym., Panama,* 2: 1387-1392.
- Reiswig, H.M.** 1976. Natural gamete release and oviparity in Caribbean Demospongiae. In: F.W. Harrison & R.R. Cowden (eds.). *Aspects of sponge biology.* Academic Press, New York, pp. 99-112.
- Rützler, K.** 1972. Principles of sponge distribution in Indo-Pacific coral reefs: results of the Austrian Indo-WestPacific expedition 1959/60. *Proc. 1st. Int. Coral Reef Sym., Mandapam, India,* pp. 315-332.
- _____ 1990. Associations between caribbean sponges and photosynthetic organisms. En: K. Rützler (ed.). *New perspectives in sponge biology.* Smithsonian Institution Press, Washington, DC, pp. 455-466.
- Rützler, K., J.D. Ferraris & R.J. Larson.** 1980. A new plankton sampler for coral reefs. *P.S.Z.N.I.: Mar. Ecol.* 1: 65-71.
- _____ **M.C. Díaz, R.W.M. van Soest, S. Zea, K.P. Smith, B. Álvarez & J. Wulff.** 2000. Diversity of sponge fauna in mangrove ponds, Pelican Cays, Belize. *Atoll Res. Bull.* 476: 231-248.
- SAS Institute.** 1988. *SAS/STAT User's guide, release 6.03 edition.* SAS Institute, Inc., Cary, NC.
- Sánchez, J.A., J.M. Díaz & S. Zea.** 1997. Gorgonian communities in two contrasting environments on oceanic atolls of the Southwestern Caribbean. *Bull. Mar. Sci.* 61(2): 453-465.
- Sarà, M., M. Panzini, & R. Pronzato.** 1979. Zonation of photophilous sponges related to water movement in reef biotopes of Obhor Creek (Red Sea). In: C. Lévi & N. Boury-Ésnault (eds.). *Biologie des Spongiaries. Colloq. Int. CNRS* 291, Paris, pp. 283-288.
- _____ & **J. Vacelet.** 1973. *Écologie des démosponges.* In: P.-P. Grassé (ed.). *Traité de Zoologie. Anatomie, Systématique, Biologie* 3(1). Masson et. C^o Eds., Paris, pp. 462-576.
- Schmahl, G.P.** 1990. Community structure and ecology of sponges associated with four southern Florida coral reefs. In: K. Rützler (ed.). *New perspectives in sponge biology.* Smithsonian Institution Press, Washington, DC, pp. 376-383.
- Schubauer, J.P., T.P. Burns & T.H. Richardson.** 1990. Population dynamics of five Demospongiae in Jamaica: variation in time and space. In: Rützler, K. (ed.). *New perspectives in sponge biology.* Smithsonian Institution Press, Washington, DC, pp. 443-451.
- Siegel, S. & N.J. Castellan.** 1988. *Non-parametric statistics for the behavioral sciences,* 2nd. ed. McGraw-Hill Book Co., New York.
- Soest, R.W.M. van.** 1993. Distribution of sponges on the Mauritanian continental shelf. *Hydrobiologia* 258: 95-106.
- Sokal, R.R. & F.J. Rohlf.** 1981. *Biometry. The principles and practice of statistics in biological research,* 2nd. ed., W.H. Freeman and Co., San Francisco.
- Úriz, M.-J., M. Maldonado, X. Turon & R. Marti.** 1998. How do reproductive output, larval behaviour, and recruitment contribute to adult spatial patterns in Mediterranean encrusting sponges? *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 167: 137-148.
- Valderrama, D.F.** 2001. *Taxonomía y distribución de esponjas arrecifales (Porifera) del noroccidente del Golfo de Urabá, Caribe colombiano.* B.Sc. thesis, Marine Biology, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Santa Marta.
- Valderrama, D.F. & S. Zea.** Submitted. Riqueza y abundancia de esponjas (Porifera) en ambientes del Caribe subóptimos para el desarrollo arrecifal. Extended abstracts, IX Congreso Latinoamericano sobre Ciencias del Mar, San Andrés isla, septiembre 2001, Colombia.
- Vasseur, P.** 1985. *Etudes des peuplements sciaphiles sessiles des récifs corallins de Polynesie française (Ile de Moorea et Atoll de Takapolo).* *Proc. 5th. Int. Coral Reef Congr., Tahiti* 5: 147-152.
- Vicente, V. P.** 1990. Response of sponges with autotrophic endosymbionts during the coral-bleaching episode in Puerto Rico. *Coral Reefs* 8: 199-202.
- Voogd, N.J. de, R.W.M. van Soest & B.W. Hoeksema.** 1999. Cross-shelf distribution of Southwest Sula Wesi reef sponges. *Mem. Qld. Mus.* 44: 147-154.

- Wiedenmayer, F.** 1977. Shallow-water sponges of the western Bahamas. Birkhauser Verlag, Basel and Stuttgart.
- Wilkinson, C.R.** 1987. Interocean differences in size and nutrition of coral reef sponge populations. *Science* **236**: 1654-1657.
- Wilkinson, C.R. & A. C. Cheshire.** 1989. Patterns in the distribution of sponge populations across the central Great Barrier Reef. *Coral Reefs* **8**: 127-134.
- & **A. C. Cheshire.** 1990. Comparisons of sponge populations across the barrier reef of Australia and Belize: evidence for higher productivity in the Caribbean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **67**: 285-294.
- & **J.E. Thompson.** 1997. Experimental sponge transplantation provides information on reproduction by fragmentation. *Proc. 8th. Int. Coral Reef Sym, Panamá* **2**: 1417-1420.
- Wilkinson, C.R. & L.A. Trott.** 1985. Light as a factor determining the distribution of sponges across the central Great Barrier Reef. *Proc. 5th. Int. Coral Reef Congr., Tahiti*, **5**: 125-130.
- Wulff, J.L.** 1995. Effects of a hurricane on survival and orientation of large erect coral reef sponges. *Coral Reefs* **14**: 55-61.
- 1999. Rapid change and stasis in a coral reef sponge community. *Mem. Qld. Mus.* **44**: 674.
- Zea, S.** 1993a. Cover of sponges and other sessile organisms in rocky and coral reef habitats of Santa Marta, Colombian Caribbean Sea. *Caribb. J. Sci.* **29**(1-2): 75-88.
- 1993b. Recruitment of demosponges (Porifera, Demospongiae) in rocky and coral reef habitats of Santa Marta, Colombian Caribbean. *P.S.Z.N.I. Mar. Ecol.* **14**(1): 1-21.
- 1994. Patterns of coral and sponge abundance in stressed coral reefs at Santa Marta, Colombian Caribbean. In: Soest, R.W.M. van, T.M.G. van Kempen & J.-C. Braekman (eds.). *Sponges in Time and Space*. Ed. Balkema, Rotterdam.
- Zea, S., 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.

INVESTIGACIÓN EN SALUD A PRINCIPIOS DEL SIGLO XXI. LAS LIMITACIONES DE LA “TECNOLOGÍA APROPIADA”*

por

Moisés Wasserman L.**

Se acabó la década del noventa y no pasó lo que esperábamos. Abdus Salam, premio nobel y presidente de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo analizaba ante la Cuarta Reunión de la “South Comission” en 1988 las razones por las cuales el tamaño de la Ciencia y la Tecnología es tan pequeño en el Sur¹. Desarrolló respuestas muy interesantes en su análisis que son perfectamente válidas hoy; advertía que el impacto de la Ciencia en el desarrollo es de término largo: “*No es probable que los beneficios sean evidentes durante un tiempo. El año 2000 sería una buena fecha para comenzar a verlos si comenzamos hoy*” (subrayado de Abdus Salam). En octubre de 1990, durante el primer simposio de la RELAB, Gunter Trapp, entonces coordinador regional de la UNESCO, hacía un análisis de las características de la cooperación internacional para ciencia y tecnología en Latino América en cada una de las décadas de los 50, 60, 70 y 80² y se preguntaba: “¿cuál va a ser la quinta fase, la de la década de los 90? ¿Se caracterizará por una creciente transnacionalización de la cooperación en determinadas disciplinas?, ¿por una mayor interdisciplinariedad?, ¿por una diferente repartición de papeles entre organismos internacionales y nacionales, entre gubernamentales y no gubernamentales?”.

