

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXXIV

MARZO DE 2010

NÚMERO 130

DIRECTOR DE LA REVISTA: PEDRO PRIETO



## CONTENIDO - CONTENTS

Pág.		Pág.
	<b>Botánica (Botany)</b>	
	Las gramíneas (Poaceae) de la Guayana colombiana: análisis sobre su composición, riqueza, endemismo e invasión [The grasses (Poaceae) of the Colombian guayana: analyses on their composition, richness, endemism, and invasion]	
	<i>Diego Giraldo-Cañas</i> ..... 5	
	Más sobre <i>Matisia Gentryi</i> (Bombacaceae-Quararibeeae). Una especie promisorio y poco conocida del Chocó, Colombia [More on <i>Matisia Gentryi</i> (Bombacaceae-Quararibeeae). A little known and prommisory species from Chocó, Colombia]	
	<i>Hamleth Valois-Cuesta &amp; José Luis Fernández-Alonso</i> ..... 17	
	<b>Entomología (Entomology)</b>	
	Variables ambientales, sensores remotos y sistemas de información geográfica aplicados al estudio de la distribución de <i>Rhodnius prolixus</i> en Colombia [Environmental variables, remote sensing and geographical information systems applied to the study of <i>Rhodnius prolixus</i> distribution in Colombia]	
	<i>Felipe Guhl</i> ..... 27	
	<b>Historia de la Ciencia (History of Science)</b>	
	Energía, entropía y religión. Un repaso histórico [Energy, entropy, and religion. A historical survey]	
	<i>Stefan Pohl-Valero &amp; Favio Cala Vitery</i> ..... 37	
	<b>Matemáticas (Mathematics)</b>	
	Estudio matemático del diseño precolombino de la espiral en el arte rupestre del noroccidente del municipio de Pasto (Colombia) [Mathematical study of the pre-columbian spiral design on the rock art in the north west of the municipality of Pasto (Colombia)]	
	<i>Armando José Quijano Vodniza</i> ..... 53	
	A unique continuation result for a generalized KDV type equation with variable coefficients [Un resultado único de continuidad de una ecuación generalizada tipo KDV con coeficientes variables]	
	<i>Alex Montes &amp; José Raúl Quintero</i> ..... 71	
	<b>Química (Chemical)</b>	
	<i>Pseudopterogorgia Elisabethae</i> de San Andrés y Providencia, una pluma de mar con excelente potencial como fuente de productos naturales con aplicación industrial [Pseudopterogorgia Elisabethae of San Andres and Providencia, a feather from the sea with excellent potential as a source of natural products with industrial application]	
	<i>Carmenza Duque</i> ..... 89	
	<b>Zoología (Zoology)</b>	
	Moluscos del Mioceno y del Pleistoceno de la isla de San Andrés (Mar Caribe, Colombia) y consideraciones paleobiogeográficas [Miocene and Pleistocene mollusks from San Andrés Island (Caribbean Sea, Colombia) and Paleogeographic considerations]	
	<i>Juan Manuel Díaz M. &amp; César Fernando García-Llano</i> ..... 105	
	Identificación de nematodos fitoparásitos en guayabo ( <i>Psidium guajava</i> L.), en el municipio de Manizales (Caldas), Colombia [Identification of plant parasitic nematodes in guava ( <i>Psidium guajava</i> L.), at the municipality of Manizales (Caldas), Colombia]	
	<i>Oscar Adrián Guzmán Piedrahita &amp; Jairo Castaño Zapata</i> ..... 117	
	<b>Constitución de la Academia</b> (Members of the Academy) ..... 127	
	<b>Publicaciones de la Academia</b> (Publications of the Academy) ..... 129	

# LAS GRAMÍNEAS (POACEAE) DE LA GUAYANA COLOMBIANA: ANÁLISIS SOBRE SU COMPOSICIÓN, RIQUEZA, ENDEMISMO E INVASIÓN<sup>1</sup>

Por

Diego Giraldo-Cañas<sup>2</sup>

## Resumen

**Giraldo-Cañas, D.:** Las gramíneas (Poaceae) de la Guayana colombiana: análisis sobre su composición, riqueza, endemismo e invasión. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **34** (130): 5-16, 2010. ISSN 0370-3908.

Se presenta el inventario de la flora agrostológica de la Guayana colombiana. Se registraron 152 especies distribuidas en 69 géneros y seis subfamilias. Así, en la Guayana colombiana está representado el 18,7% de las especies y el 43,7% de los géneros de gramíneas presentes en Colombia. Las subfamilias más ricas fueron las Panicoideae (110 especies/46 géneros), las Chloridoideae (21/9) y las Bambusoideae (11/9). Los géneros más diversificados fueron *Paspalum* (19 especies), *Panicum* (16), *Axonopus* (14), *Eragrostis* (9) y *Digitaria* (8). Se hallaron 19 especies introducidas y naturalizadas, lo que representa el 12,5% del total de las especies. Se documentaron ocho especies endémicas, lo que equivale a un 5,3% de la flora agrostológica de la Guayana colombiana. Adicionalmente, se detallan varias novedades corológicas (pertenecientes a los géneros *Axonopus*, *Cyphoanthus*, *Gymnopogon* y *Paspalum*) y taxonómicas –nuevas especies– para la flora de Colombia (pertenecientes a los géneros *Axonopus*, *Digitaria*, *Eragrostis* y *Sacciolepis*). Por otra parte, se analizan algunos aspectos biogeográficos preliminares.

**Palabras clave:** flora de afloramientos precámbricos, flora de Colombia, flora guayanesa, gramíneas neotropicales, región Guayana.

## Abstract

The checklist of grasses from Colombian Guayana is presented. In all, 152 species, 69 genera, and six subfamilies were recorded. Thus, in the Colombian Guayana is represented the 18.7 and 43.7% of the species and genera of Colombian grasses, respectively. The subfamilies with the

<sup>1</sup> Contribución derivada del proyecto “Estudios sistemáticos en gramíneas de Colombia: Parte II”, de la Dirección Nacional de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Apartado 7495, Bogotá, D. C., Colombia. Correo electrónico: dagiraldoc@unal.edu.co

highest number of species were Panicoideae (110 species/46 genera), Chloridoideae (21/9), and Bambusoideae (11/9). The most diverse genera were *Paspalum* (19 species), *Panicum* (16), *Axonopus* (14), *Eragrostis* (9), and *Digitaria* (8). Nineteen species are introduced and naturalized in the Colombian Guayana, which represent 12.5% of the agrostological flora for the Colombian Guayana. There were 8 endemic species (5.3% of Colombian Guayanan grasses). In addition, some species are reported for the first time for Colombian flora (belonging to *Axonopus*, *Cyphoanthus*, *Gymnopogon*, and *Paspalum*), and some species are new to science (belonging to *Axonopus*, *Digitaria*, *Eragrostis*, and *Sacciolepis*). On the other hand, some preliminary biogeographical aspects are analyzed.

**Key words:** flora of Colombia, guayanan flora, guayana region, flora of precambrian outcrops, neotropical grasses.

## Introducción

La región biogeográfica de la Guayana pertenece al Escudo Precámbrico Guayanés; dicho escudo forma un arco discontinuo de cerros, lajas, afloramientos rocosos, serranías, tepuyes y macizos en el norte de la Amazonia (Smith, 1946; Schultes, 1949). Esta región constituye un área cercana a los dos millones de km<sup>2</sup> (Huber, 2006), se localiza en el norte de Sudamérica y comprende el sur de Venezuela y partes de Guyana, Surinam, Guayana Francesa, Colombia y Brasil (Maguire, 1970, 1979; Boom, 1990; Berry *et al.* 1995a, 1995b; Huber, 1995, 2006). La región Guayana posee una rica flora vascular estimada en cerca de 1800 géneros (138 endémicos) y unas 15000 especies, de las cuales un 40% tiene un área de distribución endémica de la región (véase Berry *et al.* 1995a).

En su porción colombiana, el Escudo Guayanés ocupaba un área cercana a los 250.000 km<sup>2</sup> del territorio continental actual que posee el país (Etter, 2001); en la actualidad y debido a procesos de fractura y erosión a lo largo de millones de años, sólo queda un 20-25% de esta área en Colombia, principalmente de forma dispersa entre los bosques amazónicos y los bosques y las sabanas orinocenses (Etter, 2001; Giraldo-Cañas, 2008a). La porción colombiana del Escudo Guayanés pertenece a la provincia Occidental de la región fitogeográfica de la Guayana (Huber, 1994; Berry *et al.* 1995a) y cuenta con tres distritos fitogeográficos (Berry *et al.* 1995a; Giraldo-Cañas, 2001).

Cabe destacar que la flora de la Guayana colombiana ha sido poco abordada y sólo disponemos de inventarios de áreas relativamente pequeñas (véanse Barbosa Castillo, 1992; Estrada & Fuertes, 1993; Cleef & Duivenvoorden, 1994; Duivenvoorden & Cleef, 1994; Cortés & Franco, 1997; Cortés *et al.* 1998, Arbeláez & Callejas, 1999, Giraldo-Cañas 2001, 2004, Rudas *et al.* 2002, Parra-O., 2006; Cárdenas López, 2007; Cordero *et al.* 2007; Cárdenas López *et al.* 2008), salvo el inventario de toda la flora

vascular de las lajas o afloramientos graníticos colombianos (“inselbergs”, Giraldo-Cañas 2008a). Así, este trabajo pretende contribuir con el conocimiento de la flora guayanesa colombiana, la cual carece de estudios de conjunto a pesar de su enorme importancia taxonómica, ecológica y biogeográfica (Giraldo-Cañas 2008a). Aquí se documenta la riqueza, la composición, el endemismo y la invasión de las gramíneas de la Guayana colombiana.

## Materiales y métodos

El inventario de la flora agrostológica está basado en varias exploraciones realizadas por el autor en diferentes áreas y formaciones vegetales de la Guayana colombiana (arenas blancas, lajas, tepuyes; arbustales, herbazales, sabanas, bosques, ambientes acuáticos), comprendidas entre los años 1996 y 2004; éstas abarcaron tanto las épocas secas como las de lluvias. Los muestreos se realizaron en forma aleatoria y cualitativa, los que comprendieron la herborización de ejemplares en estado reproductivo, con base en los estándares de inventarios florísticos y de preservación de las muestras (Johnston 1941; Lawrence 1962; Font Quer 1964; Gould & Shaw 1983, 1992, Llorente Bousquets *et al.* 1994; Judd *et al.* 2002). Los ejemplares recolectados se determinaron en el Herbario Nacional Colombiano (COL), en donde también se encuentran depositados bajo la serie de D. Giraldo-Cañas. El reconocimiento de las subfamilias está basado en los recientes catálogos de las gramíneas del Nuevo Mundo (véanse Judziewicz *et al.* 2000, Peterson *et al.* 2001; Soreng *et al.* 2003 y Zuloaga *et al.* 2003), al igual que el reconocimiento de géneros, excepto para el género *Panicum* y sus segregados (*Cyphoanthus*, *Megathyrsus*, *Ocellochloa* y *Parodiophyllochloa*, los cuales están basados en Zuloaga & Giraldo-Cañas, en imprenta) y para las especies de *Thrasya*, las cuales están incluidas en la actualidad en *Paspalum* subgen. *Harpos-tachys* (Denham, 2005). Por otra parte, el inventario se complementó con la consulta y el estudio de colecciones

depositadas en los herbarios COAH, COL, HUA, JAUM, MEDEL, MO, NY, RSA, TOLI, US y VEN (abreviados de acuerdo con **Holmgren et al.** 1990), así como con la revisión bibliográfica de diversos tratamientos monográficos.

Las determinaciones taxonómicas las realizó el autor con base en diferentes obras como floras, flómulas y monografías; principalmente se tomó como base el volumen 8 de la “*Flora of the Venezuelan Guayana*” y en unos pocos casos éstas se llevaron a cabo por medio de comparación con material de referencia depositado en los herbarios COAH, COL, HUA, JAUM, MEDEL, MO, NY, RSA, TOLI, US y VEN. Casi todo el material recolectado se encuentra determinado a nivel de especie, salvo contados casos referidos a algunos géneros, para los que no se dispone de revisiones taxonómicas publicadas y cuya ambigüedad taxonómica es evidente (observaciones personales). Por lo tanto, algunas determinaciones aparecen sólo a nivel genérico.

## Resultados y discusión

### Composición y riqueza

El inventario incluye 152 especies distribuidas en 69 géneros (Tabla 1, Apéndice 1). Así, en la Guayana colombiana está representado el 18,7% de las especies y el 43,7% de los géneros de gramíneas presentes en Colombia (flora agrostológica total en Colombia: 813 especies y 158 géneros, datos personales). Estos porcentajes de representatividad específica y genérica son altos si consideramos la pequeña área territorial de la Guayana colombiana, un área de unos 50.000 a 62.500 km<sup>2</sup>, la cual sólo constituye el 4,4-5,5% del área continental de Colombia. Con relación a la Guayana venezolana (ca. 454.000 km<sup>2</sup>, y alturas que van desde el nivel del mar hasta los 3014 m) –para la cual se reconocen 96 géneros y 409 especies de gramíneas (**Davidse et al.**, 2004)–, se destaca la apreciable representatividad

**Tabla 1.** Número de géneros y especies por subfamilia de las gramíneas de la Guayana colombiana. La distribución por subfamilia está basada en los recientes catálogos de las gramíneas del Nuevo Mundo (véanse **Judziewicz et al.** 2000, **Peterson et al.** 2001, **Soreng et al.** 2003 y **Zuloaga et al.** 2003)

Subfamilia	No. géneros	No. especies
Panicoideae	46	110
Chloridoideae	9	21
Bambusoideae	9	11
Aristidoideae	1	5
Ehrhartoideae	3	4
Pharoidaeae	1	1
<b>Total:</b> 6	69	152

de la flora agrostológica en la Guayana colombiana, toda vez que además de ser un área muy pequeña, sólo presenta alturas desde ca. 150 hasta 880 m.

De las diez subfamilias presentes en el continente americano (véanse **Judziewicz et al.**, 2000; **Peterson et al.**, 2001; **Soreng et al.**, 2003 y **Zuloaga et al.**, 2003), seis están representadas en la Guayana colombiana (Tabla 1). Como dato curioso, merece destacarse la ausencia de las Pooideae, una subfamilia cosmopolita –la cual constituye la segunda subfamilia más diversificada en Colombia– ya que la misma está presente en el territorio colombiano a partir de los 950-1.000 m de altitud (con las especies *Poa annua* L., *Poa infirma* Kunth y *Polypogon elongatus* Kunth, observaciones personales) y su diversidad se incrementa a medida que se asciende en el gradiente altitudinal en la región andina. Esta ausencia se atribuye a que la Guayana colombiana sólo posee alturas entre los 150 y los 880 m.

Como es normal en las tierras bajas neotropicales, las subfamilias más diversificadas son las Panicoideae (con 110 especies y 46 géneros), seguida de las Chloridoideae (21 especies y nueve géneros) y las Bambusoideae (once especies y nueve géneros) (Tabla 1). Del mismo modo, se presenta un patrón similar al comparar la representatividad genérica en tierras bajas neotropicales. Así, los géneros más ricos en especies son *Paspalum* (19 especies, Panicoideae), *Panicum* (16, Panicoideae), *Axonopus* (14, Panicoideae), *Eragrostis* (9, Chloridoideae) y *Digitaria* (8, Panicoideae) (Tabla 2).

**Tabla 2.** Los géneros de gramíneas más diversificados en la Guayana colombiana

Género	Subfamilia	No. especies
<i>Paspalum</i>	Panicoideae	19
<i>Panicum</i>	Panicoideae	16
<i>Axonopus</i>	Panicoideae	14
<i>Eragrostis</i>	Chloridoideae	9
<i>Digitaria</i>	Panicoideae	8
<i>Aristida</i>	Aristidoideae	5
<i>Andropogon</i>	Panicoideae	4

### Especies nativas versus especies introducidas y naturalizadas

De las especies inventariadas, 133 son nativas (125 nativas no endémicas más ocho especies endémicas) (Tabla 3), lo que representa el 87,5% de la flora agrostológica de la Guayana colombiana. Por su parte, las especies introducidas y naturalizadas están representadas por 19 especies.



Así, el porcentaje de las especies introducidas y naturalizadas representa el 12,5% de la flora agrostológica guayanesa colombiana, una cifra que empieza a ser preocupante, toda vez que estas especies, por sus características de “agresividad ecológica”, empiezan a desplazar a las especies nativas en los diferentes ambientes inventariados (véase **D’Antonio & Vitousek**, 1992). Por lo tanto, se podría inferir que este porcentaje aumentará sustancialmente, ya que la intervención y la alteración antrópicas en los diferentes ecosistemas de la Guayana colombiana se están incrementando en la actualidad, con la ampliación de la frontera agropecuaria, el incremento en la explotación de maderas preciosas y minerales, así como con la proliferación de cultivos ilícitos (*e.g.* coca, *Erythroxylum* spp.) y el establecimiento de laboratorios para el procesamiento de la cocaína (observaciones personales). No obstante, este porcentaje de las especies introducidas y naturalizadas está por debajo del encontrado en las demás áreas naturales de Colombia, cuyos valores oscilan entre el 17 y el 29%. Quizás, esta situación se debe a que la Guayana colombiana es la menos poblada.