Es inevitable la sensación de un opresivo *déjà vu* al comenzar a preparar este escrito sobre perspectivas de la investigación en salud en Latino América a principios del siglo XXI. No es posible abordar el tema sin tratar de entender qué nos pasó la década de los 90. ¿Por qué esta también fue una década perdida para la Ciencia en Latino América? ¿Qué hemos hecho mal y qué hemos dejado de hacer?

Responder esas preguntas, cubriendo todos los errores y ausencias, es una tarea que se escapa por mucho a la capacidad del autor y al marco de este Simposio. Sin embargo quisiera acercarme a un aspecto de ese problema que tal vez para muchos no es el más importante pero que yo considero que está muy lejos de constituir una preocupación trivial o una discusión bizantina. Esta es la generación y establecimiento de un conjunto de mitos que si bien los científicos no siempre hemos compartido, si infortunadamente hemos permitido que guíen (o sirvan de excusa) a los dirigentes de nuestros países, y que han contribuído a la generación de obtusas políticas de desarrollo. No hemos tenido la presteza, la inteligencia, el valor, o la fuerza para desenmascararlos. Tal vez porque son mitos cómodos, reconfortantes y tranquilizadores.

* Simposio Internacional “Las Ciencias Biológicas del Siglo XXI. Desafíos y Oportunidades para América Latina”. Santiago de Chile 6-8 de Agosto de 2001.

** Laboratorio de Investigaciones Básicas en Bioquímica LIBBIQ - Facultad de Ciencias- Universidad Nacional de Colombia, y Laboratorio de Bioquímica - Instituto Nacional de Salud. Bogotá. Colombia.

Hemos encontrado refugio en ellos, como en un oasis (más bien un espejismo) durante las jornadas en las que la realidad era una tormenta de arena en el desierto. No hay ya salida distinta a enfrentarlos. No podemos retomar otra década más las estrategias no realizadas ni correr otra vez los términos. Es evidente que la brecha se sigue abriendo. Es claro que nuestras predicciones estaban equivocadas o que nuestras recomendaciones no fueron acogidas. Tenemos que tratar, como corresponde a científicos, de llegar a la verdad.

Seguramente no es el público ilustrado de un simposio de la RELAB el que debe ser convencido con los argumentos que me propongo exponer, pero quisiera de todas formas invitarlos a esta reflexión porque, no podemos hacer futurología basados en los grandes desarrollos de la ciencia mundial sin preguntarnos sinceramente si las perspectivas de los otros son también las nuestras. Escogí en el título el término de "tecnologías apropiadas" como ejemplo, podrían ser otros igualmente usados. Pero creo que éste se ha convertido en un moto omnipresente en los planes de desarrollo tecnológico y con unas implicaciones graves. El concepto de "tecnología apropiada" para los que trabajamos en la ciencia día a día es apenas una perogrullada. Sería muy torpe y condenable no usar la tecnología apropiada. Pero fuera del ámbito de los laboratorios y de las universidades quiere decir otra cosa. Implica que hay tecnologías que no son apropiadas, o que son apropiadas para los países desarrollados pero demasiado sofisticadas para nosotros. Lo que entendamos por tecnología apropiada va a definir a qué podemos aspirar; por tanto el término lleva implícita la adopción de un esquema de prioridades no discutido y que se impone de hecho sobre todos los sesudos análisis, sobre las miles de hojas de diagnóstico crítico que hemos venido escribiendo durante años.

En 1994 Alberto Pelegrini³ escribió un artículo invitándonos a superar algunos falsos dilemas: a) establecer prioridades o no establecerlas; b) conocimiento autóctono frente a conocimiento importado y c) investigación básica, frente a aplicada o de desarrollo. Creo que los científicos, sobre todo los básicos acogimos en gran medida su llamado con mucho gusto. Pienso que lo entendimos bien, y que cuando escribió: "...*hoy más que nunca es necesario superar el falso dilema de establecer o no prioridades y, respetando los factores intrínsecos y extrínsecos que determinan el desarrollo de la ciencia, definir prioridades siguiendo el ejemplo de los países que lograron incorporar orgánicamente la C y T en sus proyectos de desarrollo*" lo que quería decir es que hay que priorizar solamente en aquello que se puede priorizar. Sin

embargo, en otros ámbitos, algunos en los cuáles se deciden las políticas de ciencia, se entendió que para superar el dilema había que dejarse de retóricas y ponerse a priorizar. Después de lo que ha sucedido esta década (por lo menos en mi país) temo que tal vez los dilemas no eran falsos después de todo.

¿Qué pasó en Colombia la década pasada?

Usaré el caso de mi país como ejemplo. Posiblemente las tendencias generales en la región son diferentes, en algunos países muy diferentes. Me atrevo a pensar que la fragilidad es similar, y servirá al menos como señal de alerta. Usando el dicho de que una imagen dice más que mil palabras resumiré la década en las figuras 1- 3. Al principio de la década, por el impulso de la ley de ciencia y tecnología (Ley 29 de 1990) y por dos préstamos consecutivos del BID la inversión de ciencia y tecnología creció un poco (Figura 1 Con base en⁴). Los dos candidatos a la presidencia el año de 1994 se comprometieron a subir la inversión hasta acercarse a 2% del PIB. Uno ganó ese año y el otro en 1998, pero en esa segunda campaña no se comprometió a nada relacionado con ciencia (eso sí lo cumplió). El último reporte del Departamento Nacional de Planeación calculaba la inversión en 0.08% del PIB (se están tomando medidas para resolver prontamente el problema cambiando el método de cálculo).

Durante los años de bonanza se afianzaron algunos programas, entre los cuales señalo los más importantes que fueron, la financiación de proyectos (Figura 2 basada en⁵) y el de becas para estudiantes de doctorado y maestría (Figura 3 basada en⁶). La situación hoy es crítica muy por encima de lo imaginable.

La financiación promedio por proyecto en las áreas biológicas fue de US \$15.000 para dos años (Figura 2). El

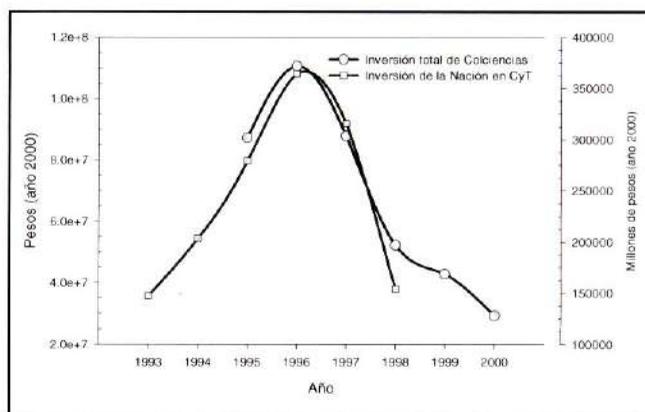


Figura 1. Inversión de la Nación y de Colciencias en C y T.

2001 hasta el momento en que se escribe esto hay un presupuesto en Colciencias de US\$ 80.000 para financiar los proyectos en ciencias básicas (física, química, matemáticas, biología, ciencias básicas médicas y ciencias de la tierra) de todo el país.

El año pasado se dieron 6 becas doctorales (en un país de 40'000.000 de habitantes) y fueron financiadas por la fundación Fullbright, Colciencias sólo sirvió como intermediario. Recientemente se lanzó un programa de la presidencia "La Agenda de Conectividad" administrado por Colciencias y que cuenta, para dos años, con una suma similar a la que se gastó en los 10 años de becas doctorales, y cuyo objetivo central parece ser la educación continuada, preparando a profesionales y no profesionales en el uso eficiente de programas de software comerciales. Un buen ejemplo de lo que significa la "tecnología apropiada".

Se ha invertido en cambio bastante esfuerzo y dinero en construir un "Observatorio de Ciencia y Tecnología". Se hacen encuestas cada dos años. La última mostró un gran crecimiento en el número de grupos, pero un recambio en los grupos mejor calificados hace dos años cercano al 50%, hecho que no preocupó a las autoridades de la ciencia. Por el contrario, declararon a la prensa que curiosamente en Colombia crecen y se multiplican los grupos de investigación en forma inversamente proporcional a la inversión nacional en ciencia.