### Endemismo

Del total de especies inventariadas, ocho son endémicas de la Guayana colombiana, lo que equivale a un 5,3% de endemismo de la flora agrostológica de la Guayana colombiana (Tabla 3): *Axonopus zuloagae* Giraldo-Cañas, *Digitaria* sp. nov., *Eragrostis* sp. nov., *Panicum petilum* Swallen, *Paspalum petrosus* Swallen, *Paspalum schultesii* Swallen, *Raddiella molliculma* (Swallen) Soderstr. & C. E. Calderón, y *Sacciolepis* sp. nov. Así, este porcentaje de endemismo es similar al endemismo encontrado por **Giraldo-Cañas** (2008a) para toda la flora vascular de las lajas (*inselbergs*) de la Guayana colombiana, el cual es de 5,1%. Merece destacarse que la familia Poaceae es la segunda en endemismo después de las Bromeliaceae (14 especies endémicas) en las lajas guayanesas colombianas (**Giraldo-Cañas**, 2008a).

Este bajo porcentaje de endemismo para la flora agrostológica de la Guayana colombiana puede ser producto de un intercambio florístico interno frecuente, dada

la conectividad ecológica de las diferentes “islas” guayanesas –no sólo colombianas sino de toda la región en su conjunto– debido a la naturaleza de dispersión anemófila de la mayoría de las gramíneas guayanesas (observaciones personales). Este tipo de dispersión le permite a estas plantas mayores distancias de transporte de sus diásporas. Por otra parte, **Giraldo-Cañas** (2008a) destacó que el bajo endemismo en la Guayana colombiana quizás sea derivado por un aspecto adicional, ya que en la porción colombiana no se presentan las marcadas diferencias altitudinales (hasta 880 m) que se dan en la Guayana venezolana (hasta 3014 m). Así, este menor gradiente altitudinal reduce sustancialmente la diversidad de hábitats y ambientes. Por otro lado, buena parte de las especies de las lajas colombianas es compartida con las lajas venezolanas. Estas características ecológicas propias de las gramíneas, sumadas al reducido gradiente altitudinal y a la naturaleza insular pero con contigüidad biogeográfica de los ambientes guayaneses quizás se han traducido en una especiación local mínima.

Cabe destacar que de los dos géneros de Poaceae endémicos de la Región Guayana (*Myriocladus* y *Steyermarkochloa*, **Berry et al.**, 1995a; **Davidse et al.**, 2004), sólo el segundo está representado en la porción colombiana, con la especie *Steyermarkochloa angustifolia* (Spreng.) Judz., una especie que presenta una pequeña área de distribución en los límites entre el estado Amazonas (Venezuela), el departamento de Guainía (Colombia) y el estado Amazonas de Brasil (**Davidse et al.**, 2004).

### Aspectos biogeográficos preliminares

Entre las especies de gramíneas de la Guayana colombiana, si bien la mayoría muestra un área de distribución neotropical (87,5%) –como se mencionó anteriormente, sólo se documentó la presencia de 19 especies naturalizadas (12,5%)–, cabe destacar la disyunción geográfica de algunas de éstas. Por ejemplo, *Atractantha amazonica* Judz. & L. G. Clark, *Axonopus flabelliformis* Swallen, *Axonopus piccae* Giraldo-Cañas, *Axonopus zuloagae* Giraldo-Cañas, *Chaetium festucoides* Nees, *Cyphonanthus discrepans* (Döll) Zuloaga & Morrone, *Digitaria dioica* Killeen & Rúgolo, *Echinolaena inflexa* (Poir.) Chase, *Gouinia latifolia* (Griseb.) Vasey, *Gymnopogon foliosus* (Willd.) Nees, *Paratheria prostata* Griseb., *Raddiella esenbeckii* (Steud.) C. E. Calderón & Soderstr., exhiben distribuciones vicariantes, unas en un contexto geográfico más amplio, otras a nivel sudamericano y unas pocas estrictamente en ambientes guayaneses.

Esta distribución disyunta se suma a la que presentan algunas gramíneas en las sabanas orinocenses y los

**Tabla 3.** Estatus (origen) de las gramíneas de la Guayana colombiana

Estatus	No. especies	(%)
Nativas no endémicas	125	82,2
Nativas endémicas	8	5,3
Introducidas-naturalizadas	19	12,5
<b>Total</b>	<b>152</b>	<b>100</b>

escudos precámbricos sudamericanos, y puede reflejar una expansión pleistocénica de algunas gramíneas neotropicales (véanse **Killeen & Rúgolo de Agrasar**, 1992; **Morrone et al.**, 1998; **Giraldo-Cañas**, 2008b). Estos autores comentaron que los estudios de los cambios pleistocénicos de la vegetación han girado en torno de especies amazónicas, y que las especies de sabanas y de escudos precámbricos sudamericanos pueden proveer datos adicionales para las hipótesis sobre cambios pleistocénicos de la vegetación. No obstante, la disyunción de las especies no sólo de gramíneas sino la de aquellas plantas principalmente guayanasas (pertenecientes a las familias Apocynaceae, Asteraceae, Bromeliaceae, Clusiaceae, Cyperaceae, Eriocaulaceae, Fabaceae, Gentianaceae, Malpighiaceae, Melastomataceae, Rapateaceae, Rubiaceae, Rutaceae, Theaceae, Velloziaceae, Xyridaceae, entre otras), se debe tomar con cautela, pues es evidente la escasez de colecciones de esta región biogeográfica (véanse **Giraldo-Cañas**, 2001, 2004, 2008a, 2008b), ya que de muchos cerros, tepuyes y lajas colombianos no se tienen inventarios consolidados.

Por otra parte, según algunos autores, las disyunciones evidencian conexiones y separaciones entre “islas” (e.g. cerros, lajas, tepuyes). Sin embargo, los cerros, los tepuyes y las lajas guayanesas adquirieron buena parte de su configuración actual (en cuanto al aislamiento) mucho antes de que se originaran las gramíneas (véanse **Briceño & Schubert**, 1992a, 1992b; **Schubert et al.**, 1992; **Huber**, 1995), cuyo origen se remontaría al Paleoceno (unos 55-70 millones de años, **Kellogg**, 2001), por lo que esta apreciación no tendría validez en este caso. Adicionalmente a estas interpretaciones, tenemos que **González-Elizondo et al.** (1996) creen que la amplia distribución geográfica y las amplias disyunciones de las especies de un grupo determinado (en su caso *Eleocharis* grupo *Pauciflorae*), sugieren que el grupo representa un clado antiguo. Estas apreciaciones coinciden con la amplia distribución y a su vez, la disyunción de varias especies de gramíneas presentes en la región Guayana.

Las pocas especies endémicas de gramíneas en la Guayana colombiana, podrían ser el resultado de evolución vicariante. Así, las especies endémicas registradas exhiben áreas variadas de distribución, las cuales pueden estar correlacionadas con gradientes macroclimáticos recientes. No obstante y en vista de la mayor antigüedad de los escudos precámbricos sudamericanos, **Struwe et al.** (1997) creen que las plantas endémicas de estas áreas serían más antiguas en términos filogenéticos que las que crecen en otro tipo de sustrato. A pesar de esta aparente contradicción, la distribución diferencial de las especies

endémicas en la Guayana colombiana –no sólo las referidas a las gramíneas sino a todas las especies– permitiría proponer diferentes subunidades biogeográficas. Este último aspecto está siendo tratado por el autor para una próxima contribución.

Sobre la base de las características de la distribución geográfica y altitudinal de las especies de gramíneas (datos inéditos), podría pensarse que los procesos de especiación de dichas plantas se debieron principalmente a fenómenos de vicarianza o separación debida a cambios en su mayor parte climáticos, que ocurrieron en esas áreas (**Giraldo-Cañas**, 2008b), probablemente en el Pleistoceno, tal como había sido comentado para otros grupos de plantas (véanse **Funk & Brooks**, 1990; **Rull**, 1991; **Huber**, 1992a, 1992b; **Katinas et al.**, 1992; **Schubert et al.**, 1992; **Berry et al.**, 1995a; **Giraldo-Cañas** 2008b, entre otras). Asimismo, las gramíneas han alcanzado un notable grado de diferenciación ecológica y especiación genética en los ecosistemas del Escudo Guayanés, debido quizás a la hibridación [evolución reticulada, un evento biológico catalogado como uno de los más importantes en la diversificación de muchos grupos de gramíneas, véanse **De Wet** (1987), **Giraldo-Cañas** (2008b)], como se presenta en otros grupos de plantas guayanesas (véase **Huber** 1992b).

En conclusión, podría decirse que a partir de este Escudo Precámbrico Guayanés, al igual que del Escudo Brasileño, las gramíneas se han extendido, por medio de repetidas fases expansivas, sobre las áreas juveniles del Cuaternario (e.g. los Llanos o región Orinoquia, el piedemonte andino y algunas áreas amazónicas). No obstante y dado que la historia geológica y evolutiva de los escudos Guayanés y Brasileño es poco conocida (**Struwe, et al.** 1997), las relaciones aquí comentadas permanecen sin confirmar.

#### Novedades taxonómicas

Como producto de los inventarios florísticos en la Guayana colombiana, se han encontrado varias nuevas especies, no sólo de Poaceae sino también de otras familias. No obstante, dada la naturaleza de este trabajo, aquí sólo se detallan las nuevas especies de gramíneas, de las cuales algunas ya se han dado a conocer en publicaciones previas.

#### *Axonopus piccae* Giraldo-Cañas

**Distribución geográfica y ecológica.** *Axonopus piccae* sólo se conoce de la Guayana colombiana y de la Gran Sabana en el estado de Bolívar (Venezuela) (**Giraldo-Cañas**, 2008b). Esta especie crece en varias formaciones del

Escudo Guayanés, como son las de los afloramientos rocosos (lajas) de Guainía (Colombia) y en bordes de bosque de la Gran Sabana de Bolívar (Venezuela).

**Material examinado.** COLOMBIA. **Guainía:** Laja with indian clearing opposite the junction of the Río Negro, brazo casiquire and Río Guainía, weedy area on Laja, 65 m, 25 jun 1984, *G. Davidse & J. Miller 26620* (COL, MO, VEN).

*Axonopus zuloagae* Giraldo-Cañas

**Distribución geográfica y ecológica.** Esta especie es endémica de la Guayana colombiana (**Giraldo-Cañas**, 2008b). *Axonopus zuloagae* crece en las sabanas y los afloramientos rocosos de Araracuara y serranía La Lindosa, en los departamentos de Amazonas/Caquetá y Guaviare, respectivamente.

**Material examinado.** COLOMBIA. **Amazonas-Caquetá:** Río Caquetá, Araracuara, aeropuerto, suelo arenoso, blanco, depositado sobre piedras de arenisca, 26 dic 1976, *C. Sastre & H. Reichel 4969* (COL, P). **Guaviare:** Mun. San José del Guaviare, serranía La Lindosa (Formación Araracuara), Ciudad de Piedra, 250 m, mar 1996, *D. Giraldo-Cañas & R. López 2588* (COAH).

*Digitaria* sp. nov. (en proceso de descripción)

**Distribución geográfica y ecológica.** Esta especie sólo se conoce de dos ejemplares de la región Guayanesa del departamento del Vichada, en donde sólo se ha observado en lajas de la ribera del río Orinoco.

**Material examinado.** COLOMBIA. **Vichada:** Región Guayanesa, afloramientos rocosos del tipo “lajas”, entre Punta de Lajas y el cerro El Bitá, ribera del río Orinoco, 40-100 m, 4-5 ene 2004, *D. Giraldo-Cañas & C. Parra 3673, 3677* (COL).

*Eragrostis* sp. nov. (en proceso de descripción)

**Distribución geográfica y ecológica.** Esta nueva especie sólo se conoce de tres especímenes de las lajas de la región Guayanesa del departamento del Vichada.

**Material examinado.** COLOMBIA. **Vichada:** Región Guayanesa, afloramientos rocosos del tipo “lajas”, entre Punta de Lajas y el cerro El Bitá, ribera del río Orinoco, 40-100 m, 4-5 ene 2004, *D. Giraldo-Cañas & C. Parra 3644, 3653* (COL). Región Guayanesa, afloramientos rocosos del tipo “lajas”, entre el cerro El Bitá y las instalaciones del Comando Específico del Oriente (CEO) del Ejército Nacional, 50-100 m, 6-9 ene 2004, *D. Giraldo-Cañas & C. Parra 3674* (COL).

*Sacciolepis* sp. nov. (en proceso de descripción)

**Distribución geográfica y ecológica.** Esta nueva especie sólo se conoce de una pequeña depresión sujeta a encharcamiento de una laja en la ribera del río Orinoco de la región Guayanesa del departamento del Vichada.

**Material examinado.** COLOMBIA. **Vichada:** Región Guayanesa, afloramientos rocosos del tipo “lajas”, inmediaciones de Punta de Lajas, ribera del río Orinoco, 50-100 m, 4-5 ene 2004, *D. Giraldo-Cañas & C. Parra 3628* (COL).

**Novedades corológicas**

Con base en los inventarios para la Guayana colombiana, se puede destacar el hallazgo de cuatro especies, las cuales representan los primeros registros para la flora de Colombia. Éstas se detallan a continuación:

*Axonopus triglochinos* (Mez) Dedecca

**Distribución geográfica y ecológica.** Esta especie crece en una pequeña porción guayanesa compartida por Brasil, Colombia y Venezuela. *Axonopus triglochinos* habita en suelos arenosos o rocosos a orillas de ríos y en lajas. Especie poco frecuente, dada la escasez de sus colecciones, conociéndose hasta el presente sólo seis ejemplares (**Giraldo-Cañas**, 2008b).

**Material examinado.** COLOMBIA. **Guainía:** Near Coitara, ca. 7 km S of San Fernando de Atabapo (Venezuela), white sand area adjoining a laja on the western bank of the Río Atabapo, ca. 95 m, 28 abr 1979, *G. Davidse 16826* (COL, MO). Margen derecha del río Atabapo, frente a San Fernando de Atabapo, 9 abr 2001, *R. Echeverry 5073* (COAH, COL, TOLI).

*Cyphonanthus discrepans* (Döll) Zuloaga & Morrone

**Distribución geográfica y ecológica.** Según **Zuloaga et al.** (2003), *C. discrepans* se distribuye en Belice, Costa Rica, Venezuela, Guyana, Guayana Francesa, Brasil, Bolivia y Cuba, y con el nuevo registro aquí presentado se amplía su rango de distribución a Colombia. Esta especie crece en suelos arenosos y en márgenes de lagos, ríos y pantanos, entre el nivel del mar y ca. 200 m de altitud.

**Material examinado.** COLOMBIA. **Guainía:** Islote rocoso granítico colombiano, en la margen derecha del río Orinoco, Estrella Fluvial del Sur, confluencia de los ríos Guaviare y Atabapo en el Orinoco, 120 m, 20 abr 2001, *R. Echeverry 5194* (COAH, COL, TOLI).

*Gymnopogon foliosus* (Willd.) Nees

**Distribución geográfica y ecológica.** Esta especie se distribuye, según **Peterson et al.** (2001), en Guayana

Francesa, Guyana, Surinam, Venezuela, Brasil y Perú, así como en el Caribe y los Estados Unidos de América. Con los presentes registros se amplía su rango de distribución a Colombia. *Gymnopogon foliosus* crece en matorrales, sabanas y afloramientos rocosos, por debajo de los 1000 m de altitud.

**Material examinado.** COLOMBIA. **Guaviare:** Mun. San José del Guaviare, Inspección de La Fuga, sabanas naturales de La Fuga, dedicadas a la ganadería y sometidas a quemadas periódicas, ca. 200 m, 25 mar 1996, D. Giraldo-Cañas & R. López 2620-a (COAH). **Vichada:** Territorio faunístico El Tuparro, open savanna along road, 10 km W of El Centro Administrativo, 100 m, 30 oct 1979, P. Vincelli 1267 (COAH, COL).

### *Paspalum apiculatum* Döll

**Distribución geográfica y ecológica.** Esta especie sólo se conocía para Brasil y Venezuela (Zuloaga *et al.* 2003), y aquí se registra por primera vez para la flora de Colombia. *Paspalum apiculatum* crece en las pequeñas sabanas no inundables en medio de las lajas (Vichada) y en otros tipos de sabana de Brasil y Venezuela, entre los 50 y los 300 m de altitud.

**Material examinado.** COLOMBIA. **Vichada:** Región Guayanesa, afloramientos rocosos del tipo “lajas”, en sabanas no inundables entre el cerro El Bitá y las instalaciones del Comando Específico del Oriente (CEO) del Ejército Nacional, 50-100 m, 6-9 ene 2004, D. Giraldo-Cañas & C. Parra 3676 (COL).

### Conclusiones

El patrón de diversidad encontrado en cuanto a la representatividad de las Panicoideae y las Chloridoideae, coincide con las preferencias ecológicas de las dos subfamilias citadas, ya que sus miembros están principalmente diversificados en las tierras bajas tropicales, tanto de áreas húmedas (*e.g.* las Panicoideae) como de áreas secas (*e.g.* las Chloridoideae). Adicionalmente, se pone de manifiesto que el porcentaje de gramíneas introducidas y naturalizadas representa un poco más de una décima parte de la flora agrostológica guayanesa colombiana, una cifra preocupante y que con certeza, aumentará sustancialmente. Se hace necesario ampliar las áreas de muestreo en la Guayana colombiana, ya que son evidentes los vacíos referidos al inventario de la flora agrostológica de esta importante área colombiana. A pesar de estos vacíos, se puede concluir que los ambientes guayaneses se asemejan a los sistemas continentales con una distribución insular, lo que los convierte en áreas particularmente interesantes para el

estudio de la biogeografía insular. Por último, con base en el hallazgo de las nuevas especies para la ciencia y los nuevos registros para la flora de Colombia, podemos destacar que estamos lejos de completar el inventario de la flora de Colombia.