Los mitos regionales sobre ciencia y tecnología

No se puede decir que la catástrofe descrita anteriormente se deba exclusivamente a problemas conceptuales como los descritos. Pero, creo que es innegable que no se cambiarán las actitudes de los Estados, si además de las

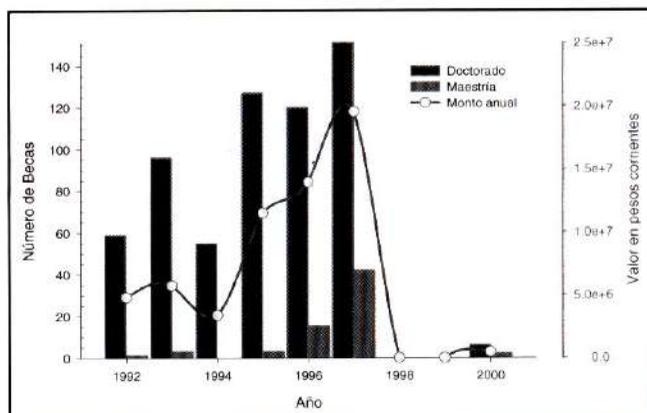


Figura 3. Programa de becas para estudios de doctorado y maestría en Colombia y en el exterior - Colciencias

crisis de carácter económico, la imagen de la ciencia sigue siendo la que hoy, abierta o soterradamente, tienen la mayor parte de los gobernantes. Esta imagen está construida sobre grandes mitos, que se han implantado con bastante culpa de los científicos que no pecamos, tal vez, por falta de lógica, pero sí por la gran ingenuidad de creer que nuestras interpretaciones eran aceptables y bien comprendidas por todos, y que el interés de los pueblos en la ciencia era tan autoevidente que las argumentaciones sobaban. En algunos casos fuimos ingenuos también al pensar que nuestros políticos de la ciencia representaban genuinamente los intereses de la misma.

Resumiré, sin demasiada argumentación (por falta de espacio y tiempo) los principales mitos a los que me vengo refiriendo⁷:

a) No es que los ricos sean ricos porque investigan sino que investigan porque son ricos. La investigación científica es una actividad supracotidiana (tan importante como la ópera, pero algo menos que el fútbol) a la cual pueden dedicarse los pueblos que tienen la suerte de poseer recursos y tiempo libre.

b) Históricamente la ciencia en la región no ha producido nada significativamente importante. Es un divertimento de unos pocos ciudadanos, exóticos y privilegiados.

c) La investigación científica es la "punta de lanza" de una cultura occidental que nos trae grandes peligros, provoca la destrucción de nuestro ambiente y de nuestras culturas autóctonas.

d) La investigación científica que se le está proponiendo a nuestros pueblos proviene de un paradigma oc-

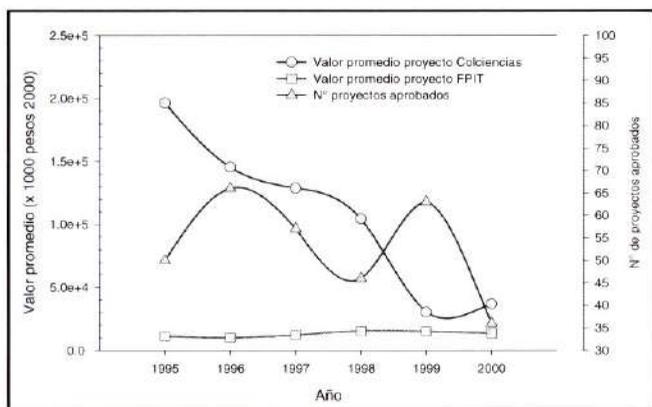


Figura 2. Valor promedio proyectos ciencias biológicas Colciencias y Fundación FPIT

cidental reduccionista y culturalmente homogenizador. Para nosotros es necesario un nuevo enfoque holista, no lineal, complejo y multicultural.

e) Los pueblos del tercer mundo tienen una gran inventiva y son capaces de encontrar soluciones mucho más adecuadas y económicas para sus problemas.

f) A la larga, resulta más conveniente económicamente transferir procesos plenamente probados en otras partes que inventar nuevos. Es mejor comprar la tecnología que se vaya necesitando.

Cada uno de estos mitos merecería ser sometido a un análisis en profundidad. El término "tecnología adecuada" tiene sus raíces en ellos, sobre todo en los dos últimos, el del gran ingenio nativo y la conveniencia de la transferencia de tecnologías sobre un desarrollo propio.

Transferencia de tecnología: el ingenio, la cooperación técnica internacional en la fijación de prioridades

La afirmación sobre el gran ingenio de los pueblos del tercer mundo es seguramente una verdad, pero que esconde a otra más grande, la de que el ingenio se da silvestre en toda la especie humana y en igual abundancia. Se confunde una verdadera cultura de innovación con la astucia para encontrar remedios locales, baratos, ineficientes y no económicos a problemas que en otras partes reciben soluciones tecnológicas de fondo, eficientes y económicas. Nuestras soluciones tienen a veces el encanto de la artesanía y de la anécdota pero rara vez llegan a ser fuentes generadoras de bienestar y prosperidad. En la pasada Feria Mundial de Hannover la prensa colombiana sacó varias páginas y múltiples reseñas sobre un pabellón nacional construido en guadua (especie nativa de bambu de troncos muy grandes) que cautivó a los visitantes por su belleza y sofisticado diseño. Sin embargo algunos, sin demasiada sorpresa, hemos constatado que a pesar de eso los asistentes a la feria de Alemania, el resto de Europa y Estados Unidos, continúan tercamente usando concreto y acero en sus edificaciones. Es la construcción con guadua y lazo de yute una tecnología apropiada?

Para implantar una verdadera cultura de innovación no es suficiente el ingenio. Sobra argumentarle a este auditorio que, comenzando el siglo XXI, no hay innovación significativa en ausencia de un fuerte desarrollo científico y tecnológico. Nos queda la opción de recurrir al mito de la transferencia tecnológica. Hacer caso al llamado de Don Miguel de Unamuno a los españoles, hace 70 años, para que dejen "que inventen los ingleses".

Sin embargo, la transferencia comercial de tecnología tiene importantes limitaciones. Una muy importante es que frecuentemente consiste en la venta de unos equipos y la cesión a cambio de regalías de un proceso de producción. En esos casos quien transfiere la tecnología no está interesado en generar un competidor a su propia producción, prefiere tener un socio subordinado. Cualquier innovación volverá rápidamente obsoleta la tecnología transferida y cada actualización requerirá de una nueva negociación, por supuesto en términos que resulten convenientes al dueño de la innovación. Si quien recibe la transferencia tecnológica no tiene una capacidad propia para innovar a partir de lo que recibió irá siempre a la deriva con graves desventajas competitivas. Otra limitación importante de la cual muchos hemos sido testigos, es que en ausencia de capacidad científica y tecnológica local para mantener funcionando procesos complejos, la dependencia en repuestos, mantenimiento, y solución de problemas, incluso mínimos, convierten a toda la transferencia en económicamente insostenible.

La solución para la transferencia de tecnología en la cual muchos han puesto la esperanza, es la de la cooperación internacional. Esta se hace desde organismos fundamentalmente altruistas que promueven el desarrollo de los pueblos, o desde organismos multinacionales que representan el mejor interés de todas las naciones socias (¿dos mitos más?). Está muy lejos de mi intención hacer una crítica a la cooperación internacional. Por el contrario creo que es un instrumento excelente y que las motivaciones, al menos en parte, tienen un componente altruista. Creo además en el derecho de quienes desarrollan esas iniciativas y hacen la inversión en fijar las prioridades que se deriven de su filosofía y de su visión del desarrollo y del equilibrio global.

No me parece pues extraño ni condenable que la inmensa mayoría de las agencias de cooperación de las naciones desarrolladas hagan su inversión en los países subdesarrollados sólo en proyectos que tengan una gran promesa de retorno inmediato. Las prioridades para sus programas de cooperación son diferentes de las de sus programas propios de investigación científica. Se podrían traer muchos ejemplos para sustentar esta afirmación. Creo que va a bastar con uno basado en dos discursos. El primero es del director de la Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos USAID, J. Brian Atwood en 1997 ante la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos⁸, y el segundo, también de 1997, titulado "Preparing for the 21st Century" por el Dr. Bruce Alberts presidente de la misma academia⁹.

Tabla 1. Prioridades de cooperación y de desarrollo propio de los países desarrollados

Logros de programas de cooperación USAID en salud y niñez	Prioridades de la NAS para el siglo XXI
<p>1) Our work with the International Center for Diarrheal Disease Research in Bangladesh pioneered the use of Oral Rehydration Therapy as a usable and cost-effective treatment for the dehydration that was once the world's leading killer of children...</p> <p>2) We supported research that first demonstrated that children were dying because of vitamin A deficiencies... we also supported intervention trials...</p> <p>3) We have helped to eradicate polio from the western hemisphere...</p> <p>4) Our social science research programs determine critical data for appropriate case management...</p>	<p>1) Increase the effectiveness of the entire scientific enterprise.</p> <p>2) Dramatically improve science and mathematics education for all Americans</p> <p>3) Bring the wise use of science and technology to the center of national and international affairs.</p>

No pretendo decir que los logros de la USAID no sean importantes. Al contrario, es posible que esas acciones hayan salvado muchas más vidas de lo que haya hecho toda la investigación en la historia del tercer mundo. Pero queda claro el punto: las prioridades del mundo desarrollado para la cooperación técnica son muy diferentes de las prioridades propias para el desarrollo científico. En la tabla 1 las primeras corresponden a proyectos, que a veces sin necesidad de generar ningún conocimiento y con la aplicación de acciones muy bien definidas, "pobres en tecnología", producen un efecto inmediato y directo. Las segundas están dirigidas a mejorar los fundamentos mismos de la civilización occidental.

Por otro lado, en la fijación de prioridades en los organismos multilaterales de cooperación técnica y científica hay dos aspectos problemáticos que quisiera discutir. El primero se relaciona con el hecho de que los donantes principales son obviamente los países ricos y desarrollados. Ellos por supuesto tienen gran peso en la decisión de los esquemas de prioridades adoptados, y no hay ninguna razón para suponer que vayan a ser muy diferentes de los que usan en sus propios programas de cooperación técnica. El segundo aspecto es el bajo nivel de independencia, de claridad y de elaboración intelectual que tienen los argumentos de los aportantes menores (que son los beneficiarios de la cooperación). No creo ser abusivo con la afirmación de que muchas veces los funcionarios que representan a las naciones en las reuniones decisorias están lejos de la co-

munidad científica, y muy fuertemente influenciados, seguramente honestamente convencidos, por las prioridades que los países desarrollados fijaron para sus programas de cooperación científica. Por tanto las prioridades de los organismos multinacionales para la cooperación técnica son muy similares a las de las grandes naciones.

La siguiente pregunta obviamente es cómo se fijan las prioridades sobre la inversión de los dineros nacionales en Ciencia y Tecnología. Un sistema equilibrado de desarrollo complementaría en los países del Tercer Mundo las prioridades externas con otras propias basadas en intereses de desarrollo nacional, y pensadas con la misma ambición de las que plantea Bruce Alberts para los Estados Unidos.

En la última década hubo dos fuentes principales para los recursos propios. Aquellas que provienen del tesoro de la Nación y las que provienen de préstamos internacionales, generalmente del BID. Estos últimos, aunque son dineros nacionales, están curiosamente sujetos a las condiciones del Banco en un esquema de prioridades (que generalmente es negociado por los actores ya descritos) y que ha resultado muy parecido al de las agencias de cooperación internacional¹⁰⁻¹¹.

Los dineros del tesoro de la Nación debían ser asignados con base en criterios verdaderamente independientes. Sin embargo también ahí hay problemas. El primero es que en muchas ocasiones el monto es muy pequeño, sobrepasa-

do en mucho por los dineros de cooperación internacional, y por los préstamos del BID¹². El segundo es que los políticos de ciencia en nuestras naciones están fuerte y equivocadamente influenciados por los organismos multinacionales de cooperación cuyos esquemas de prioridades asumen la categoría de recomendación técnica de expertos. Agravan la situación los hechos innegables de que hay un gran flujo laboral entre los dos ámbitos, y con frecuencia los programas nacionales son dirigidos por jubilados, o exfuncionarios de organismos multinacionales, y de que muchos nacionales aspiran fervientemente convertirse en funcionarios internacionales. Los criterios de los unos están sesgados por su actividad anterior y los de los otros por su deseo de demostrar identificación con las metas del organismo al que secreta o abiertamente aspiran. El resultado es un esquema de prioridades muy parecido a los anteriores, con todo lo que eso implica en la definición de los grandes retos y las estrategias para enfrentarlos.

El Plan Estratégico del Programa de Salud en Colombia

Nuevamente como un ejemplo del mecanismo anteriormente descrito, resulta interesante observar el Plan Estratégico 1999-2004 del Programa Nacional de Ciencia y Tecnología de la Salud, de Colombia¹³. En el análisis del contexto investigativo se lee:

“...lo anterior quiere decir, que en la comprensión de la génesis del fenómeno salud-enfermedad, predomina la aplicación segmentada o compartimentada del saber biológico – clínico – social, en los espacios subindividual – individual – poblacional, sobre la búsqueda integral de las respuestas que convoquen estos saberes, retomando al individuo – su historia individual– y al grupo –su historia colectiva–, como actores de su identidad en el espacio sociocultural desde y donde se construyen los procesos de la salud y de la enfermedad”.

En el párrafo siguiente a ese galimatías posmoderno se aclara lo que quiere decir:

“En consecuencia, el ámbito de la investigación y desarrollo tecnológico en salud se circunscribe preferencialmente al campo de lo biológico....se genera conocimiento de alto nivel, de reconocimiento internacional, que no se traduce en aplicaciones prácticas a los procesos de promoción de la salud, prevención de la enfermedad, tratamiento oportuno, reducción de la discapacidad y rehabilitación, en función de los problemas prioritarios de la salud y en los diferentes escenarios sociales y culturales que los hacen más comprensibles”

Algunas páginas más adelante resume las “líneas de acción”:

“La investigación biomédica y clínica se orientará durante el periodo a los siguientes tipos de estudios: Biología y ecología de vectores y agentes etiológicos. Técnicas modernas de prevención y diagnóstico. Evaluación de agentes terapéuticos. Modelos de intervención diagnósticos y terapéuticos. Igualmente se debe generar conocimiento en principios básicos de las enfermedades, en las cuales hay todavía problemas muy graves, que requieren investigación de la más alta calidad”.

“La investigación en salud pública cubrirá las siguientes temáticas (títulos de tres páginas): Dinámica poblacional. Transición epidemiológica. Violencia y salud. Pobreza y salud. Ambiente y salud. Estilos de vida, salud y modernidad. Sistemas de salud y culturas de la salud. Sistemas de salud. Diseño y uso de tecnologías en salud:...Tecnologías más prioritarias.... disponibles para problemas de salud prioritarios en la estructura de los AVISA y que posean una relación costo beneficio baja...”

Cabe preguntarse si la situación catastrófica que vimos en las figuras es resultado de esta visión, o si el Plan de Desarrollo y la situación son en gran medida el resultado de la imposición cultural de los mitos descritos.

¿Cuáles son los retos de la investigación en salud a principios del siglo XXI y cuáles las “tecnologías apropiadas” para enfrentarlos?

La insistencia de algunos políticos de la ciencia y de muchos planes de desarrollo, derivada de los esquemas de prioridades discutidos anteriormente, han generado una aceptación tácita de rótulos como “investigaciones esenciales”, “técnicas apropiadas” y parecidos. Estos no sólo condicionan nuestro acercamiento a los grandes retos, sino que limitan la identificación de los mismos, llevando al concepto esencialmente absurdo de que los países subdesarrollados tienen retos subdesarrollados, o peor aún, que los países sin desarrollo tienen menos metas para alcanzar que los desarrollados.

En un simposio de la Academia de Ciencias de Nueva York titulado “Great Issues for Medicine in the Twenty-first Century”, el premio Nobel Joseph L. Goldstein bajo el subtítulo “Biotechnology and Surrealism” hace un interesante intento de futurología¹⁴, que seguramente coincide en varios temas con otros similares. Usaré ese listado “surrealista”, al que él le puso además de título “los castillos en el aire de la biotecnología” como base de discusión sobre algunos de los retos que nos esperan.