### 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. A los evaluadores por sus acertados y enriquecedores comentarios, así como al Dr. Pedro Prieto por su valiosa colaboración. A los curadores de los herbarios COAH, COL, HUA, JAUM, MEDEL, MO, NY, RSA, US y VEN por los préstamos enviados o por su grata colaboración durante la visita a sus instalaciones. A los herbarios de los jardines botánicos Rancho Santa Ana “RSA” (Claremont, California, EE.UU) y Missouri “MO” (St. Louis, Missouri, EE.UU), así como al Herbario Nacional de los EE.UU. (US, Smithsonian Institution, Washington D. C.) por las facilidades económicas brindadas para las visitas a sus instalaciones. Esta contribución es derivada del proyecto “Estudios sistemáticos en gramíneas de Colombia: Parte II”, de la Dirección Nacional de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. A F. Zuloaga (SI), O. Morrone (SI), S. Renvoize (K), S. Læggaard (AAU), T. Columbus (RSA), R. Ortiz-Gentry (MO), P. M. Peterson (US), R. Soreng (US), J. F. Veldkamp (L), J. Palmer (CANB) y A. Van den Borre (CANB), por su valiosa y permanente colaboración.

### Bibliografía citada

- Arbeláez, M. V. & R. Callejas. 1999. Flórlula de la meseta de arenisca de la comunidad de Monochoa (región de Araracuara, Medio Caquetá). Estudios en la Amazonia colombiana, tomo XIX. TROPENBOS-Colombia, Bogotá D. C.
- Barbosa Castillo, C. E. 1992. Contribución al conocimiento de la flórlula del parque nacional natural El Tuparro. Serie de publicaciones especiales del INDERENA, Biblioteca Andrés Posada Arango, libro nro. 3, Bogotá D. C.
- Berry, P., O. Huber & B. Holst. 1995a. Floristic analysis and phytogeography. Flora of the Venezuelan Guayana 1: 161-190.
- , B. Holst & K. Yatskievych. 1995b. Introduction. Flora of the Venezuelan Guayana 1: xv-xx.
- Boom, B. 1990. Flora and vegetation of the Guayana-Llanos ecotone in Estado Bolívar, Venezuela. Mem. New York Bot. Gard. 64 (2): 254-278.
- Briceño, H. & C. Schubert. 1992a. Geología. En: O. Huber (ed.), Chimantá, Escudo de Guayana, Venezuela: un ensayo ecológico tepuyano: 53-60. O. Todtmann Editores, Caracas.



- \_\_\_\_\_. 1992b. Geomorfología. En: O. Huber (ed.), Chimantá, Escudo de Guayana, Venezuela: un ensayo ecológico tepuyano: 61-74. O. Todtmann Editores, Caracas.
- Cárdenas López, D., N. Castaño Arboleda, M. Zubieta Vega & M. Jaramillo Echeverry.** 2008. Flora de las formaciones rocosas de la serranía de La Lindosa. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas "Sinchi", Bogotá D. C.
- \_\_\_\_\_. 2007. Vegetación y flora iniridense. En: D. Cárdenas López (ed.), Flora del escudo guayanés en Inírida (Guainía, Colombia): 13-118. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas "Sinchi", Bogotá D. C.
- Cleef, A. & J. Duivenvoorden.** 1994. Phytogeographic analysis of a vascular sample from the Araracuara Sandstone Plateau, Colombian Amazonia. *Mém. Soc. Biogéographique (3ème série)* 4 (1): 65-81.
- Cordero, Z., N. Salinas, S. Suárez & D. Cárdenas López.** 2007. Novedades florísticas y afinidades fitogeográficas. En: D. Cárdenas López (ed.), Flora del escudo guayanés en Inírida (Guainía, Colombia): 119-142. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas "Sinchi", Bogotá D. C.
- Cortés, R. & P. Franco.** 1997. Análisis panbiogeográfico de la flora de la Sierra de Chiribiquete, Colombia. *Caldasia* 19 (1-2): 465-478.
- \_\_\_\_\_. & **O. Rangel.** 1998. La flora vascular de la Sierra de Chiribiquete, Colombia. *Caldasia* 20 (2): 103-141.
- D'Antonio, C. M. & P. M. Vitousek.** 1992. Biological invasions by exotic grasses, the grass/fire cycle, and global change. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 23: 63-87.
- Davidse, G., E. J. Judziewicz & F. O. Zuloaga.** 2004. Poaceae. Flora of the Venezuelan Guayana 8: 1-297.
- Denham, S. S.** 2005. Revisión sistemática del subgénero *Harpostachys* de *Paspalum* (Poaceae: Panicoideae: Paniceae). *Ann. Missouri Bot. Gard.* 92: 463-532.
- De Wet, J.** 1987. Hybridization and polyploidy in the Poaceae. En: T. Soderstrom, K. Hilu, C. Campbell & M. Barkworth (eds.), Grass systematics and evolution: 188-194. Smithsonian Institution Press, Washington D. C.
- Duivenvoorden, J. & A. Cleef.** 1994. Amazonian savanna vegetation on the sandstone plateau near Araracuara, Colombia. *Phytocoenologia* 24 (1): 56-69.
- Estrada, J. & J. Fuertes.** 1993. Estudios en la Guayana colombiana, IV. Notas sobre la vegetación y la flora de la Sierra de Chiribiquete. *Revista Acad. Colomb. Cienc.* 18 (71): 483-497.
- Etter, A.** 2001. El Escudo de Guayana. En: A. Etter (ed.), *Puinawai y Nukak*. Caracterización ecológica general de dos reservas nacionales naturales de la Amazonia colombiana: 31-42. Serie Investigación 2, Instituto de Estudios Ambientales para el Desarrollo "IDEADE", Bogotá D. C.
- Font Quer, P.** 1964. Botánica pintoresca. Ed. Ramón Sopena, S. A., Barcelona.
- Funk, V. & D. Brooks.** 1990. Phylogenetics systematics as the basis of comparative Biology. *Smithsonian Contr. Bot.* 73: 1-45.
- Giraldo-Cañas, D.** 2001. Relaciones fitogeográficas de las sierras y afloramientos rocosos de la Guayana colombiana: un estudio preliminar. *Revista Chilena Hist. Nat.* 74 (2): 353-364.
- \_\_\_\_\_. 2004. Los géneros fanerógamicos endémicos de la región fitogeográfica de la Guayana y su representatividad en la Guayana colombiana. En: J. O. Rangel-Ch., J. Aguirre-C., M. G. Andrade-C. & D. Giraldo-Cañas (eds.), Memorias Octavo Congreso Latinoamericano de Botánica y Segundo Congreso Colombiano de Botánica: 246-258. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D. C.
- \_\_\_\_\_. 2008a. Flora vascular de los afloramientos rocosos precámbricos (lajas-*inselbergs*) de la Amazonia colombiana y áreas adyacentes del Vichada: I. Composición y diversidad. En: J. O. Rangel Ch. (ed.), Serie Colombia Diversidad Biótica VII: Vegetación, palinología y paleoecología de la Amazonia colombiana: 89-118. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D. C.
- \_\_\_\_\_. 2008b. Sistemática del género *Axonopus* (Poaceae: Panicoideae: Paniceae) y revisión de las especies de la serie *Barbigeri*. *Biblioteca José Jerónimo Triana* 17: 1-211. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D. C.
- González-Elizondo, M., P. Peterson & I. Granzow-de La Cerda.** 1996. A cladistic and phenetic analysis of *Pauciflorae* group of *Eleocharis* (Cyperaceae). *Biollania* (edición especial) 6: 341-368.
- Gould, F. W. & R. B. Shaw.** 1983. Grass Systematics. Texas A & M University, Nueva York.
- \_\_\_\_\_. & **R. B. Shaw.** 1992. Gramíneas. Clasificación Sistemática. AGT Ed., S.A., México D. F.
- Holmgren, P., N. Holmgren & L. Barnett.** 1990. Index Herbariorum. Part I: The Herbaria of the World. The New York Botanical Garden, Nueva York.
- Huber, O.** 1992a. La flora: helechos y plantas fanerógamas. En: O. Huber (ed.), Chimantá, Escudo de Guayana, Venezuela: un ensayo ecológico tepuyano: 139-160. O Todtmann Editores, Caracas.
- \_\_\_\_\_. 1992b. Consideraciones fitogeográficas sobre la flora del Chimantá. En: O. Huber (ed.), Chimantá, Escudo de Guayana, Venezuela: un ensayo ecológico tepuyano: 189-202. O Todtmann Editores, Caracas.
- \_\_\_\_\_. 1994. Recent advances in the phytogeography of the Guayana Region, South America. *Mém. Soc. Biogéographique (3ème série)* 4 (1): 53-63.
- \_\_\_\_\_. 1995. Geographical and physical features. Flora of the Venezuelan Guayana 1: 1-61.
- \_\_\_\_\_. 2006. Herbaceous ecosystems on the Guayana Shield, a regional overview. *J. Biogeogr.* 33: 464-475.
- Johnston, I. M.** 1941. Preparación de ejemplares botánicos para herbario. Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán.
- Judd, W. S., C. S. Campbell, E. A. Kellogg, P. F. Stevens & M. J. Donoghue.** 2002. Plant Systematics. A phylogenetic approach. 2ª ed., Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland.
- Judziewicz, E., R. Soreng, G. Davidse, P. Peterson, T. Filgueiras & F. Zuloaga.** 2000. Catalogue of New World grasses (Poaceae): I. Subfamilies Anomochlooideae, Bambusoideae, Ehrhartoideae, and Pharoideae. *Contr. U.S. Natl. Herb.* 39: 1-128.



- Katinas, L., J. Crisci & S. Freire.** 1992. Revisión sistemática y análisis cladístico del género *Triptilion* Ruiz & Pavon (Asteraceae, Mutisieae). *Bol. Soc. Biol. Concepción* **63**: 101-132.
- Kellogg, E.** 2001. Evolutionary history of the grasses. *Plant Physiol.* **125**: 1198-1205.
- Killeen, T. & Z. Rúgolo de Agrasar.** 1992. Taxonomy and reproductive biology of *Digitaria dioica* and *D. neesiana* (Gramineae: Paniceae). *Syst. Bot.* **17**: 594-606.
- Lawrence, G. H. M.** 1962. An introduction to Plant Taxonomy. The Macmillan Company, Nueva York.
- Llorente Bousquets, J., I. Luna Vega, J. Soberón Mainero & L. Bojórquez Tapia.** 1994. Biodiversidad, su inventario y conservación: teoría y práctica en la taxonomía alfa contemporánea. En: J. Llorente Bousquets & I. Luna Vega (compiladores), *Taxonomía Biológica*: 507-522. Ediciones Científicas Universitarias, serie Texto Universitario, Universidad Nacional Autónoma de México-Fondo de Cultura Económica, México D. F.
- Maguire, B.** 1970. On the flora of the Guayana highland. *Biotropica* **2** (2): 85-100.
- . 1979. Guayana, region of the Roraima sandstone formation. En: K. Larsen & L. Holm-Nielsen (eds.), *Tropical Botany*: 223-238. Academic Press, Londres.
- Morrone, O., F. O. Zuloaga, M. O. Arriaga, R. Pozner & S. S. Aliscioni.** 1998. Revisión y análisis cladístico del género *Chaetium* (Poaceae: Panicoideae: Paniceae). *Ann. Missouri Bot. Gard.* **85**: 404-424.
- Parra-O., C.** 2006. Estudio general de la vegetación nativa de Puerto Carreño (Vichada, Colombia). *Caldasia* **28** (2): 165-177.
- Peterson, P., R. Soreng, G. Davidse, T. Filgueiras, F. Zuloaga & E. Judziewicz.** 2001. Catalogue of New World grasses (Poaceae): II. Subfamily Chloridoideae. *Contr. U.S. Natl. Herb.* **41**: 1-255.
- Rudas Ll., A., A. Prieto C. & J. O. Rangel Ch.** 2002. Principales tipos de vegetación de "La Ceiba" (Guainía), Guayana colombiana. *Caldasia* **24** (2): 343-365.
- Rull, V.** 1991. Contribución a la paleoecología de Pantepui y la Gran Sabana (Guayana venezolana): clima, biogeografía y ecología. *Scientia Guaianae* **2**: 1-133.
- Schubert, C., P. Fritz & R. Aravena.** 1992. Investigaciones paleoambientales: resultados preliminares. En: O. Huber (ed.), *Chimantá, Escudo de Guayana, Venezuela: un ensayo ecológico tepuyano*: 97-130. O. Todtmann Editores, Caracas.
- Schultes, R. E.** 1949. *Plantae Colombianae XII*. *Bot. Mus. Leaflets* **14** (2): 21-47.
- Smith, L. B.** 1946. Studies in the Bromeliaceae-XIV. *Contr. Gray Herb. Harvard University* **161**: 29-35.
- Soreng, R., P. Peterson, G. Davidse, E. Judziewicz, F. Zuloaga, T. Filgueiras & O. Morrone.** 2003. Catalogue of New World grasses (Poaceae): IV. Subfamily Pooideae. *Contr. U.S. Natl. Herb.* **48**: 1-730.
- Struwe, L., P. Maas & V. Albert.** 1997. *Aripuana cullmaniorum*, a new genus and species of Gentianaceae from white sands of Southeastern Amazonas, Brazil. *Harvard Papers in Botany* **2**: 235-253.
- Zuloaga, F. O. & D. Giraldo-Cañas.** En imprenta. Revisión del género *Panicum* (Poaceae: Panicoideae: Paniceae) para la flora de Colombia. *Monografías Flora de Colombia*, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D. C.
- . **Morrone, G. Davidse, T. Filgueiras, P. Peterson, R. Soreng & E. Judziewicz.** 2003. Catalogue of New World grasses (Poaceae): III. Subfamilies Panicoideae, Aristidoideae, Arundinoideae, and Danthonioideae. *Contr. U.S. Natl. Herb.* **46**: 1-662.

Recibido: septiembre 7 de 2009.

Aceptado para su publicación: diciembre 18 de 2009.

**Apéndice 1.** Inventario de la flora agrostológica (Poaceae) de la Guayana colombiana. La distribución por subfamilias está basada en los recientes catálogos de las gramíneas del Nuevo Mundo (véanse **Judziwicz et al.** 2000, **Peterson et al.** 2001, **Soreng et al.** 2003 y **Zuloaga et al.** 2003), al igual que el reconocimiento de géneros, excepto para el género *Panicum* y sus segregados (*Cyphonanthus*, *Megathyrsus*, *Ocellochloa* y *Parodiophyllochloa*, los cuales están basados en **Zuloaga & Giraldo-Cañas**, en imprenta) y para las especies de *Thrasya*, las cuales están incluidas en la actualidad en *Paspalum* subgen. *Harpostachys* (**Denham** 2005).