Tabla 2. Los “castillos en el aire”

Nuevas moléculas

- Biotecnología “clásica”
- Derivadas de Genomics y proteomics.
- De productos naturales con actividad biológica usando técnicas de barrido de “high throughput”
- Generadas por ingeniería molecular a partir de dominios.
- Generadas por química y bioquímica recombinacional. Sistemas de evolución “in vitro”

Nuevos conceptos

- Vacunas DNA.
- Vacunas comestibles.
- Drogas y hormonas protéicas comestibles.
- Bloqueadores intracelulares específicos (antisense, ribozimas)

Genómica

- Genomas, subgenomas.
- Definición de presencia y expresión de genes por “gene arrays”

Proteómica

- Definición estructural. High throughput.
- Definición funcional y estructural comparativa.
- Diseño de inhibidores por conocimiento estructural del blanco.

Terapia génica y trasplantes

- Cáncer.
- SIDA
- Enfermedades genéticas.
- Trasplante de órganos universal. Fabricación in vitro. Obtención por transgénesis.

Pronósticos y predisposiciones

- Sistemas de identificación genética.
- Medicina a la medida del individuo.

El año 1997 en una reunión patrocinada por la OMS, A.O. Lucas¹⁵ se arriesgó a hacer una lista de los beneficios esperados de la biotecnología para el tercer mundo:

1. Beneficios directos - Tecnologías médicas y de la salud

Enfermedades comunicables:

- Instrumentos diagnósticos.
- Vacunas
- Drogas
- Control de vectores

Enfermedades no comunicables:

- Detección de casos.
- Definición de susceptibilidades.
- Corrección de anomalías genéticas.

2. Beneficios indirectos:

Agricultura:

- Aumento de producción de alimentos.
- Mejora nutricional de los alimentos.

- Pesticidas biológicos.
- Líneas resistentes a pestes.

Contaminación ambiental:

- Reciclaje de desechos.
- Instrumentos biológicos para la descontaminación.

Los dos listados son válidos (en la medida en que listados de este tipo pueden serlo) y contienen muchos castillos en el aire algunos comunes. El primero es bastante más ambicioso, pero yo invitaría a que se haga un análisis sobre cuáles son las “tecnologías apropiadas” para lograr esos objetivos y en qué medida la definición que adoptemos va a condicionar cuáles de esos retos son nuestros.

Algunas preguntas surgen necesariamente. Será nuestra biodiversidad fuente de riqueza si no contamos con barrios de “high throughput” para definición de actividad biológica? Podremos competir con productos naturales purificados y caracterizados insuficientemente (porque la tecnología apropiada tiene menor resolución)? Podremos competir con nuestro productos naturales a aquellos obtenidos con tecnologías de síntesis química o bioquímica recombinacional, o producto de modificaciones recombinacionales de los básicos? Podremos caracterizar nuestros patógenos y seguir su dinámica sin las tecnologías genómicas y proteómicas? Tendremos que buscar moléculas donde otros las van a construir a la medida? Podremos aumentar la expectativa de vida saludable de nuestras poblaciones, al mismo ritmo de las desarrolladas sin la capacidad de pronóstico derivado de identificaciones genéticas? Estaremos fuera de los sistemas de identificación ciudadana basadas en información genética? Estaremos fuera de los sistemas de trasplantes homólogos y heterólogos que va a ser jalonado por esos sistemas de identificación? ¿Podrá nuestra producción agrícola competir con la de cultivos modificados y mejorados transgénicamente?

La respuesta a esas y más preguntas depende, otra vez, de la definición de “tecnología apropiada” que adoptemos. En este escrito se han dejado traslucir varias posibles definiciones. Una proveniente de la cooperación internacional podría ser que es aquella que produce la mejor relación costo beneficio. La definición de los políticos de ciencia de mi país sería que es aquella que usted pueda usar para resolver el problema contando con US\$15.000 para dos años de trabajo. La definición que se deduce de los “castillos en el aire” es, que en problemas fundamentales, la tecnología apropiada es la mejor disponible, y que esa tecnología sólo es posible y sólo es utilizable donde exista una sólida ciencia básica.

Quiero terminar apoyando la argumentación con un párrafo de las mismas notas de Abdus Salam que cité al comienzo [1], en las que se refiere a la ciencia básica en los países en desarrollo:

“So far as developing countries are concerned, by and large we have tended to neglect this area of Science assuming that we could live off the scientific results obtained by others. This has been an unmitigated disaster in that it has deprived us of men and women who would know about the basics of their disciplines, who could act as references to whom one could turn, to discuss the inevitable scientific problems which arise when applications of Science are made. (I am not recommending here the setting up in the Third World of the likes of the 200 inch telescope at mount Palomar, nor the setting up of laboratories like the CERN in Geneva for Particle Physics financed by a consortium of European nations. However, I definitely do believe that a profound knowledge of the basics is absolutely vital for applications and that a research is a sinequa non for assuring such profound knowledge”).

El futuro depende de los retos que asumamos, el éxito en su abordaje depende de la ciencia que seamos capaces de desarrollar.

Referencias y notas

1. **Abdus Salam.** Notes on Science, Technology and Science Education in the Development of the South. (Prepared for the 4th and 5th Meetings of the South Comission, 10-12 December 1988, Kuwait, and 27-30 May 1989, Maputo, Mozambique) The Third World Academy of Sciences. Trieste. Italy. 1989
2. **Alberto Pellegrini Filho (1994)** Bases para la formulación de políticas de ciencia y tecnología en salud en América Latina. Boletín de la Oficina Sanitaria Panamericana. 116: 165-176.
3. **Gunter Trapp.** Cooperación Internacional. En: “La Biología como instrumento de desarrollo para América Latina” Ed. J.E. Allende RELAB. Santiago de Chile. Chile. 1990
4. **Alberto Pellegrini Filho (1994)** Bases para la formulación de políticas de ciencia y tecnología en salud en América Latina. Boletín de la Oficina Sanitaria Panamericana. 116: 165-176.
5. **Ciencia y Tecnología.** Indicadores Nacionales de Inversión 1993 – 1996. Departamento Nacional de Planeación. Bogotá. Colombia (1997) y **Ciencia y Tecnología.** Dinámica de los Indicadores de Inversión 1994 – 1998. Departamento Nacional de Planeación. Bogotá. Colombia (1998).
6. **Datos obtenidos directamente de Colciencias y FPIT, elaborados en:** Moisés Wasserman. Estudio crítico de la financiación otorgada por la Fundación para la Promoción de la Investigación y la Tecnología en las áreas de Ciencias Biológicas y Médicas. Banco de la República. Bogotá Colombia (2001).
7. **Elaborado de:** Plan Estratégico Programa de Formación de Recursos Humanos y Fortalecimiento de la Comunidad

- Académica. Colciencias. Bogotá Colombia (2001) www.colciencias.gov.co
7. **Moisés Wasserman** (2001) Sobre la importancia de investigar en Colombia, un país subdesarrollado. *Biomédica* 21:13-24.
 8. **J. Brian Atwood** (1997) Discurso-informe (3/12/97) de "U.S. Agency for International Development" ante la "National Academy of Sciences". www.usaid.gov
 9. **Bruce Alberts** (1997) Measuring What Counts in Science. Preparing for the 21st Century. 134th Annual Meeting. Washington D.C. (28/04/97). www.nas.edu
 10. **Conacyt – México**. Créditos del BID y Banco Mundial para Ciencia y Tecnología. La experiencia de México. Pp 281-286 en *Financiamiento de la Investigación en Ciencias Biológicas en América Latina*. Ed. J.E. Allende RELAB. Santiago de Chile. Chile. (1993).
 11. **Jorge Babul, Ana María Prat**. Créditos del BID y Banco Mundial para Ciencia y Tecnología. La experiencia de Chile. Pp 287-295 en *Financiamiento de la Investigación en Ciencias Biológicas en América Latina*. Ed. J.E. Allende RELAB. Santiago de Chile. Chile. (1993).
 12. **Enrique Martín del Campo** UNESCO/ORCYT Importancia relativa del financiamiento internacional en el desarrollo de la biología en diferentes países de América Latina. Ed. J.E. Allende RELAB. Santiago de Chile. Chile. (1993).
 13. **Ciencia y tecnología de la salud**. Plan estratégico 1999-2004. Colciencias Bogotá. Colombia (1999).
 14. **Joseph L. Goldstein**. Burgers, Chips and Genes in Great Issues for Medicine in the Twenty-first Century. *Annals of the New York Academy of Sciences*. V. 882 De. Dana Cook Grossman and Heinz Valtin. New York. U.S.A. (1999).
 15. **A.O. Lucas**. Perception of needs and problems in developing countries. In *Biotechnology and World health*. Pp 93-100. WHO. Geneva (1997).