Especie	Subfamilia	Estatus
<i>Acroceras zizanioides</i> (Kunth) Dandy	Panicoideae	Nativa
<i>Andropogon bicornis</i> L.	Panicoideae	Nativa
<i>Andropogon fastigiatus</i> Sw.	Panicoideae	Nativa
<i>Andropogon leucostachyus</i> Kunth	Panicoideae	Nativa
<i>Andropogon selloanus</i> (Hack.) Hack.	Panicoideae	Nativa
<i>Anthaenantia lanata</i> (Kunth) Benth.	Panicoideae	Nativa
<i>Arberella</i> sp.	Bambusoideae	Nativa
<i>Aristida adscensionis</i> L.	Aristidoideae	Nativa
<i>Aristida capillacea</i> Lam.	Aristidoideae	Nativa
<i>Aristida gibbosa</i> (Nees) Kunth	Aristidoideae	Nativa
<i>Aristida longifolia</i> Trin.	Aristidoideae	Nativa
<i>Aristida torta</i> (Nees) Kunth	Aristidoideae	Nativa
<i>Arthrostylidium</i> sp.	Bambusoideae	Nativa
<i>Atractantha amazonica</i> Judz. & L. G. Clark	Bambusoideae	Nativa
<i>Axonopus anceps</i> (Mez) Hitchc.	Panicoideae	Nativa
<i>Axonopus aureus</i> P. Beauv.	Panicoideae	Nativa
<i>Axonopus casiquiarensis</i> Davidse	Panicoideae	Nativa
<i>Axonopus chrysoblepharis</i> (Lag.) Chase	Panicoideae	Nativa
<i>Axonopus compressus</i> (Sw.) P. Beauv.	Panicoideae	Nativa
<i>Axonopus fissifolius</i> (Raddi) Kuhlm.	Panicoideae	Nativa
<i>Axonopus flabelliformis</i> Swallen	Panicoideae	Nativa
<i>Axonopus leptostachyus</i> (Flüggé) Hitchc.	Panicoideae	Nativa
<i>Axonopus piccae</i> Giraldo-Cañas	Panicoideae	Nativa
<i>Axonopus purpusii</i> (Mez) Chase	Panicoideae	Nativa
<i>Axonopus schultesii</i> G. A. Black	Panicoideae	Nativa
<i>Axonopus scoparius</i> (Flüggé) Kuhlm.	Panicoideae	Nativa
<i>Axonopus triglochinos</i> (Mez) Dedecca	Panicoideae	Nativa
<i>Axonopus zuloagae</i> Giraldo-Cañas	Panicoideae	Nativa-endémica
<i>Cenchrus brownii</i> Roem. & Schult.	Panicoideae	Introducida-naturalizada
<i>Cenchrus echinatus</i> L.	Panicoideae	Nativa
<i>Chaetium festucoides</i> Nees (cf.)	Panicoideae	Nativa
<i>Chloris barbata</i> Sw.	Chloridoideae	Nativa
<i>Chloris ciliata</i> Sw.	Chloridoideae	Nativa
<i>Chloris radiata</i> (L.) Sw.	Chloridoideae	Nativa
<i>Coix lacryma-jobi</i> L.	Panicoideae	Introducida-naturalizada
<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	Chloridoideae	Introducida-naturalizada
<i>Cyphonanthus discrepans</i> (Döll) Zuloaga & Morrone	Panicoideae	Nativa
<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.) Willd.	Chloridoideae	Introducida-naturalizada
<i>Digitaria bicornis</i> (Lam.) Roem. & Schult.	Panicoideae	Introducida-naturalizada
<i>Digitaria ciliaris</i> (Retz.) Koeler	Panicoideae	Nativa
<i>Digitaria dioica</i> Killeen & Rúgolo	Panicoideae	Nativa
<i>Digitaria fuscescens</i> (J. Presl) Henrard	Panicoideae	Introducida-naturalizada
<i>Digitaria horizontalis</i> Willd.	Panicoideae	Nativa
<i>Digitaria insularis</i> (L.) Fedde	Panicoideae	Nativa
<i>Digitaria violascens</i> Link	Panicoideae	Introducida-naturalizada
<i>Digitaria</i> sp. nov.	Panicoideae	Nativa-endémica
<i>Echinochloa colona</i> (L.) Link	Panicoideae	Nativa
<i>Echinochloa crus-gavonis</i> (Kunth) Schult.	Panicoideae	Nativa

**Continuación Apéndice 1.**

<b>Especie</b>	<b>Subfamilia</b>	<b>Estatus</b>
<i>Echinochloa polystachya</i> (Kunth) Hitchc.	Panicoideae	Nativa
<i>Echinolaena inflexa</i> (Poir.) Chase	Panicoideae	Nativa
<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.	Chloridoideae	Introducida-naturalizada
<i>Eragrostis acutiflora</i> (Kunth) Nees	Chloridoideae	Nativa
<i>Eragrostis cilianensis</i> (All.) Vignolo ex Janch.	Chloridoideae	Introducida-naturalizada
<i>Eragrostis ciliaris</i> (L.) R. Br.	Chloridoideae	Introducida-naturalizada
<i>Eragrostis hypnoides</i> (Lam.) Britton	Chloridoideae	Nativa
<i>Eragrostis japonica</i> (Thunb.) Trin.	Chloridoideae	Introducida-naturalizada
<i>Eragrostis maypurensis</i> (Kunth) Steud.	Chloridoideae	Nativa
<i>Eragrostis pectinacea</i> (Michx.) Nees	Chloridoideae	Nativa
<i>Eragrostis tenella</i> (L.) P. Beauv. ex Roem. & Schult.	Chloridoideae	Introducida-naturalizada
<i>Eragrostis</i> sp. nov.	Chloridoideae	Nativa-endémica
<i>Eriochloa distachya</i> Kunth	Panicoideae	Nativa
<i>Eriochrysis cayennensis</i> P. Beauv.	Panicoideae	Nativa
<i>Gouinia latifolia</i> (Griseb.) Vasey	Chloridoideae	Nativa
<i>Guadua angustifolia</i> Kunth	Bambusoideae	Nativa
<i>Gymnopogon foliosus</i> (Willd.) Nees	Chloridoideae	Nativa
<i>Gynerium sagittatum</i> (Aubl.) P. Beauv.	Panicoideae	Nativa
<i>Homolepis aturensis</i> (Kunth) Chase	Panicoideae	Nativa
<i>Hymenachne amplexicaulis</i> (Rudge) Nees	Panicoideae	Nativa
<i>Hyparrhenia rufa</i> (Nees) Stapf	Panicoideae	Introducida-naturalizada
<i>Ichnanthus calvescens</i> (Nees ex Trin.) Döll	Panicoideae	Nativa
<i>Imperata brasiliensis</i> Trin.	Panicoideae	Nativa
<i>Ischaemum latifolium</i> (Spreng.) Kunth	Panicoideae	Nativa
<i>Lasiacis nigra</i> Davidse	Panicoideae	Nativa
<i>Lasiacis procerrima</i> (Hack.) Hitchc.	Panicoideae	Nativa
<i>Leersia hexandra</i> Sw.	Ehrhartoideae	Nativa
<i>Leptochloa scabra</i> Nees	Chloridoideae	Nativa
<i>Luziola subintegra</i> Swallen	Ehrhartoideae	Nativa
<i>Megathyrsus maximus</i> (Jacq.) B. K. Simon & S. W. L. Jacobs	Panicoideae	Introducida-naturalizada
<i>Melinis minutiflora</i> P. Beauv.	Panicoideae	Introducida-naturalizada
<i>Mesosetum cayennense</i> Steud.	Panicoideae	Nativa
<i>Mesosetum rottboellioides</i> (Kunth) Hitchc.	Panicoideae	Nativa
<i>Mnesithea aurita</i> (Steud.) de Koning & Sosef	Panicoideae	Nativa
<i>Mnesithea granularis</i> (L.) de Koning & Sosef	Panicoideae	Introducida-naturalizada
<i>Ocellochloa stolonifera</i> (Poir.) Zuloaga & Morrone	Panicoideae	Nativa
<i>Olyra latifolia</i> L.	Bambusoideae	Nativa
<i>Olyra longifolia</i> Kunth	Bambusoideae	Nativa
<i>Oplismenus hirtellus</i> (L.) P. Beauv.	Panicoideae	Nativa
<i>Orthoclada laxa</i> (Rich.) P. Beauv.	Panicoideae	Nativa
<i>Oryza latifolia</i> Desv.	Ehrhartoideae	Nativa
<i>Otachyrium versicolor</i> (Döll) Henrard	Panicoideae	Nativa
<i>Panicum caricoides</i> Nees	Panicoideae	Nativa
<i>Panicum cayennense</i> Lam.	Panicoideae	Nativa
<i>Panicum cyanescens</i> Nees ex Trin.	Panicoideae	Nativa
<i>Panicum granuliferum</i> Kunth	Panicoideae	Nativa
<i>Panicum mertensii</i> Roth	Panicoideae	Nativa
<i>Panicum millegrana</i> Poir.	Panicoideae	Nativa
<i>Panicum micranthum</i> Kunth	Panicoideae	Nativa
<i>Panicum olyroides</i> Kunth	Panicoideae	Nativa
<i>Panicum orinocanum</i> Lucas	Panicoideae	Nativa

*Continuación Apéndice 1.*

Especie	Subfamilia	Estatus
<i>Panicum parvifolium</i> Lam.	Panicoideae	Nativa
<i>Panicum petilum</i> Swallen	Panicoideae	Nativa-endémica
<i>Panicum pilosum</i> Sw.	Panicoideae	Nativa
<i>Panicum polycomum</i> Trin.	Panicoideae	Nativa
<i>Panicum pyrularium</i> Hitchc. & Chase	Panicoideae	Nativa
<i>Panicum rudgei</i> Roem. & Schult.	Panicoideae	Nativa
<i>Panicum stenodes</i> Griseb.	Panicoideae	Nativa
<i>Paratheria prostata</i> Griseb.	Panicoideae	Nativa
<i>Pariana radiceflora</i> Sagot ex Döll	Bambusoideae	Nativa
<i>Parodiolyra luetzelburgii</i> (Pilg.) Soderstr. & Zuloaga	Bambusoideae	Nativa
<i>Parodiophyllochloa pantricha</i> (Hack.) Zuloaga & Morrone	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum apiculatum</i> Döll	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum arundinaceum</i> Poir.	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum carinatum</i> Kunth ex Flüggé	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum conjugatum</i> P. J. Berg.	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum delicatum</i> Swallen	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum fasciculatum</i> Willd. ex Flüggé	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum foliiforme</i> S. Denham	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum hyalinum</i> Nees	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum lanciflorum</i> Trin.	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum morichalense</i> Davidse, Zuloaga & Filgueiras	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum orbiculatum</i> Poir.	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum parviflorum</i> Rhode ex Flüggé	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum pectinatum</i> Nees ex Trin.	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum petrosum</i> Swallen	Panicoideae	Nativa-endémica
<i>Paspalum repens</i> P. J. Bergius	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum schultesii</i> Swallen	Panicoideae	Nativa-endémica
<i>Paspalum tillettii</i> Davidse & Zuloaga	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum trinitense</i> (Mez) S. Denham	Panicoideae	Nativa
<i>Paspalum virgatum</i> L.	Panicoideae	Nativa
<i>Pennisetum purpureum</i> Schgumach.	Panicoideae	Introducida-naturalizada
<i>Pharus latifolius</i> L.	Pharoidae	Nativa
<i>Piresia sympodica</i> (Döll) Swallen	Bambusoideae	Nativa
<i>Raddiella esenbeckii</i> (Steud.) C. E. Calderón & Soderstr.	Bambusoideae	Nativa
<i>Raddiella molliculma</i> (Swallen) Soderstr. & C. E. Calderón	Bambusoideae	Nativa-endémica
<i>Reimarochloa acuta</i> (Flüggé) Hitchc.	Panicoideae	Nativa
<i>Rhytachne guianensis</i> (Hitchc.) Clayton	Panicoideae	Nativa
<i>Sacciolepis myuros</i> (Lam.) Chase	Panicoideae	Nativa
<i>Sacciolepis</i> sp. nov.	Panicoideae	Nativa-endémica
<i>Schizachyrium brevifolium</i> (Sw.) Nees ex Büse	Panicoideae	Nativa
<i>Schizachyrium tenerum</i> Nees	Panicoideae	Nativa
<i>Setaria parviflora</i> (Poir.) Kerguelen	Panicoideae	Nativa
<i>Sorghastrum setosum</i> (Griseb.) Hitchc.	Panicoideae	Nativa
<i>Sporobolus cubensis</i> Hitchc.	Chloridoideae	Nativa
<i>Sporobolus Jacquemontii</i> Kunth	Chloridoideae	Nativa
<i>Sporobolus tenuissimus</i> (Mart. ex Schrank) Kuntze	Chloridoideae	Nativa
<i>Steinchisma laxa</i> (Sw.) Zuloaga	Panicoideae	Nativa
<i>Steyermarkochloa angustifolia</i> (Spreng.) Judz.	Panicoideae	Nativa
<i>Streptogyna americana</i> C. E. Hubb.	Ehrhartoideae	Nativa
<i>Trachypogon spicatus</i> (L. f.) Kuntze	Panicoideae	Nativa
<i>Tripsacum australe</i> Cutler & E. S. Anderson	Panicoideae	Nativa
<i>Urochloa decumbens</i> (Satpf) R. D. Webster	Panicoideae	Introducida-naturalizada
<i>Urochloa mutica</i> (Forssk.) Nguyen	Panicoideae	Introducida-naturalizada

# MÁS SOBRE *MATISIA GENTRYI* (BOMBACACEAE- QUARARIBEAE). UNA ESPECIE PROMISORIA Y POCO CONOCIDA DEL CHOCÓ, COLOMBIA

Por

Hamleth Valois-Cuesta<sup>1</sup> & José Luis Fernández-Alonso<sup>2</sup>

## Resumen

**Valois-Cuesta H. & J. L. Fernández-Alonso:** Más sobre *Matisia gentryi* (Bombacaceae-Quararibeae). Una especie promisoría y poco conocida del Chocó, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (130): 17-26, 2010. ISSN 0370-3908.

Recientes recolecciones de la especie endémica *Matisia gentryi* Fern. Alonso, permitieron estudiar la morfometría foliar, frutos, plántulas y otros aspectos etnobotánicos y ecológicos de interés en una especie promisoría con potencial alimenticio y artesanal de la región del Chocó, en Colombia.

**Palabras clave:** Bombacaceae, endemismo, fruto silvestre, *Matisia*, Pacífico colombiano, plántulas, selva pluvial.

## Abstract

Based on new collections, the leaves, fruits, and seedlings morphometry of *Matisia gentryi* Fern. Alonso was study. In addition, ethnobotany and ecological information of interest is presented for this endemic and promissory species with potential as food and crafts of the Chocó region in Colombia.

**Key words:** Bombacaceae, Colombian pacific, endemism, *Matisia*, rainforest, seedling, wild fruit.

## Introducción

Las selvas pluviales del Chocó biogeográfico colombiano son ricas en especies de la familia Bombacaceae, especialmente de la tribu Quararibeae (**Fernández-Alonso,**

2002). Dentro de esta tribu, el género *Matisia* Bonpl. es uno de los más representativos en la región con 18 especies (**Fernández-Alonso, 2004**), las cuales pueden identificarse por sus hojas simples elípticas o cordiformes con indumento estrellado o fasciculado y frutos drupáceos con cinco

<sup>1</sup> Programa de Biología con énfasis en Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Básicas; Herbario "CHOCO", Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, Colombia; correo electrónico: havalois@yahoo.com

<sup>2</sup> Real Jardín Botánico – CSIC, Plaza de Murillo 2, 28014 Madrid, España. / Instituto de Ciencias Naturales, U. Nacional de Colombia, apartado 7495, Bogotá, Colombia; correo electrónico: jlfernandez@rjb.csic.es



pirenos. En el grupo de las especies con hojas cordiformes se encuentra *Matisia gentryi* Fern. Alonso, especie que fue descrita recientemente (Fernández-Alonso, 2002) con base en colecciones efectuadas a finales de los años 70<sup>s</sup> en la región del San Juan, departamento del Chocó, Colombia. *M. gentryi* es afín a la especie *M. cordata* Bonpl., planta frutal muy apetecida y de amplia distribución en el norte de Sudamérica, y a *M. longitubulosa* (A. Robyns) Cuatrec., y *M. uberrima* Fern. Alonso endémicas de la Amazonía ecuato-peruana (Fernández-Alonso, 2001; 2004; León, 2006). A diferencia de sus afines, *M. gentryi* es una especie rara y no bien documentada en estado silvestre, de hecho, los ejemplares tipo constituían hasta ahora el único registro conocido de la especie. Recientes exploraciones botánicas realizadas en la Serranía del Baudó, municipio del Alto Baudó, departamento del Chocó, Colombia, permitieron determinar las variaciones morfométricas en algunas estructuras de la planta y conocer por primera vez en su ambiente natural algunos atributos de este árbol promisorio del Chocó.

### Materiales y métodos

Entre marzo y junio de 2005 se realizaron colecciones de *M. gentryi* en el corregimiento de Chachajo, municipio del Alto Baudó. A fin de documentar los rangos de variación morfométrica en hoja, fruto y plántula, las colecciones fueron medidas con una regla milimetrada y/o un vernier digital Mitutoyo CD - 8" (0.01 mm de precisión). La morfometría y la distribución del indumento foliar fueron examinadas usando un estereoscopio y un microscopio con micrómetro ocular. Todas las mediciones fueron realizadas a partir de 34 muestras escogidas al azar en los dos únicos árboles encontrados en la zona de estudio así: n = 14 hojas desde *H. Valois-C 338* y *H. Valois-C 424*, n = 14 frutos desde *H. Valois-C 424*, n = 6 plántulas desde *H. Valois-C 425*.

### Resultados y discusión

A continuación se describe *M. gentryi* adicionando información sobre su fuste, corteza y plántulas y se analizan los rangos de variación morfométrica en hojas y frutos. Adicionalmente, se incluye la referencia taxonómica más importante sobre la especie e información sobre su etnobotánica y ecología.