PALABRAS PRONUNCIADAS POR EL PRESIDENTE, EN LOS FUNERALES DEL ACADÉMICO CORRESPONDIENTE DON JORGE HERNÁNDEZ CAMACHO

Profundamente conmovido por la infausta desaparición del amigo, del compañero de trabajo de largos años, Profesor Jorge Hernández Camacho, en representación de la Academia Colombiana de Ciencias y en mi propio nombre, permítanme rendir sentido y póstumo homenaje al connotado científico Maestro Jorge Hernández Camacho, mi amigo y compañero de trabajos de muchos años.

El hondo pesar que hoy nos agobia, contrasta pero al mismo tiempo relleva la grata emoción que todos los presentes sentimos cuando hace apenas pocos días la Academia Colombiana de Ciencias, reunida en pleno y en sesión solemne, le hizo entrega del más alto galardón que la entidad confiere en reconocimiento a una vida dedicada al cultivo del conocimiento, como ganador del concurso nacional público de méritos y contribuciones a la Ciencia.

Todos recordamos la alegría y emoción con la cual el Maestro, pensador y escrutador infatigable de la naturaleza colombiana, recibió el galardón, en compañía de su esposa, de sus discípulos, colegas y amigos; admiradores todos, de su obra científica y de sus elevadas calidades humanas. Valga decir, de su generosidad intelectual, su solidaridad a toda prueba, su altruismo, su vocación pedagógica, su pensar independiente original, crítico y creativo. Calidades humanas que hicieron de él, el maestro, el investigador auténtico.

Al atardecer, del pasado sábado, en medio del dolor y profunda sorpresa, recibimos la noticia infausta que su vida tan preciada, no solo para los suyos, y para sus amigos de toda la vida, sino para Colombia toda, se había extinguido sorpresivamente. Por cierto, había ocurrido, en un lugar cuyo contexto de naturaleza prístina, correspondía al escenario que siempre fue el compañero asiduo de su vida o de su mente. El canto de las aves, las notas del lamento de los monos aulladores, el silbido angustia-

do de la brisa en su paso a través del follaje de los bosques de manglares, fue la sinfonía que escuchó al despedirse de la vida y sumirse en la noche eterna de la muerte, como lo relata con emoción, profunda y dolor inmenso, Julia su queridísima noble esposa y compañera, presente también en el postrer escenario y momento de su vida.

No me cabe la menor duda que el reconocimiento de las presentes y futuras generaciones de colombianos a las contribuciones científicas y realizaciones institucionales de Jorge Hernández Camacho en favor de la conservación de nuestro inmenso patrimonio biológico y de los paisajes prístinos multidiversos del entorno natural de Colombia, se acrecentará con el correr del tiempo y en la medida que se magnifiquen los beneficios que tales contribuciones signifiquen como aportes al bienestar y a la calidad de vida de las futuras generaciones que habrán de sucedernos.

Por fortuna, ya en la plenitud de su vida y en medio del arduo trabajo que le significó la realización de muchos de sus emprendimientos recibió el reconocimiento de instituciones científicas y académicas nacionales y extranjeras de renombre, como la Universidad Nacional, el antiguo Inderena, el Ministerio del Medio Ambiente, la Fundación FEN y la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Tuve la fortuna de conocer al "mono" como lo llamaban ya entonces los Profesores del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional, en la ya lejana década de los años 50 del pasado siglo, cuando todavía cursaba estudios de bachillerato, y movido por aquella acendrada vocación, que desde su niñez, lo acompañara toda la vida por el conocimiento de la naturaleza en sus múltiples manifestaciones, visitaba el Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional y se detenía

con singular entusiasmo y emoción en el estudio de las colecciones de los diferentes grupos de la fauna, pero también de las familias de plantas representadas en el Herbario Nacional Colombiano. Cuántas veces escuché sus exclamaciones de asombro y emoción ante hallazgos sorprendidos o de frente a nuevos datos o informaciones interesantes que eliminaban las incertidumbres o daban apoyo a sus hallazgos.

Por lo mismo, ya entonces la amplitud y profundidad de sus conocimientos ora sobre los mamíferos, ora sobre las especies de aves, reptiles y peces de la fauna nativa o de grupos de especies de la Flora de Colombia, despertaban admiración y asombro de profesores y científicos nacionales y extranjeros que visitaban el Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional. Muchas veces lo escuché dirigirse a quienes discutían uno u otro tema de las Ciencias Naturales, y con la timidez y modestia que le eran propias, solicitar se le permitiera intervenir en la discusión. Cuál sería mi asombro cuando me percataba que unas breves frases suyas, sustentadas en datos o informaciones que guardaba en su prodigiosa memoria, eran suficientes para dirimir un problema, lo cual desde luego, motivaba el asombro y admiración de todos los presentes.

De su esposa y compañera de la vida, la distinguidísima zoóloga Julia Sánchez, no solamente recibió su afecto, sino su apoyo y estímulo permanentes, en el intenso y arduo trabajo cotidiano. A ella, a todos los suyos, a sus discípulos, colaboradores, colegas y amigos, deseo expresarles en nombre de la Academia Colombiana de Ciencias, solidaridad en estos momentos de gran dolor y tristeza.

Estoy seguro que para quienes se ocupen de profundizar en el estudio y difusión de la historia de la ciencia en Colombia, sobre todo en referencia al Siglo XX, encontrarán en la figura del "Mono" Hernández Camacho un caso excepcional de entrega a la ciencia, al conocimiento de la multidiversidad de los seres vivos que todavía sobreviven en nuestro territorio y conforman el mas grande patrimonio de la nación. Reconocerán en él, al Maestro sin par de varias generaciones de naturalistas colombianos, quienes motivados por el ejemplo de su Maestro acendrarón su vocación como investigadores y estudiosos de la fauna y flora de Colombia. Ellos, en todo momento, encontraron en "el mono" como de ordinario, con admiración y cariño a él se referían, no sólo el profesor, sino sobretudo al noble y generoso amigo, siempre dispuesto a prestar toda la colaboración que estuviere a su alcance.

Sean estas palabras el testimonio de admiración por el inolvidable amigo y compañero, a la par, uno de los más destacados Miembros Correspondientes de la Academia Colombiana de Ciencias, quien siempre estuvo listo a prestar a la Institución su valioso concurso, como miembro del Comité permanente de asuntos ambientales, entre otros menesteres.

Estoy seguro que la sociedad Colombiana agradecida guardará su memoria y señalará a las futuras generaciones de compatriotas, el ejemplo de su vida y de su obra como paradigma excelso de la ciencia y la cultura nacional.

REVISTA DE LA ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

INDICE GENERAL DEL VOLUMEN XXV, AÑO 2001

Número **94**, páginas 1 - 154 (Marzo)
Número **95**, páginas 155 - 308 (Junio)
Número **96**, páginas 309 - 458 (Septiembre)
Número **97**, páginas 459 - 616 (Diciembre)

Nota Editorial

- Luis Duque Gómez, académico integral 5

Vida Académica

- A manifesto for sake of self-respect in colombian science 140
- Foro sobre desarrollo y formación de la capacidad investigativa "in situ" 143
- Homenaje a un académico 299
- Informe presentado por el secretario sobre las actividades desarrolladas por la Corporación durante el año académico 2000 - 2001 437
- La situación de la educación, la ciencia y la tecnología en el mundo en desarrollo 442
- Manifiesto por la autoestima en la ciencia colombiana 137
- Palabras pronunciadas por el presidente durante la sesión solemne realizada el 22 de agosto 435
- Palabras pronunciadas por el presidente durante los funerales del académico Jorge Hernández Camacho 603
- Un modelo de estrategias integradas para la generación de capacidad científica creativa en los alumnos de los diferentes niveles del sistema educativo 445

Antropología

- Un estudio de historia y antropología médica del bocio endémico en la Nueva Granada, a propósito de su representación artística en tiempos prehispánicos y en el siglo XIX 161