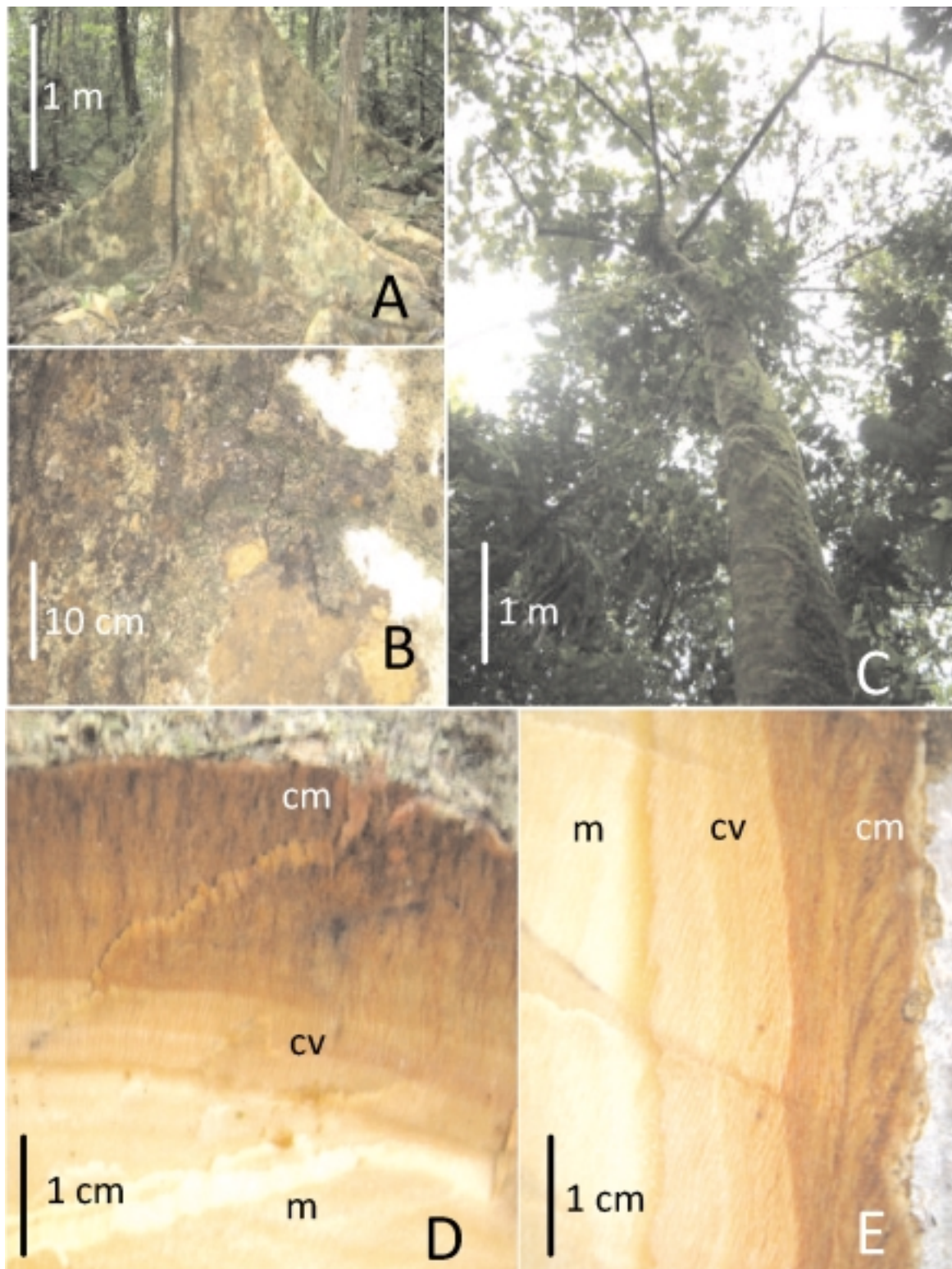
*Matisia gentryi* Fern. Alonso, Novon 12: 343-351. 2002.

**TIPO:** COLOMBIA: Chocó: ca. 50 Km al E de las Ánimas, 4 Km al E del Río Pató, Carretera Panamericana, 250 m, 11 Ene. 1979 (fl, fr), A. Gentry & E. Rentería 23984 (holótipo, COL 204320; isotipos, HUA 11533, MO 1281065) (Figura 1).

Árboles de 30 m de alto, raíces tablares (con 3 aletones bien desarrollados) de 220, 270, 290 cm de ancho en la base × 100, 110, 140 cm de alto respectivamente; diámetro a la altura del pecho 73-75 cm; fuste cilíndrico, copa alta y ramas dispuestas en verticilos (Figura 2A); corteza muerta sin protuberancias o fisuras pronunciadas en el exterior, color café oscuro al interior; corteza viva (albura) de color amarillo pálido, claramente diferenciable de la madera (duramen), la cual es liviana de color crema uniforme, sin vetas evidentes a simple vista en corte transversal o longitudinal (Figura 2B y D-E). Hojas subcoriáceas, agrupadas hacia el final de las ramas más jóvenes (Figuras 3A-B y D), yema terminal con brácteas crasas, subcoriáceas, triangulares o anchamente triangulares de 3-4 (7) × 2,5-3 mm con indumento muy fino equinado-tuberculado (Figura 3C); estípulas triangulares de hasta 7 mm de longitud; pecíolos de (4,4-) 5,5-12 (-21,5) cm × 1,5-2 (-4) mm, pulvínulo proximal 8-9 (10) × (3-) 6-7 mm, pulvínulo distal 12 × 3-5 mm (Figuras 3A-B); láminas foliares anchamente obovadas de (11-) 14-23 (-41) × (9-) 10-27 (-39) cm, base cordada con senos de (1,1-) 1,5-2,5 (-4) cm de profundidad; ápice obtuso, redondo o emarginado y margen levemente sinuoso-ondulado (Figuras 3A y D); indumento disperso en el envés, estrellado-fasciculado con 28-30 (-32) radios sobre los nervios principales y estrellado-lepidoto de 7-12 (15) radios sobre la lámina como tal (Figuras 4A-D), haz subglabro. Inflorescencias ramifloras, dispuestas en formaciones nodosas; pedicelos de 15-18 mm, con 3 bractéolas dispuestas en la mitad basal del pedicelo, prontamente caeducas; cáliz obcónico con 2-2,2 cm de longitud y 1,5-1,7 cm de diámetro en el margen distal; pétalos de color crema, suberectos en la antesis, anchamente espatulados, de hasta 3,5 × 1,2 cm, obtusos en el ápice; columna estaminal de 2,3-2,8 cm con indumento estrellado de radios muy cortos, ramas estaminales de hasta 1,2-1,4 cm × 2 mm de ancho. Pedicelo fructífero de (1,8-) 2,2 cm × 5 (-9) mm, cáliz fructífero con superficie pustulada y margen ligeramente irregular; frutos marrones semi-esféricos de (6-) 8,1 × (4,5-) 8 cm, con una depresión de 2,2 cm de diámetro × 2 mm de profundidad en su ápice; semillas con cotiledones muy plegados (Figura 5). Plántulas con germinación epigea, fanerocotilares; con aproximadamente 5-7 semanas de haber emergido, presentan 26-27 cm de altura; epicotilo cilíndrico de 12-15 cm × 1,5-2 mm (Figura 6), densamente indumentado con pelos estrellados, hipocotilo cilíndrico de 0,7-10,3 cm × 2-3 mm. Eofilos simples, opuestos, dos estípulas libres lanceoladas de 1,3-2 mm de longitud, pecíolos de 4-6,2 cm × 1 mm (Figuras 6A-B) con pelos estrellados de radios largos, láminas con base cordiformes de 7,1-9,4 (12,4) × 7,6-10,8 cm (Figuras 6B-C), haz foliar con nervaduras principales densamente indumentadas con pelos estrellados-fasciculados con 6-8 (-10) radios de 250-350 μm y envés con pelos estrellados-fasciculados 100-120 μm. Cotiledones opuestos, clorofílicos, muy corrugados (bullados) de 2,4-2,7 × 5-5,5 cm (Figura 6D).

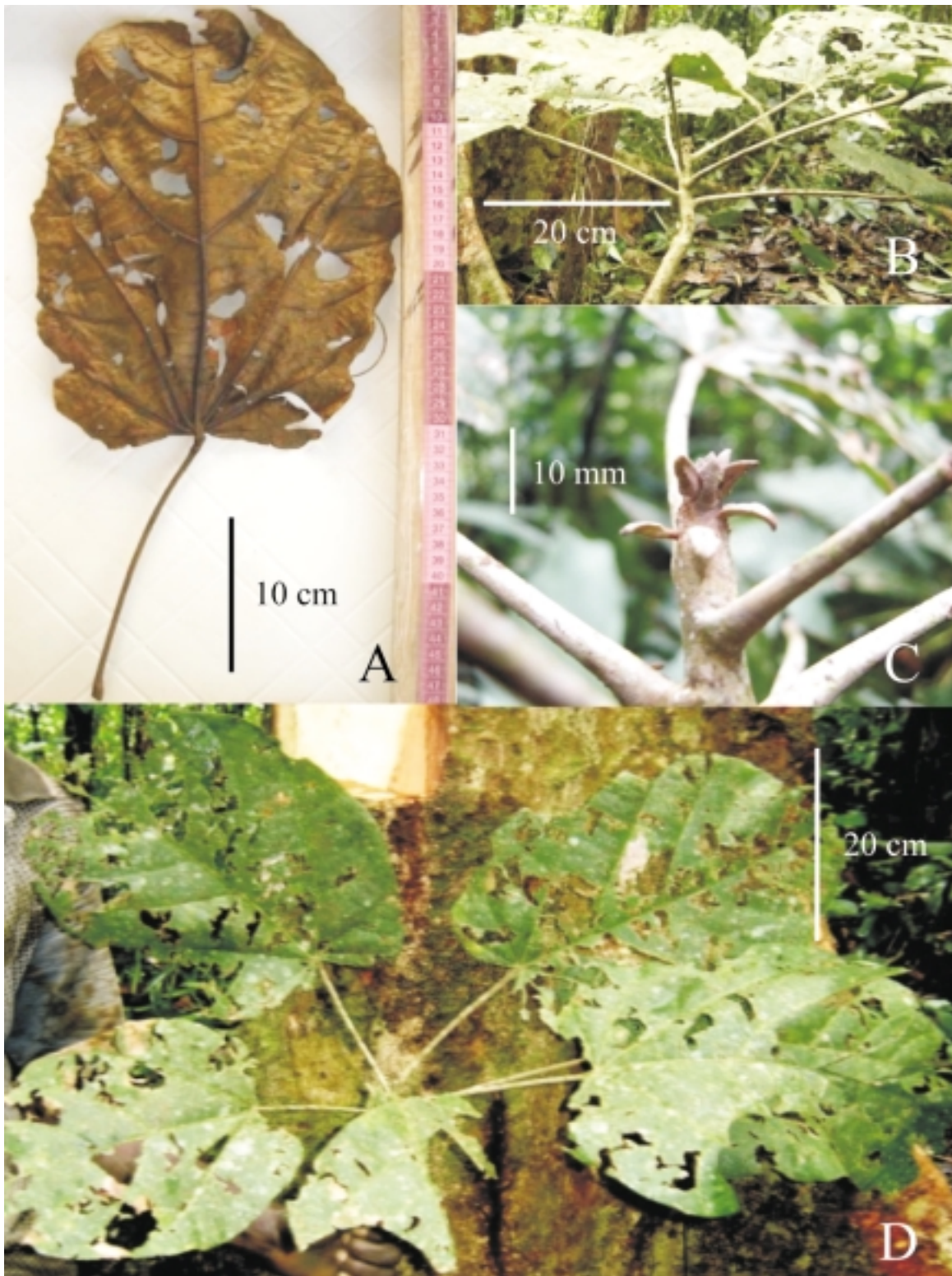


**Figura 1.** *Matisia gentryi*. Holotypus (A. Gentry & E. Rentería 23984, COL. 204320).

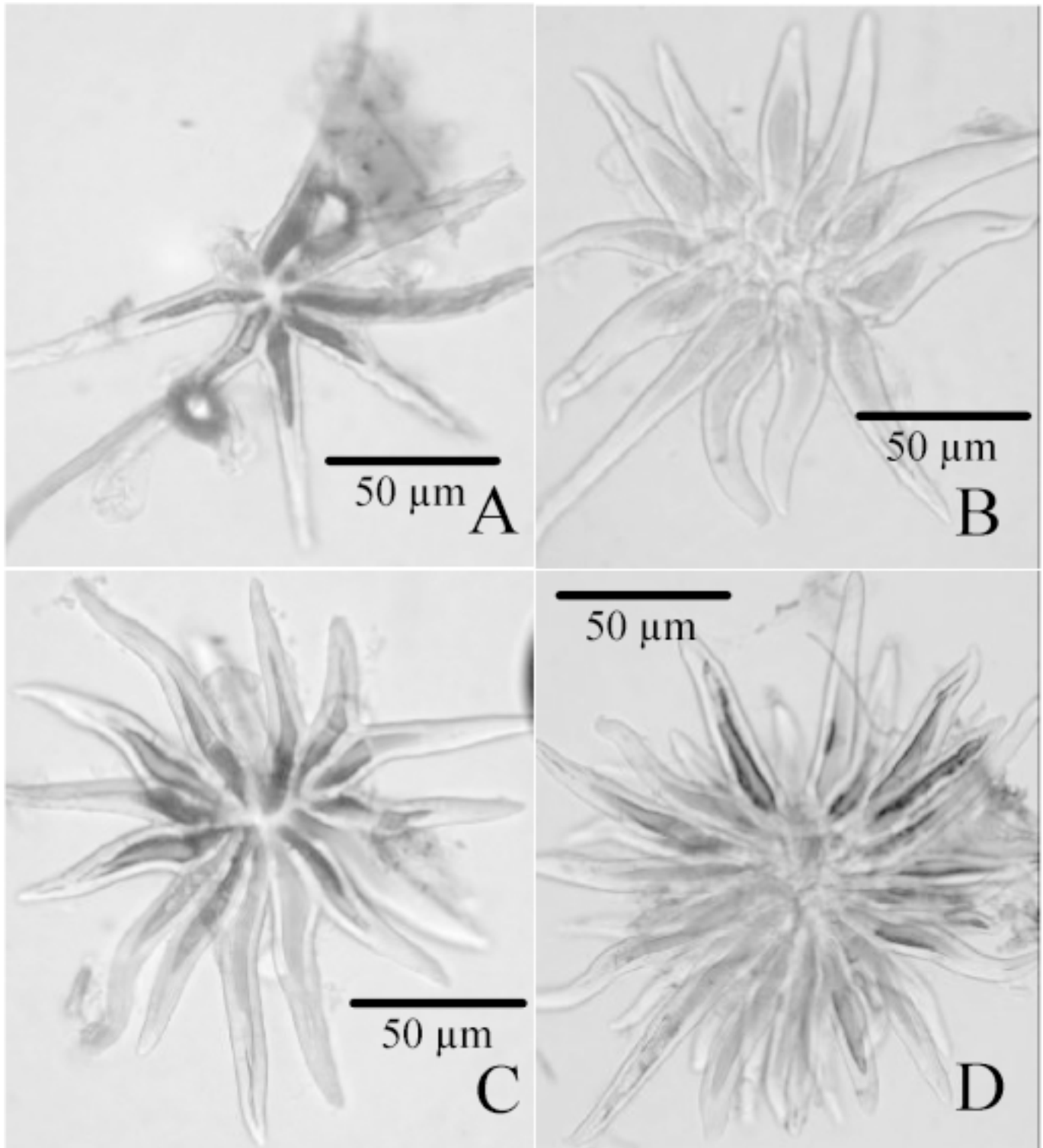


**Figura 2.** *Matisia gentryi*. **A.** Aletones en la base del tronco. **B.** Aspecto de la zona externa de la corteza. **C.** Aspecto del fuste y ramificación. **D-E.** Corte transversal y longitudinal del tronco; **cm**, corteza muerta; **cv**, corteza viva; **m**, madera (desde *H. Valois-Cuesta 424*, CHOCÓ, COL).



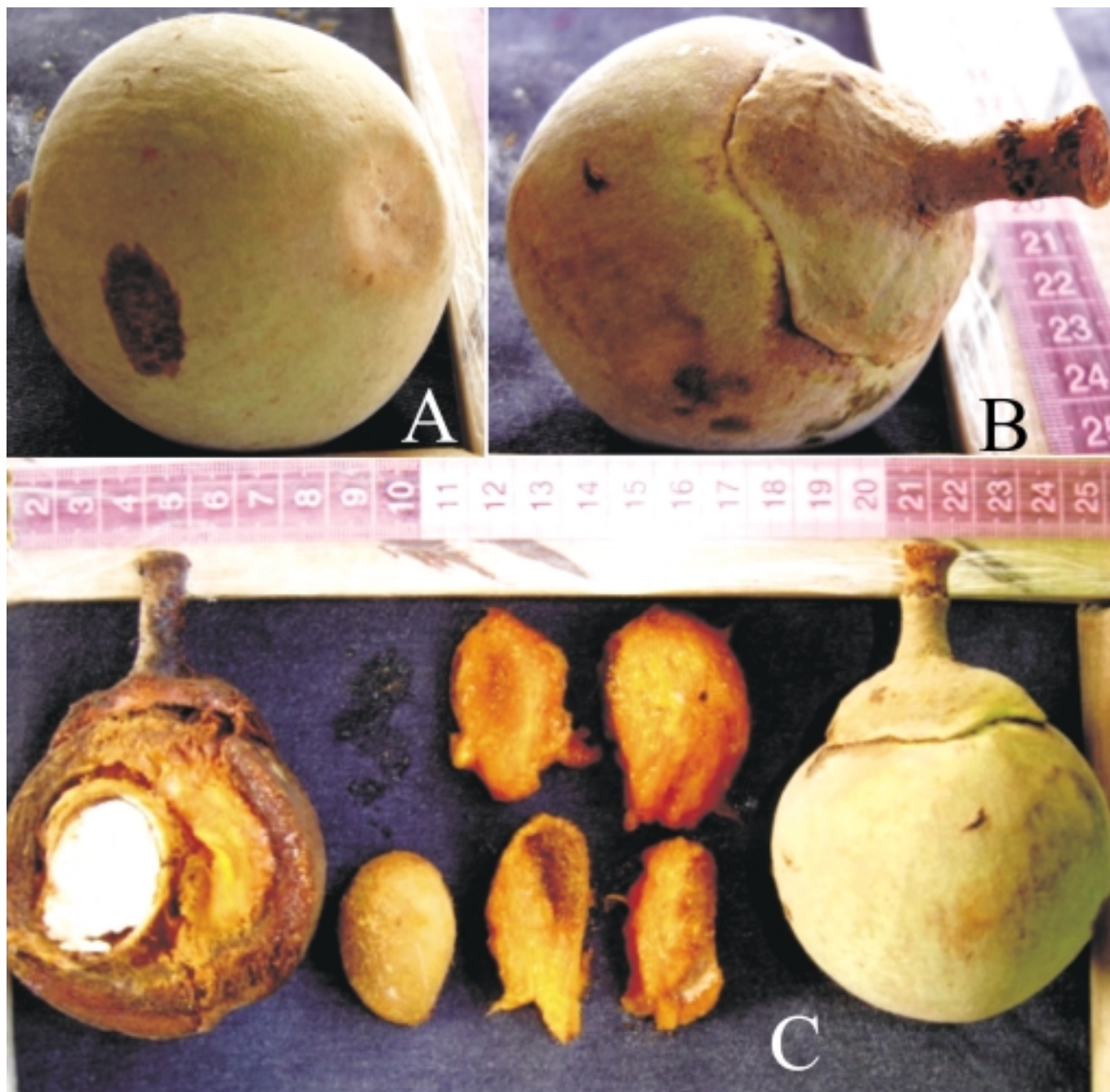


**Figura 3.** *Matisia gentryi*. **A.** Pecíolos y lámina foliar. **B.** Disposición de las hojas en ramas jóvenes. **C.** Yema terminal con brácteas coriáceas. **D.** Láminas foliares maduras (A. desde *H. Valois-Cuesta* 338 y **B-D.** desde *H. Valois-Cuesta* 424, CHOCÓ, COL).

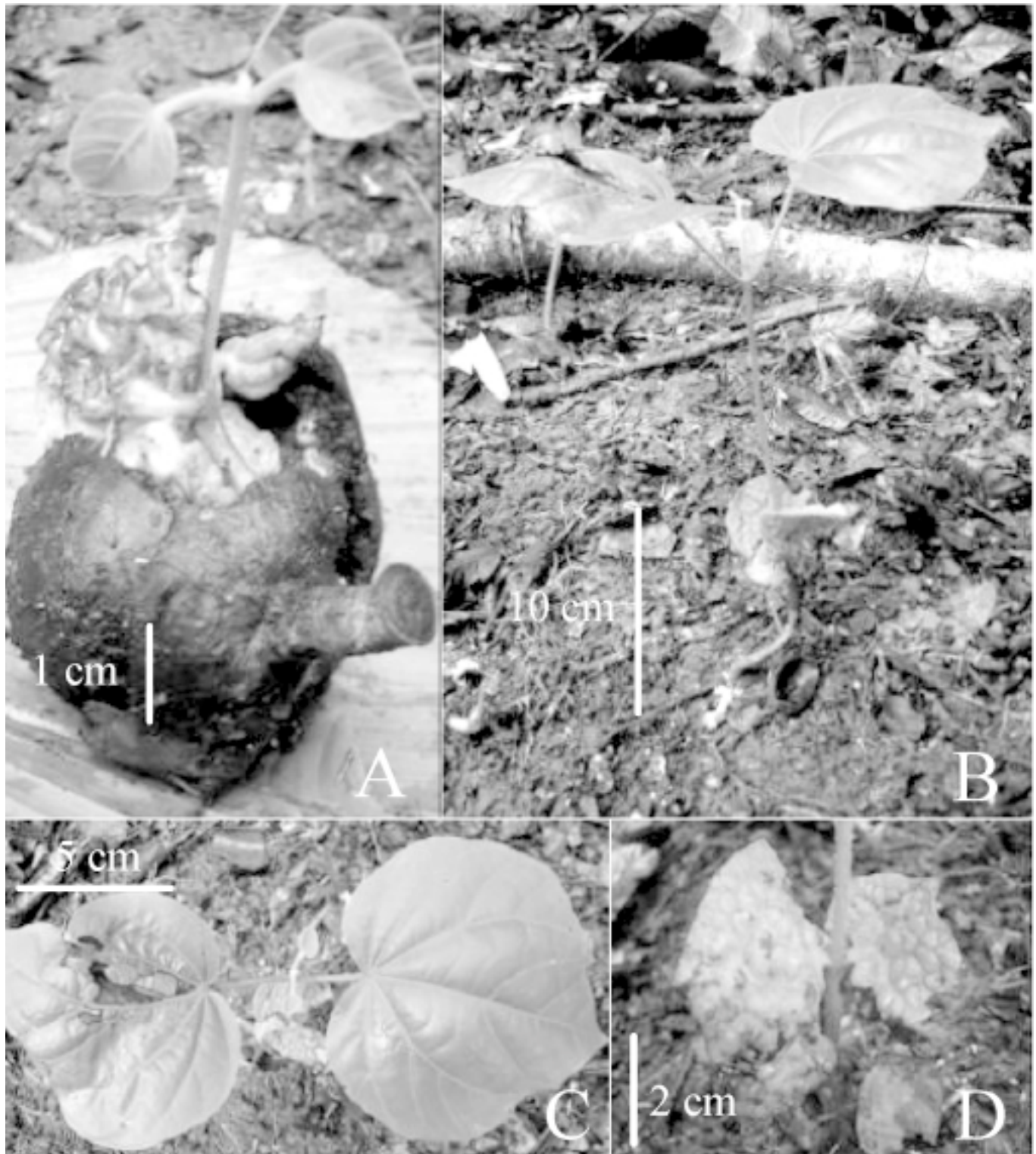


**Figura 4.** Microfotografía del indumento presente en el envés foliar de *Matisia gentryi*. A-C. Pelos presentes sobre la lámina. D. Pelos presentes sobre las nervaduras (desde *H. Valois-Cuesta 338*, CHOCÓ, COL).





**Figura 5.** *Matisia gentryi*. **A.** Depresión en el ápice del fruto. **B.** Pedicelo y cáliz fructífero. **C.** Corte vertical del fruto, semillas y aspecto externo del fruto (desde *H. Valois-Cuesta 338*, CHOCÓ, COL).



**Figura 6.** *Matisia gentryi*. **A.** Plántula germinado desde un fruto caído. **B.** Plántula con 5-7 semanas de desarrollo. **C.** Detalle del primer par de eofilos. **D.** Detalle de los cotiledones (desde *H. Valois-Cuesta 425*, CHOCÓ, COL).

La anterior descripción permite determinar que los rangos de variación morfométricos en las dimensiones de las hojas y los frutos de *M. gentryi* son mayores, tal como se puede apreciar en la Tabla 1.

**Consideraciones sobre la variabilidad morfométrica:**

aunque las muestras de *M. gentryi* obtenidas recientemente en el Alto Baudó presentan algunas diferencias morfométricas en comparación con las muestras de la localidad tipo (Paimadó, San Juan), las primeras, se consideran dentro de *M. gentryi* por exhibir láminas foliares anchamente obovadas con indumento diminutamente disperso en el envés y haz subglabro. Así mismo, las dimensiones de pecíolos, láminas foliares y senos en la base de la lámina reportados para la colección tipo, se ajustan perfectamente dentro de los rangos morfométricos observados en las colecciones provenientes del Alto Baudó (Tabla 1). Por otra parte, es probable que las diferencias morfométricas observadas entre los frutos de la serie típica y aquellos provenientes del Alto Baudó se deban más al estado de desarrollo de los mismos al momento de ser recolectados, que a una condición fenotípica estricta de la especie, pues al observar los frutos en la serie típica se puede apreciar que éstos al parecer corresponden a frutos inmaduros, a diferencia de las muestras provenientes del Alto Baudó, las cuales corresponden a frutos totalmente desarrollados (Figura 1 vs. 5). Un vistazo a la topografía de la región, permite además apreciar que entre Paimadó (localidad tipo) y Chachajo, Alto Baudó, de

donde provienen las colecciones recientes, no existen barreras biogeográficas que impidan la migración de elementos entre poblaciones, de hecho, ambas localidades se encuentran topográficamente dentro de la misma unidad de paisaje “colinas bajas” (ver mapa 6 en Poveda-M *et al.*, 2004).

**Nombres vernáculos y usos:** en el corregimiento de Chachajo, municipio del Alto Baudó, Chocó, *M. gentryi* es conocida con el nombre de “zapote de monte bravo” y sus frutos maduros son consumidos directamente desde el árbol. Este fruto tiene un sabor similar al fruto de *M. cordata* conocido como “zapote”, pero la pulpa de *M. gentryi* presenta una consistencia más fibrosa. Algunas personas de esta localidad manifestaron que la especie es poco observada, sin embargo, su madera puede ser usada para la construcción de viviendas (especialmente tablas para paredes de interiores) o para la elaboración de figuras artesanales.

**Ecología reproductiva:** los patrones fenológicos de *M. gentryi* son desconocidos, sin embargo, se han observado árboles con flores en junio y con frutos entre enero y junio. No existen registros sobre sus polinizadores, pero debido a las características de sus flores (inflorescencias ramifloras, flores tubulares con cáliz y corola de colores discretos) es posible que éstas sean polinizadas por murciélagos nectarívoros. En cuanto a la dispersión de frutos y semillas, no se observó evidencia de dispersores naturales durante el tiempo que duraron las observaciones en el Alto Baudó (marzo-junio de 2005), de hecho, muchos fru-

**Tabla 1.** Rangos de variación morfométrica en colecciones de *Matisia gentryi* del Chocó, Colombia

Caracteres	Localidades con colecciones		Rangos de variación morfométrica
	Paimado (San Juan)	Chachajo (Alto Baudó)	
	A. Gentry & E. Rentería 23984 (COL.) Tipo (Figura 1)	H. Valois-C 338 y 424 (COL, CHOCÓ) (Figuras 2-6)	
Longitud y diámetro del pecíolo	(4,5) 5,5 - 12 cm × 2-3 mm	4,4 - 21,5 cm × 1,5-2 (-4) mm	(4,4-) 5,5 - 12 (-21,5) cm × 1,5-2 (-4) mm
Largo y ancho de la lámina foliar	(11-) 13 - 23 × (9-) 10 - 20 cm	14 - 31 (41) × 12 - 27 (39) cm	(11-) 14 - 23 (-41) × (9-) 10 - 27 (-39) cm
Profundidad en el seno de la base de la hoja	hasta 1,5 cm	1,1 - 2,5 (-4) cm	(1,1-) 1,5 - 2,5 (-4) cm
Longitud y diámetro del pedicelo fructífero	1,8 - 2 cm × 5 - 7 mm	2,2 - 2,7 cm × 8 - 9 mm	(1,8-) 2,2 cm × 5 (-9) mm
Forma, largo y ancho del fruto	Oval – ovoide, 6 - 7 × 4,5 - 5 cm	Semiesféricos, 7 - 8,1 × 7 - 8 cm	(6-) 8,1 × (4,5-) 8 cm

tos en descomposición (con todas sus semillas dentro) fueron observados bajo la copa (aprox. 1-3 frutos · m<sup>-2</sup>) de los dos únicos árboles registrados en la zona. Es probable que debido a sus características, los frutos de *M. gentryi* sean consumidos por algunos mamíferos silvestres de la región tales como la guagua (*Cuniculus paca* Linnaeus), el tatabro (*Tayassu pecari* Link) y el zaino (*Tayassu tajacu* Linnaeus). Sin embargo, debido a la baja frecuencia con que se observaron los árboles en el área de estudio, no se descarta la posibilidad que esta especie presente un sistema de dispersión anacrónico (ver **Guimarães et al.**, 2008).

**Perspectivas para aprovechamiento sostenible:** *M. gentryi* es una especie promisorio y de distribución restringida, la cual merece ser estudiada en busca de su aprovechamiento y conservación, por ello, es de vital importancia adelantar esfuerzos investigativos para conocer la bromatología de sus frutos, las respuestas ecofisiológicas de sus plántulas e individuos juveniles y adultos, requerimientos microhabitacionales para su desarrollo, ecología reproductiva, dinámica poblacional y su adaptabilidad a sistemas cultivados, a fin de aplicar las tecnologías necesarias para su uso sostenible.

**Especímenes examinados.** COLOMBIA. **CHOCÓ:** ca. 50 Km al E de las Ánimas, 4 Km al E del Río Pató, Carretera Panamericana, 250 m, 11 Ene 1979 (fl, fr), *A. Gentry & E. Rentería 23984* (holótipo, COL); Municipio del Alto Baudó, Corregimiento de Chachajo, bosque primario en los Cerros de Chachajo, 100-150 m, Mar 2005 (fr), *H. Valois-Cuesta 338* (CHOCO, COL), Quebrada Chachajo, 6 Jun 2005 (fr), *H. Valois-Cuesta 424* (CHOCO, COL), bosque primario en los Cerros de Chachajo 6 Jun 2005 (Plántulas) *H. Valois-Cuesta 425* (CHOCO, COL).

## Agradecimiento

A la comunidad de Chachajo, Alto Baudó por su gentil hospitalidad y colaboración durante el trabajo de campo. A la Universidad Tecnológica del Chocó en el marco del proyecto “Estudio de Impacto Ambiental de la carretera Ánimas-Nuquí”.

## Bibliografía

- Fernández-Alonso, J. L.** 2001. Bombacaceae Neotropicae Novae vel Minus Cognitae I. Novedades taxonómicas y corológicas en *Matisia*, *Quararibea* y *Spirotheca*. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **25**(95): 183-2006.
- . 2002. Bombacaceae Neotropicae Novae vel Minus Cognitae III. Nuevas especies de *Matisia* y *Quararibea* de Colombia. Novon **12**: 343-351.
- . 2004. Bombacaceae, pp. 165-170. En: J. O. Rangel-Ch. (ed), Colombia diversidad biótica IV. El Chocó Biogeográfico. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Guimarães, P. R., M. Galetti & P. Jordano.** 2008. Seed dispersal anachronisms: Rethinking the fruits extinct megafauna ate. PLoS ONE **3** (3): e1745. DOI: 10.1371/journal.pone.0001745.
- León, B.** 2006. Bombacaceae endémicas del Perú. Revista Peruana de Biología **13**: 175-176.
- Poveda-M, C., C. A. Rojas-P., A. Rudas-LI. & J. O. Rangel-Ch.** 2004. El Chocó biogeográfico: Ambiente biofísico, pp 1-21. En: J. O. Rangel-Ch. (ed), Colombia Diversidad Biótica IV. El Chocó Biogeográfico. Mapa 6. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Recibido: octubre 15 de 2009.

Aceptado para su publicación: febrero 12 de 2010.



# VARIABLES AMBIENTALES, SENSORES REMOTOS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APLICADOS AL ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE *RHODNIUS PROLIXUS* EN COLOMBIA

Por

Felipe Guhl<sup>1</sup>

Resumen

**Guhl, Felipe:** Variables ambientales, sensores remotos y sistemas de información geográfica aplicados al estudio de la distribución de *Rhodnius prolixus* en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (130): 27-35, 2010. ISSN 0370-3908.

Utilizando la base de datos de triatominos creada a partir de la encuesta entomológica que se realizó entre los años de 1997 y 2001 por el Programa Nacional de Control de la Enfermedad de Chagas (PNCECH) y mapas con imágenes temporales satelitales de 57 variables ambientales se construyeron varios mapas predictivos de la dispersión de *Rhodnius prolixus* en Colombia a partir de las imágenes temporales, un análisis de Fourier y un análisis estadístico multivariado discriminante de las variables estudiadas. Los mapas muestran la dispersión de esta especie, y las posibles implicaciones de la dispersión de este triatomo en la transmisión de la enfermedad de Chagas en Colombia.

Se encontró una marcada división en la predicción de la dispersión de *R. prolixus* en dos zonas geográficas: una zona al suroriente de la cordillera oriental, la cual esta muy asociada a las variables ambientales utilizadas en el presente estudio otra zona al oriente de la cordillera oriental en los valles interandinos no muy bien definida por las mismas variables, lo que supone que la zona suroccidental de Colombia es propensa a una dispersión mas amplia de *R. prolixus* asociada a otras variables ambientales diferentes a las de la zona nororiental en donde podría estar asociada mas a las intervenciones humanas.

En esta región de los Llanos orientales, se encontraron recientemente poblaciones silvestres de *R. prolixus* en palmas de la especie *Attalea butyracea*, lo cual confirma la predicción de la presencia de esta especie en la región.

**Palabras clave:** *Rhodnius prolixus*, dispersión, mapas predictivos, sistemas de información geográfica.

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones en Microbiología y Parasitología Tropical –CIMPAT–. Facultad de Ciencias. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: fguhl@uniandes.edu.co



### Abstract

A data base of the entomological survey performed during the Chagas Disease National Control Programme (**CHDNCP**) in 1997-2001 and temporal satellite images maps containing 57 environmental variables were used to build *Rhodnius prolixus* dispersion predictive maps in Colombia, based on temporal images, Fourier analyses and a discriminative multivariate statistical analyses of the variables studied. The maps show the dispersion of this species and its implication on the Chagas disease transmission in Colombia.