Botánica

- *Acalypha infesta* Poepp. (Euphorbiaceae) novedad para la flora colombiana 463
- A new combination in *Elaphandra* and a new variety of *Eleutheranthera ruderalis* (Compositae: Eliantheae, Ecliptinae) from Andean South America 315
- Acerca del "status" de *Salpichlaena volubilis* J. Smith in Hooker (Blechnaceae) 229
- Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae I. Novedades taxonómicas y corológicas en *Matisia*, *Quararibea* y *Spirotheca* 183
- Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae V. Novedades en *Pseudobombax* Dugand y sinopsis de las especies colombianas 467
- Dos nuevas especies de *Conyza* (Asteraceae, Astereae) originarias de Colombia 179
- Dos nuevas especies de *Espeletia* (Asteraceae, Heliantheae) de Colombia 11
- Dos nuevas especies de *Schwartzia* (Marcgraviaceae) de Colombia
- El género *Eubrachion* Hook. f. (Eremolepidaceae) en Colombia 21
- Sinopsis de la sección *Cabrera* del género neotropical *Axonopus* (Poaceae, Panicoideae, Paniceae) 207

- *Tostimontia*, un nuevo género de Asteráceas (Mutisieae) originario de Colombia. 7
- Una nueva especie de *Aristolochia* (Aristolochiaceae) de Bolivia. 225
- Una nueva especie de Eupatorieae (Asteraceae) del género *Condylopodium* R.M. King & H. Robinson 17

Ciencias de la Tierra

- Apuntes sobre la estratigrafía y la tectónica de la cuenca inferior del Catatumbo colombiano. 337
- Consideraciones geocronológicas e isotópicas del batolito antioqueño 27
- El Senosiano de la barrera de Girardot-Guataquí, valle Alto del río Magdalena, Colombia: precisiones sobre la estratigrafía de una zonación micropaleontológica 37
- El suelo: maravilloso teatro de la vida. 483
- Las corrientes superficiales en la cuenca de Colombia, observadas con boyas de deriva. 321
- Sobre los alisios del nordeste y la existencia de una corriente en el pie de monte oriental andino. 363

Ecología

- Distribución de la biomasa planctónica en la costa pacífica colombiana. 371
- Ecología de las macroalgas del plano arenoso contiguo al talud de los sistemas coralinos con énfasis en el Caribe. 495
- Notas sobre la predominancia de la dieta vegetal en los animales del inter- trópico americano y sobre árboles y arbustos forrajeros. 237
- Un nuevo modelo estratégico y otras perspectivas sobre el manejo de recursos bióticos tropicales en zonas de conservación y desarrollo. 519

Entomología Médica

- Design of a sampling network for an estuary in the colombian Caribbean. 509
- Obtención y caracterización de un novel alergeno mediante la tecnología del DNA recombinante 77

Física

- Átomo alcalino unidimensional forzado por un tren de Dirac. 529
- Junturas Josephson basadas en superconductores de alta temperatura. 381
- Los elementos orbitales postnewtonianos de la solución analítica de Damour & Duruelle para el problema relativista de los dos cuerpos. 537

Historia de la Ciencia

- La tecnología mecánica y su ingreso a Colombia. 253
- Los asertos o conclusiones públicas en el Colegio del Rosario durante la época de la Universidad Central 1826-1841. 89

Matemáticas

- Modular sums of squares. 553

ÍNDICE DE AUTORES

Acosta Solarte, Pablo A.	553	Chamorro Bello, Clara	483
Albis, Víctor Samuel	553	Correa, Alejandra	179
Álvarez-León, Ricardo	269	Cortés Delvalle, Ricardo	337
Andrade Amaya, Carlos Alberto	321	Criales, María Isabel	371
Bermejo Barrera, Jaime	115	De la Escriella, Ricardo	337
Bula-Meyer, Germán	495	Delgado, Edgar	403
Buriticá, Pablo	395	Díaz-Piedrahita, Santiago	5, 7, 11, 17, 179
Campos, Diógenes	529	Duque, Carmenza	569
Cardiel, José María	463	Eslava, Jesús A.	363
Castañeda, Arcesio	529	Fals Borda, Orlando	136
Castañeda, Elizabeth	105	Fernández-Alonso, José Luis	21, 183, 467
Castillo Córdoba, Rodolfo Alejandro	563	Fernández, Carlos E.	371
Fujimoto, Yoshinori	569	Pena, Pilar	403
Galvis, Jaime	337	Peña, Raúl C.	421
Giraldo-Cañas, Diego	207, 477	Pérez, Maritza	161
Giraldo Henao, Ramón	509	Petrichcheva, Natalia V.	569
González, Favio	225	Pimentel, Mauricio	27
Guillén de Iriarte, María Clara	89	Pipoly III, John James	519
Hernández, Mateo	21	Portilla, José Gregorio	537
Lopera, Wilson	381	Poveda Ramos, Gabriel	253
Lozano, José A.	437	Prieto, Pedro	381
Lynch, John D.	127, 287, 411	Pruski, John F.	315
Méndez-Ramírez, Gina Paola	17	Puerta, Leonardo	77
Méndez, Néstor	509	Roldán, Francisco	21
Montenegro, Gloria	421	Segura, Emigdio	403
Montoya, Gerardo	363	Sotomayor, Hugo	161
Mora-Osejo, Luis Eduardo	137, 143, 435, 442, 445	Suárez-Mayorga, Ángela	411
Mojica, Jairo	37	Sturm, Helmut	429
Murillo-Pulido, María Teresa	229	Tchegliakova, Nadejda	37
Ordóñez Carmona, Francisco	27	Tejeiro, Juan Manuel	537
Ospina, David	509	Timmermann, Bárbara	421
Pachón, Marcela	403	Ujmeta, Guillermo	337
Patino, Víctor Manuel	237	Wasserman, Moisés	593
Pedraza, Paola	11	Zea, Sven	579
Pelkowski, Jnaquín	363		

CONSTITUCIÓN DE LA ACADEMIA

JUNTA DIRECTIVA

Período 2000 - 2002

Presidente	:	Luis Eduardo Mora-Osejo
Vicepresidente	:	Moisés Wasserman Lerner
Secretario	:	José A. Lozano-Iriarte
Tesorero	:	Inés Bernal de Ramírez
Bibliotecario	:	Víctor Albis-González
Director de la Revista	:	Santiago Díaz-Piedrahita

MIEMBROS HONORARIOS

Carlo Federici Casa	Mohamed H. Hassan	Rodolfo R. Llinás
Hernando Groot Liévano	Thomas van der Hammen	Ángel M. Municio

MIEMBROS DE NÚMERO

Sucesión de las sillas. Se distingue con asteriscos (*) a los miembros fundadores y con un punto (O) a los académicos que han pasado a la situación de extranumerarios (Art. 15 de los Estatutos)