A clear division in the predictive dispersion of *R. prolixus* in two geographical zones was found: one area in the southeast of the Eastern Cordillera associated with the environmental variables used in the present study and a second zone in the Andean Valleys, East of the Eastern Cordillera not much defined by the same variables. This would suggest that the Southwest Region of Colombia presents a tendency to a wider dispersion of *R. prolixus* associated to other variables like human intervention.

Sylvatic populations of *R. prolixus* were found recently in *Attalea butyracea* palm trees in this Region of the Eastern Planes demonstrating the prediction of the presence of this species.

**Key words:** *Rhodnius prolixus*, dispersion, predictive maps, geographical information systems.

### Introducción

El estimativo de la prevalencia de la infección humana por *Trypanosoma cruzi* en Colombia es de 1 300 000 habitantes y de alrededor 3 500 000 individuos bajo riesgo de adquirir la infección de acuerdo a la distribución geográfica de los insectos vectores. (**OPS-WHO-TDR**. 2007).

Si se tiene en cuenta que el principal mecanismo de transmisión de la enfermedad de Chagas es a través del contacto del hombre y los animales reservorios con los insectos vectores, el conocimiento de la distribución de los triatomíneos es de gran importancia para poder encaminar de manera adecuada las medidas de control y prevención (**Guhl F, et al.** 2004).

La presente publicación recopila la información de registros de triatomíneos a nivel departamental y municipal obtenida durante el desarrollo del programa nacional de control de la enfermedad de Chagas (1997-2001), (**Padilla J. C.** 2005). Teniendo en cuenta la frecuencia con que se reportan las diferentes especies de triatomíneos en el domicilio y peridomicilio, se consideran las siguientes como las de mayor riesgo de transmisión en Colombia: *Rhodnius prolixus*, *Triatoma dimidiata*, *Triatoma maculata* y *Triatoma venosa*.

Sin duda *R. prolixus* es la especie que representa el vector más eficiente en la transmisión del parásito dadas sus características biológicas: rápidas tasas de reproducción, alto grado antropofílico, adaptación al medio ambiente humano, rápidas tasas de defecación y alimentación exclu-

sivamente hematofaga. (**Guhl F., Pinto N., Aguilera G., Vergara D.** 2007).

Durante las últimas décadas, el número de casos de enfermedad de Chagas en Colombia muestra un aumento de tipo exponencial y hay evidencias sobre nuevos escenarios epidemiológicos de la enfermedad como por ejemplo transmisión por vía oral. La enorme extensión de la región y el pobre conocimiento de terreno plantean uno de los principales problemas a resolver, para diseñar estrategias que permitan instalar un sistema de vigilancia entomológico adecuado (**Guhl F.** 2007).

El presente trabajo describe un enfoque metodológico que permite estimar la distribución geográfica de *R. prolixus* apoyándose en datos colectados en terreno y datos producidos por sensores remotos, integrados en bases de datos espaciales administradas con sistemas de información geográfica. La identificación de otras áreas con características espaciales semejantes se puede obtener analizando la información espacial digital con métodos estadísticos multivariados. Como siempre, toda predicción basada en modelos cuantitativos, debe ser verificada con datos independientes colectados en terreno.

La caracterización del ambiente en donde se encuentran los insectos constituye una información básica para proponer mapas predictivos de dispersión. Aún cuando las condiciones microambientales son las que afectan de modo directo las propiedades biológicas de las poblaciones de Triatominae, diferentes estudios mostraron que las condiciones medidas a mayores escalas espaciales pueden resultar

útiles indicadores que están asociados directa o indirectamente a la biología poblacional de las especies.

Las medidas ambientales a escalas macro pueden obtenerse por medición directa de sensores remotos, por estimaciones que combinan datos de diferentes bandas espectrales de un sensor o a partir de datos colectados por agencias que realizan relevamientos de índole diversa en formatos digitales integrables al resto de la información ambiental en bases de datos espaciales. Si bien las predicciones muestran un alto grado de acierto, debe tenerse en cuenta que tales resultados ofrecen solamente una indicación sobre cuán apropiada es un área sobre la base de características ambientales.

En síntesis, el uso de datos producidos por sensores remotos, integrados con otros datos ambientales en formato digital, usando bases de datos espaciales permite avanzar sobre la posibilidad de estudiar la distribución de *Triatominae* y aspectos espaciales de la prevalencia. Si bien ya existe una gran cantidad de datos en formato inmediatamente usable para el estudio de *Triatominae*, la única posibilidad de avanzar efectivamente sobre el conocimiento del problema está sustentada en la idea del uso compartido de datos colectados en terreno, única fuente de información que dará validez a las predicciones que puedan realizarse usando este enfoque de trabajo (Gorla D.E. 2002).

**Materiales y métodos**

**Materiales de campo**

Se utilizó una base de datos de presencia de triatominos de Colombia creada a partir de la encuesta entomológica que se realizó a nivel nacional entre los años de 1997 y 2001 por parte del Programa Nacional de Control de la Enfermedad de Chagas PNCECH, la cual tiene 2 137 registros de 15 departamentos, de los cuales 770 corresponden a la presencia de *R. prolixus*. Para crear el mapa de presencia y de ausencia de *Rhodnius prolixus* se utilizó el mapa de Colombia con la división municipal publicado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Los mapas a nivel veredal del departamento de Casanare fueron creados en el CIMPAT entre los años 2000 y 2003 a partir de georeferenciación de las cabeceras municipales y otros sitios índice en cada municipio.

**Datos satelitales**

Los datos satelitales se obtuvieron a partir de mapas con imágenes satelitales de 57 diferentes variables ambientales. Las variables utilizadas en el estudio son resultado de un análisis temporal de imágenes mensuales con el mé-

todo de series de Fourier para datos de Sudamérica entre 1982 y 2000 con resolución espacial de 8 x 8 Km, obtenidas a partir se la serie de satélites NOAA.

A continuación se enumeran las variables utilizadas en el estudio.

NDVI	Índice Normalizado de diferencia de Vegetación
NDVIAO	Amplitud promedio
NDVIA1	Amplitud anual
NDVIA2	Amplitud bianual
NDVIA3	Amplitud trianual
NDVID1	Proporción de la varianza anual
NDVID2	Proporción de la varianza bianual
NDVID3	Proporción de la varianza trianual
NDVIP1	Fase anual
NDVIP2	Fase bianual
NDVIP3	Fase trianual
NDVIMN	Mínima
NDVIMX	Máxima
NDVIVR	Varianza total
NDVIDALL	Porcentaje de la varianza total
LST	Temperatura de la superficie terrestre
LSTAO	Amplitud promedio
LSTA1	Amplitud anual
LSTA2	Amplitud bianual
LSTA3	Amplitud trianual
LSTD1	Proporción de la varianza anual
LSTD2	Proporción de la varianza bianual
LSTD3	Proporción de la varianza trianual
LSIP1	Fase anual
LSTP2	Fase bianual
LSTP3	Fase trianual
LSTMN	Mínima
LSTMX	Máxima
LSTVR	Varianza total
LSTDALL	Porcentaje de la varianza total
MIR	Infrarrojo Medio
MIRAO	Amplitud promedio
MIRA1	Amplitud anual
MIRA2	Amplitud bianual
MIRA3	Amplitud trianual
MIRD1	Proporción de la varianza anual
MIRD2	Proporción de la varianza bianual
MIRD3	Proporción de la varianza trianual
MIRP1	Fase anual
MIRP2	Fase bianual
MIRP3	Fase trianual
MIRMN	Mínima
MIRMX	Máxima
MIRVR	Varianza total
MIRDALL	Porcentaje de la varianza total

TEMP	Temperatura del Aire
TEMPO	Amplitud promedio
TEMPA1	Amplitud anual
TEMPA2	Amplitud bianual
TEMPA3	Amplitud trianual
TEMPD1	Proporción de la varianza anual
TEMPD2	Proporción de la varianza bianual
TEMPD3	Proporción de la varianza trianual
TEMPPP1	Fase anual
TEMPPP2	Fase bianual
TEMPPP3	Fase trianual
TEMPMN	Mínima
TEMPMX	Máxima
TEMPVR	Varianza total
TEMPDALL	Porcentaje de la varianza total
DEM	Modelo de Elevación Digital

### Análisis de los datos

A partir de los datos obtenidos con el programa IDRISI 32 se realizó un Análisis Discriminante por pasos (Forward) con el fin de identificar cuales eran las variables que tenían un mayor peso en el modelo y aportaban en mayor proporción a la descripción de la distribución de *R. prolixus*. Este análisis se llevo a cabo en el programa STATISTICA.

### Creación de los modelos predictivos

Se crearon dos modelos predictivos a partir de los datos de presencia y de ausencia de *R. prolixus* de la encuesta entomológica del PNCECH. En cada uno de estos modelos se utilizó el 50% de los registros de presencia y de ausencia escogidos en forma aleatoria desde el programa Excel.

Para tales predicciones se crearon dos grupos de datos: el grupo 1 que contenía un 50% tanto de los datos de presencia como de ausencia, datos con los que se prepararía la predicción 1. El grupo 2 se creó a partir del otro 50% de los datos.

Un tercer modelo se generó con todos los registros de la base de datos menos los registros del departamento de Casanare.

Un cuarto modelo se creó solo con los datos de Casanare del PNCECH a nivel municipal y con los registros obtenidos de la Secretaria de Salud de Casanare en Yopal, donde existían registros de presencia de *R. prolixus* a nivel veredal entre los años 1996 y 2001.

Un quinto modelo se generó con el 100% de los registros obtenidos a partir del PNCECH de Colombia a nivel municipal sin los datos de Casanare mas los datos de Casanare a nivel veredal utilizados en el modelo anterior.

## Resultados y discusión

### Predicción 1

A partir del análisis Discriminante de los datos del grupo 1 se generó una función de predicción de presencia y ausencia de *R. prolixus* con las siguientes variables ambientales: NDVID3, ATP1, MIRDP3, NDVID2, NDVID1, LSTP1 Y ATD3. Los resultados arrojaron un mapa predictivo que clasifica correctamente el 93.58% de los sitios de ausencia y un 39.82% de los sitios de presencia. El valor obtenido para presencia es bastante bajo, por lo cual esta predicción no constituye un buen modelo.

**Tabla 2.**  
Clasificación de los puntos en la Predicción 1

%	Correcto
<b>Ausencia</b>	57.2
<b>Presencia</b>	27.47
<b>Total</b>	62.71



**Figura 1.** Mapa creado a partir de la Predicción 1.

De las 7 variables escogidas para crear este modelo predictivo por medio del Análisis discriminante de STATISTICA la que mas peso presentó fue la varianza trianual del Índice Normalizado de la Diferencia de Vegetación NDVID3, seguido por la Varianza Bianual NDVID2. (Tabla 3).

**Tabla 3.** Coeficientes Estandarizados de las variables Canónicas de la Predicción 1

Variable	Coefficiente
NDVID3	-0.659325421
NDVID2	-0.387326986
ATD3	-0.204907328
MIRDP3	0.299620181
ATP1	0.313381523
LSTP1	0.31834805
NDVID1	0.318880171
Eigenval	0.309231967

**Predicción 2**

La predicción del grupo 2 creada a partir del análisis discriminante de las variables estudiadas generó un mapa predictivo que clasifica correctamente el 93.58 % de los sitios de ausencia y un 39.82 % de los sitios de presencia, valor mucho mayor que el de la predicción 1, pero un poco bajo para los datos de presencia.



**Figura 2.** Mapa creado a partir de la Predicción 2.

**Tabla 4.** Clasificación de los puntos en la Predicción 2

%	Correcto
<b>Ausencia</b>	93.58
<b>Presencia</b>	39.82
<b>Total</b>	81.02

Las variables ambientales en esta predicción fueron: LSTDALL, NDVIDALL, LSTP3, LSTMN, MIRA0, DEM, NDVIA0 y ATMX. Las dos variables más importantes en esta predicción y que tienen mas peso para discriminar presencia y ausencia fueron la Amplitud Promedio del Infrarrojo Medio **MIRA0** y la Mínima de la Temperatura de la Superficie Terrestre **LSTMN**. (Tabla 5).

**Tabla 5.** Coeficientes Estandarizados de las variables Canónicas de la Predicción 2

Variable	Coefficientes
<b>MIRA0</b>	-2.7512664795
<b>LSTMN</b>	2.6656243801
<b>LSTDALL</b>	1.0194313526
<b>ATMX</b>	0.8668866158
<b>NDVIA0</b>	-0.7796301842
<b>NDVIDALL</b>	-0.6961287856
<b>DEM</b>	0.5359612703
<b>LSTP3</b>	-0.2293633968
<b>Eigenval</b>	1.3706891537

Tanto la predicción 1 como la predicción 2 muestran extensas áreas en los departamentos de Casanare y Meta, lugares con presencia de *R. prolixus*, pero las áreas mayores se encuentran en las zonas orientales de la cordillera de los Andes, hacia los Llanos Orientales y parte de la Amazonía colombiana.

Los datos de presencia de insectos en Casanare imprimen un mayor peso a la presencia de triatomíneos en esta región, lo que en un principio parecería indicar que el tamaño de estos municipios estaba sesgando los datos predictivos. Al tomarse como positivo un municipio completo por la presencia de *R. prolixus* en al menos una vereda de ese mismo municipio se generan áreas muy grandes de presencia.

**Predicción 3**

Para verificar lo anteriormente expuesto, se generó un tercer grupo de datos, los cuales contenían todos los registros de presencia y de ausencia de *R. prolixus* de Colombia, excepto los del departamento de Casanare. Esta



predicción clasificó correctamente el 99.05 % de los sitios de ausencia y tan solo un 4.51 % de los sitios de presencia. (Tabla 6).

**Tabla 6.**  
Clasificación de los puntos en la Predicción 3

%	Correcto
<b>Ausencia</b>	99.05
<b>Presencia</b>	4.51
<b>Total</b>	88.10

**Tabla 7.** Coeficientes Estandarizados de las variables Canónicas de la Predicción 3

Variable	Coefficientes
ATD2	-0.89274025
ATA2	0.61631793
NDVID3	0.54578185
NDVID2	0.51866382
LSTP3	-0.44489008
DEM	0.42364791
LSTP1	-0.30243760
Eigenval	0.09507178

Esta predicción confirmó que la región de Casanare estaba dándole un gran peso a la predicción, y que al excluir estos registros en el análisis, esta perdía casi totalmente su capacidad de discriminar la presencia de *R. prolixus* en el modelo.

#### Predicción 4

Al analizar los resultados de la predicción 3, en la que no estaban incluidos los registros municipales de presencia y ausencia de *R. prolixus* para el departamento de Casanare, surgió una nueva posibilidad que consistió en analizar los datos para este departamento.

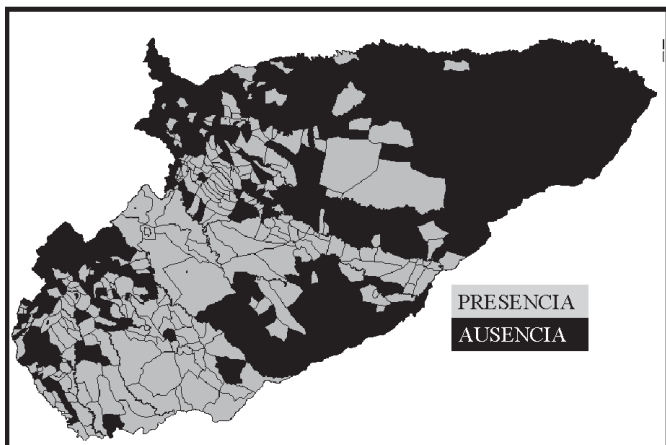
Dado que en el CIMPAT se ha trabajado en la elaboración de mapas a nivel veredal de los departamentos de alto riesgo para la transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas, y teniendo en cuenta que Casanare es uno de los departamentos que posee información completa de los registros de ausencia y de presencia de *R. prolixus*, se procedió a hacer una clasificación a nivel veredal de todos los municipios del departamento y un análisis de esta zona exclusivamente.

Los resultados arrojaron una cuarta predicción que clasificó correctamente el 79.72 % de los sitios de ausencia y un 69.8 % de los sitios de presencia, demostrando la importancia de la asociación de las variables ambientales con la presencia de *R. prolixus* en Colombia. (Tabla 8).