- † Jorge Acosta Villaveces - 1936*.
† Leopoldo Guerra Portocarrero - 1954.
† Eduardo Acevedo Latorre - 1970.
Eduardo Calderón Gómez - 1984.
- † Jorge Álvarez Lleras - 1936*.
O Alfonso Tribín Piedrahíta - 1967.
Xavier Caicedo Ferrer (e).
- † Antonio María Barriga Villalba - 1936*.
† Kalman C. Mezey - 1957.
Lorenzo Panizzo Durán - 1984.
- † Alberto Borda Tanco - 1936*.
† Hernando Franco Sánchez - 1960.
Manuel del Llano Buenaventura - 1986.
- † Julio Carrizosa Valenzuela - 1936*.
† Eduardo Caro Caycedo - 1976.
Jairo Mojica Corzo - 1997.
- † Víctor E. Caro - 1936*.
Jorge Arias de Greiff - 1966.
- † Luis Cuervo Márquez - 1936*.
† Daniel Mesa Bernal - 1960.
Jesús A. Eslava Ramírez - 1995.
- † Federico Lleras Acosta - 1936*.
† Andrés Soriano Lleras - 1957.
Gabriel Toro González - 1976.
- † Ricardo Lleras Codazzi - 1936*.
† Luis Duque Gómez - 1960.
Guillermo Páramo Rocha - 2001
- † Rafael Torres Mariño - 1936*.
Hernando Groot Liévano - 1966 (H).
José María Rincón
- † César Uribe Piedrahita - 1936*.
† Clemente Garavito Baraya - 1970.
Jaime Lesmes Camacho (e)
- † Darío Rozo Martínez - 1936*.
† Luis Guillermo Durán Solano - 1970.
Vacante
- † Calixto Torres Umaña - 1936*.
† José María Garavito Baraya - 1970.
Humberto Rodríguez Murcia - 1993.
- † Luis María Murillo Quinche - 1936*.
† Hno. Daniel González Patiño - 1976.
Víctor Samuel Albis González - 1992.
- † Enrique Pérez Arbeláez - 1936*.
† Gerardo Reichel Dolmatoff - 1973.
Alicia Dussan de Reichel - 1994.
- † Luis López de Mesa - 1937.
Luis Eduardo Mora Osejo - 1970.
- † Luis Patiño Camargo - 1937.
† Guillermo Castillo Torres - 1983.
Diógenes Campos Romero
- † Daniel Ortega Ricaurte - 1938.
O Alberto Morales Alarcón - 1970.
Vacante
- † Julio Garzón Nieto - 1939.
† Gustavo Perry Zubieta - 1970.
Hernando Dueñas Jiménez - 1989.
- † Ernesto Osorno Mesa - 1939.
Luis E. Gaviria Salazar - 1981.
- † Armando Dugand Gneco - 1941.
† Álvaro Fernández Pérez - 1973.
Enrique Forero González - 1997
- † Alfonso Esguerra Gómez - 1944.
† Carlos Páez Pérez - 1970.
Santiago Díaz Piedrahita - 1988.
- † Jesús Emilio Ramírez - 1944.
Julio Carrizosa Umaña - 1983.
- † Luis H. Osorio - 1944.
† Antonio Olivares - 1966.
† José Rafael Arboleda C. - 1982.
Carlos Corredor Pereira - 1996.
- † Fabio González Tavera - 1945.
† Eduardo Rico Pulido - 1970.
† Carlos E. Acosta Arteaga - 1973.
Dimas Malagón Castro (e).
- † Eduardo Lleras Codazzi - 1945.
† Sven Zethelius Peñalosa - 1966.
Augusto Rivera Umaña - 1996.
- † Marcelino de Castellví - 1945.
† Francisco Lleras Lleras - 1970.
† Álvaro Torres Barreto - 1990.
Margarita Perea Dallos - 1996.
- † Manuel José Casas Manrique - 1945.
María Teresa Murillo Pulido - 1975.
- † Belisario Ruiz Wilches - 1946.
Moisés Wasserman Lerner - 1992.
- † Guillermo Muñoz Rivas - 1950.
Paulina Muñoz Vila - 1994.
- † Jorge Ancízar Sordo 1951.
Eduardo Posada - 1993.
- † Alfredo Bateman 1951
Carlos E. Vasco Uribe - 1992.
- † Jorge Bejarano - 1951.
† Gabriel Sanín Villa - 1970.
O Jaime Ayala Ramírez - 1973.
Polidoro Pinto Escobar
- † Vicente Pizano Restrepo - 1952.
José A. Lozano Iriarte - 1992.
- † Luis Augusto Cuervo - 1952.
† Santiago Triana C. - 1970.
Gonzalo Correal Urrego - 1984.
- † José Ignacio Ruiz - 1952.
Gerardo Pérez Gómez - 1995.
- † Lorenzo Uribe Uribe - 1952.
Inés Bernal de Ramírez - 1986.
- † Carlos Ortíz Restrepo - 1956.
Eduardo Brieva Bustillo - 1980.
- † Augusto Gast Galvis - 1957.
José Luis Villaveces Cardoso - 1988.
- † Hernando J. Ordóñez - 1957.
Vacante

MIEMBROS CORRESPONDIENTES ACTIVOS

Andrade Amaya Carlos Alberto - Cartagena
Andrade, M. Gonzalo - Bogotá
Arboleda, Luis Carlos - Cali
Barrera, Luis Alejandro - Bogotá
Bula Meyer, Germán - Santa Marta
Buriticá Céspedes, Pablo - Medellín
Cadena García, Alberto - Bogotá
Cala Cala, Plutarco - Bogotá
Caravallo, Luis - Cartagena
Castañeda del Gordo, Elizabeth - Bogotá
Castillo Córdoba, Rodolfo A. - Barranquilla
Castro, Alfonso - Texas. USA.
Chamorro Bello, Clara - Bogotá
Charris, Jairo - Bogotá
Duque Beltrán, Carmenza - Bogotá
Egea Bermejo, Eduardo - Barranquilla
Escobar, José Fernando - Ithaca. USA.
Espinosa, Armando - Armenia
Etayo Serna, Fernando - Bogotá
Fernández-Alonso, José Luis - Bogotá
Gaviria, Santiago - Viena
George, Jaime - Bogotá
Gordillo, Gerardo - Bogotá
Guzmán Ángela María - Bogotá
Hermelín, Michel - Medellín

Jaramillo Robledo, Álvaro - Manizales
Lynch, John D. - Bogotá
Lleras Pérez, Eduardo - Brasilia
Martínez Collantes, Jorge - Bogotá
Martínez Valderrama, Juan - Bogotá
Mojica, Tobias - Bogotá
Moreno, Carlos Julio - New York
Moreno, Luis Enrique - México
Nieto, José Ignacio - Montreal
Olivero Verbel, Jesús - Cartagena
Ospina Hernández, Mariano - Boston
Poveda Ramos, Gabriel - Medellín
Prieto, Pedro Antonio - Cali
Puerta Llerena, Leonardo - Cartagena
Quintero Quintero, Josué - Bogotá
Rangel Churio, Orlando - Bogotá
Restrepo Moreno, Ángela - Medellín
Reynolds Pombo, Jorge - Bogotá
Rodríguez Lara, Jaime - Bogotá
Roldán Pérez, Gabriel - Medellín
Shuk Erdos, Tomás - Bogotá
Varela, Juanuario - Bogotá
Zea, Sven E. - Santa Marta

MIEMBROS CORRESPONDIENTES EXTRANJEROS

ARGENTINA

Sahade, Jorge - Buenos Aires

ALEMANIA

Schnetter, Marie-Luise - Giessen
Schnetter, Reinhard - Giessen
Weber, Hans - Mainz
Sturm, Helmut - Hildesheim

AUSTRIA

Flamm, Dieter - Institut für Theoretische Physik, Viena.
Sheidegger Adrian - Institut für Theoretische Geodäsie und Geophysik - Viena

ESPAÑA

Bermejo Barrera, Jaime - Tenerife
De Porta Vernet, Jaime (E) - Barcelona
Fernández de Soto Morales, Fernando - Madrid
Lora Tamayo, Manuel - Madrid
Torroja Menéndez, José María - Madrid

ESTADOS UNIDOS

Pipoly, John James - Fairchild Tropical Garden
Coral Gables. Florida

FRANCIA

Lourteig, Alicia - Muséum National d'Histoire Naturelle Laboratoire de Phanerogamie, París.
Tricart, Jean - Centre de Géographie Appliquée
Estrasburgo

HOLANDA

Cleef, Antoine M. - Amsterdam

MÉXICO

Guzmán Huerta, Gastón - Instituto de Ecología, Depto. de Hongos, Xalapa, Veracruz.
Joseph-Nathan, Pedro. Centro de Estudios Avanzados. Depto. de Química. Instituto Politécnico - México

PERÚ

Pulgar Vidal, Javier - Lima

SUECIA

Wassén, Henry S. - Gotemburgo

FE DE ERRATAS

Del artículo: "MINERAL DE MAGNESITA COLOMBIANA EN LA OBTENCIÓN DE REFRACTARIOS DE ESPINELA". M. Pachón, E. Delgado, P. Pena, E. Segura
Rev. Acad. Colomb. Cienc. XXV, (96), septiembre de 2001

1. En las páginas 403 resumen y abstract, 405 último renglón y 408 primer renglón de conclusiones, donde dice "... 10 mm..." debe leerse "...10 micrómetros (μm)...".
2. En la Sección isotérmica del diagrama ternario de fases de la Figura 1, página 405, los vértices deben ser SiO_2 (superior), Al_2O_3 (derecho), MgO (izquierdo), el compuesto binario del lado derecho debe ser $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ y el inferior debe ser MgAl_2O_4 .