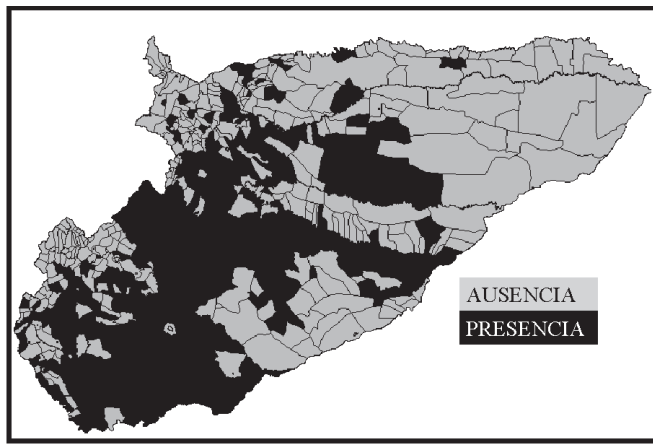
**Tabla 8.**  
Clasificación de los puntos en la Predicción 4

%	Correcto
<b>Ausencia</b>	79.72
<b>Presencia</b>	69.80
<b>Total</b>	75.64

#### Presencia



#### Ausencia



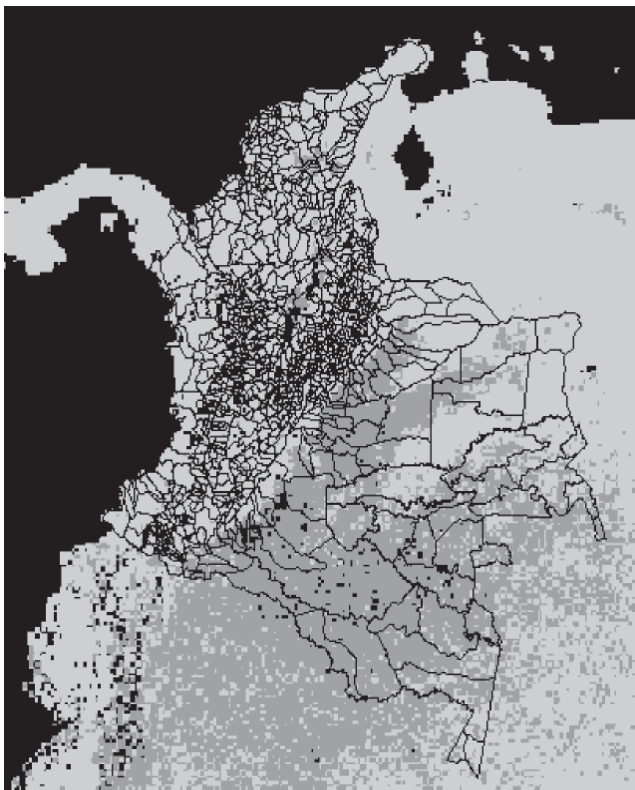
**Figura 3.** Mapas veredales de presencia y ausencia de *R. prolixus* en el departamento de Casanare.

Las dos variables más importantes en esta predicción fueron la Proporción de la Varianza Anual de la Temperatura del Aire **ATD1** y la Varianza Anual del Índice Normalizado de la Diferencia de Vegetación **NDVID1**. (ver Tabla 9).

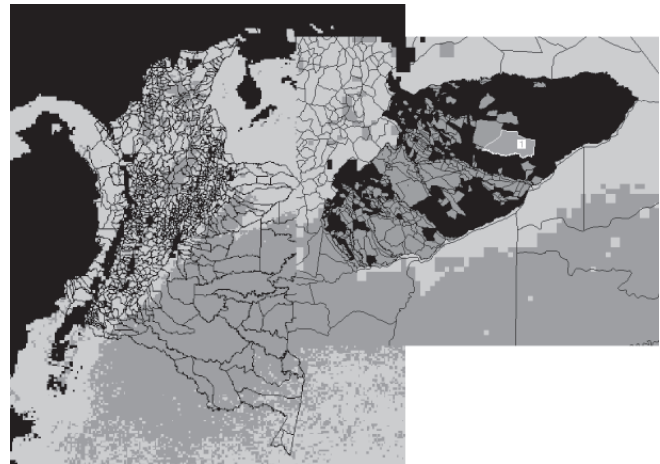
**Tabla 9.** Coeficientes Estandarizados de las variables Canónicas de la Predicción 4

Variable	Coefficiente
<b>ATD1</b>	0.888934791
<b>NDVID1</b>	0.823421597
<b>NDIVIA1</b>	-0.628877461
<b>ATA2</b>	-0.512016237
<b>NDVIMX</b>	0.332730114
<b>MIRP2</b>	-0.328334123
<b>ATP2</b>	-0.293035269
<b>MIRP1</b>	-0.223063365
<b>Eigenval</b>	0.429521561

A partir de este modelo, se puede crear un mapa predictivo de la presencia de *R. prolixus*. (Figura 5 y Tablas 10 y 11).



**Figura 4.** Mapa de Predicción 4, a partir de los datos veredales de presencia y ausencia de *R. prolixus* en el departamento del Casanare.



**Figura 5.** Mapa de Predicción 4 ajustado a partir de los datos veredales de presencia y ausencia de *R. prolixus* en el departamento del Casanare.

**Tabla 10.** Clasificación de los puntos en la Predicción 4 ajustada a 4 variables ambientales

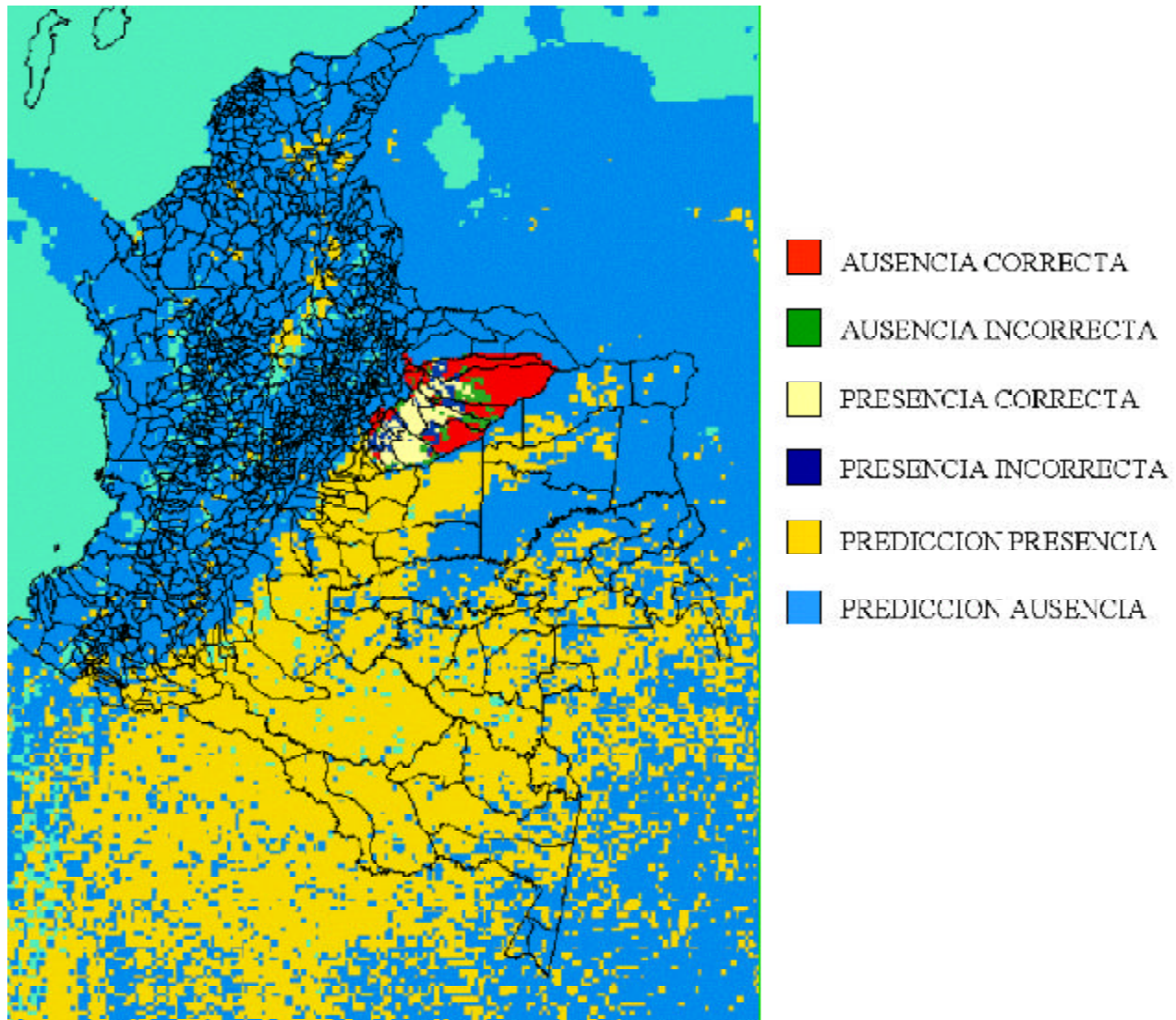
%	Correcto
<b>Ausencia</b>	80.30
<b>Presencia</b>	65.27
<b>Total</b>	74.12

**Tabla 11.** Coeficientes Estandarizados de las variables Canónicas de la Predicción 4 ajustada para 4 variables

Variable	Coefficiente
<b>NDVID1</b>	1.313719988
<b>NDIVIA1</b>	-0.748224258
<b>MIRP2</b>	-0.381692499
<b>MIRP1</b>	-0.258426487
<b>Eigenval</b>	0.344783336

A partir de este último mapa predictivo se logró determinar las áreas correctamente clasificadas por el modelo. (Figura 6).

Estos datos apuntan a que existen dos zonas de presencia de *R. prolixus* en Colombia las cuales están separadas por la cordillera de los Andes y en donde la zona 1 se encuentra en la parte noroccidental de la cordillera central entre los valles interandinos y la zona 2 al oriente y al sur de la cordillera oriental. Esta ultima zona esta mas relacionada con variables ambientales, en donde clasifica de forma definida la presencia de *R. prolixus*, mientras que en la zona 1 la asociación con estas variables ambientales es más baja. Esto se puede deber a que la presencia de *R.*



**Figura 6.** Clasificación del Mapa de Predicción 4 ajustado a partir de los datos veredales de presencia y ausencia de *R. prolixus* en el departamento del Casanare y extrapolado al resto del territorio nacional.

*prolixus* en esta zona se deba exclusivamente a poblaciones domiciliadas, dispersadas pasivamente a través de migraciones humanas (López D. C. *et al.* 2007).

La predicción de la zona 2 fue verificada por nuestro grupo de trabajo. Se reportó por primera vez la presencia *R. prolixus* silvestres en las palmas de la especie *Attalea butyracea*, en los municipios de Villanueva y Maní del departamento de Casanare, (Pinto N. *et al.* 2005., 2007), como también en cultivos agroindustriales de palma africana (*Elaeis guineensis*), (Guhl F. *et al.* 2005). estos resultados confirman una asociación directa de estas poblaciones silvestres con las variables ambientales estudiadas.

## Conclusiones

Como lo muestran los diferentes mapas predictivos de dispersión de *R. prolixus* creados en este trabajo y en especial el mapa de la predicción 4 (ver Fig. 5), se confirmó una relación estrecha entre las poblaciones silvestres de este triatomino y las variables ambientales usadas para la creación de los mapas, presentando un alto riesgo para la transmisión de la enfermedad de Chagas ya que las poblaciones silvestres de estos triatominos tienen la capacidad de colonizar, infestar o reinfestar las viviendas cercanas tanto a los cultivos agroindustriales de palma de aceite, como a los bosques nativos de *Attalea butyracea* (Campbell-

Lendrum, D.H. *et al.* 2007) en donde además estos insectos se han encontrado infectados con *Trypanosoma cruzi*, agente causal de la enfermedad de Chagas. (Pinto N., Aguilera G. *et al.* 2007).

El uso de sistemas de información geográfica para la creación de mapas predictivos para el control y prevención de la enfermedad de Chagas en Colombia es una herramienta de gran importancia, ya que se pueden predecir los posibles sitios en los que una especie determinada de triatomino se podría encontrar, permitiendo así la generación de estrategias y herramientas adecuadas para un control vectorial efectivo.

### Agradecimientos

Agradecimientos especiales a Germán Aguilera por el procesamiento de datos estadísticos y ayuda en la elaboración de los datos, a Néstor Pinto por la captura e identificación taxonómica de insectos y a David E. Gorla director del Instituto CRILAR en La Rioja, Argentina por el valioso soporte en el manejo y análisis de datos y a la Secretaría de Salud de Casanare, The Wellcome Trust Project: 062984/Z/00/Z.

### Bibliografía

- Campbell-Lendrum, D.H., Angulo, V. M., Esteban, L., Tarazona, Z., Parra, G.J., Restrepo, M., Restrepo, B., Guhl, F., Pinto, N., Aguilera, G., Wilkinson, P. & Davies, CR. 2007. House-level risk for triatomine infestation in Colombia. *International Journal of Epidemiology*: 36: 866-872.
- Guhl, F. 2007. Epidemiología de la enfermedad de Chagas en Latinoamérica y Colombia. En Fernando Rosas, Diego Vanegas y Mauricio Cabrales (Eds.), *Enfermedad de Chagas*. (pp. 7-14). Bogotá, Colombia.: Panamericana Formas e Impresos S.A. ISBN 978-958-97065-9-6.
- , Pinto, N., Marin, D., Herrera, C., Aguilera, G., Naranjo, J. M., Vallejo, G. 2005. Primer reporte de *Rhodnius prolixus* Stal, en *Elaeis guineensis* I, variedad Papúa, en plantaciones agroindustriales de Villanueva, Casanare. En *Memorias: XII congreso Colombiano de Parasitología y Medicina Tropical*. BIOMÉDICA. 25, (Supl. 1):158.
- Gorla, D. E. 2002. Introducción a los sistemas de información geográfica y al uso de sensores remotos. En *memorias: curso taller internacional sistemas de información geográfica, sensores remotos y genética poblacional de vectores y parásitos aplicados al control de la enfermedad de Chagas*. Editores F. Guhl, C. Jaramillo, Ed. Corcas, Universidad de los Andes. 2-6 de diciembre 2002. pp. 203-206.
- , Angulo, V., Restrepo, M., Nicholls, S., Montoya, R., 2004. Estado del arte de la enfermedad de Chagas en Colombia y estrategias de control. *Biomédica*. 23 (Supl. 1): 31-33.
- Guhl, F., Pinto, N., Aguilera, G., Vergara, D. 2007. Actualización de la distribución geográfica y ecoepidemiología de la fauna de triatominos (Reduviidae: Triatominae) en Colombia. *Biomédica*. 27 (Supl. 1): 143-162.
- López, D. C., Jaramillo, C., Guhl, F. 2007. Estructura poblacional y variabilidad genética de *Rhodnius prolixus* (Hemiptera: Reduviidae) procedente de diferentes áreas geográficas de Colombia. *Biomédica*. 27 (Supl. 1): 28-39.
- OPS-WHO-TDR. 2007. Reporte sobre la enfermedad de Chagas, Grupo de trabajo científico 17–20 de abril de 2005 - Actualizado en julio de 2007 - Buenos Aires, Argentina. TDR/SWG/09. PP 1-96.
- Pinto, N., Aguilera, G., Guhl, F., Vallejo, G., Beltran, D., Rozo, J., Bogotá, Y., Fajardo, A., Herrera, C., Villa, L., Marin, D., Urrea, D., Hincapié, E. 2007. *Rhodnius prolixus* capturados en *Attalea butyracea* y *Elaeis guineensis* en Casanare-Colombia: indicadores entomológicos. (*Rhodnius prolixus* from Casanare-Colombia captured in *Attalea butyracea* and *Elaeis guineensis*: entomological indicators). *Memorias XVIII Congreso Latino Americano de Parasitología, Boletín de Malariología y Salud Ambiental*. 97 (Supl.1): 198.
- , Marin, D., Herrera, C., Vallejo, G., Naranjo, J. M., Guhl, F. 2005. Comprobación del ciclo silvestre de *Rhodnius prolixus* Stal en reductos de *Attalea butyracea*, en el departamento del Casanare. En *Memorias: XII congreso Colombiano de Parasitología y Medicina Tropical*. BIOMÉDICA. 25(Supl. 1): 159.
- Padilla J. C. 2005. Situación de la enfermedad de Chagas en Colombia. En Guhl F, *Memorias del primer taller internacional sobre control de la enfermedad de Chagas*. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. 2-6 de mayo de 2005. pp. 19-24.

Recibido: abril 23 de 2009.

Aceptado para su publicación: diciembre 18 de 2009.



# ENERGÍA, ENTROPÍA Y RELIGIÓN. UN REPASO HISTÓRICO

Por

Stefan Pohl-Valero<sup>1</sup>, Favio Cala Vitery<sup>2</sup>

## Resumen

**Pohl Valero, S & F. Cala Vitery:** Energía, entropía y religión. Un repaso histórico. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (130): 37-52, 2010. ISSN 0370-3908.

Este artículo elabora un repaso histórico de la emergencia de la termodinámica, de los abordajes historiográficos que ha recibido esta ciencia y de su relación con los debates cosmológicos y religiosos de finales del siglo XIX. El desarrollo conceptual que desembocará en la formulación de la conservación de la energía y en el concepto de entropía es abordado en la primera parte del presente trabajo. La segunda parte dibuja, brevemente, el panorama historiográfico de la termodinámica, llamando la atención sobre los variados significados históricos que tuvieron los conceptos de la energía y la entropía y sobre su influencia en el mundo social y cultural de la época. Un aspecto puntual de la interacción entre termodinámica y sociedad será analizado en la última parte del artículo, al explorar la forma como las leyes de la termodinámica estuvieron informadas por cuestiones teológicas y cómo a su vez estas leyes articularon discursos tanto materialistas y naturalistas como de apología cristiana.

**Palabras clave:** termodinámica, energía, entropía, historiografía, cosmología, ciencia y religión.

## Abstract

This article builds a historical review of the emergence of thermodynamics, its historiographical approaches, and its links with the late XIX century cosmological and religious debates. The conceptual developments that lead to the formulation of energy conservation and to the concept of entropy are discussed in the first part of the article. The second part depicts briefly the historiographical panorama of thermodynamics, focusing on the several historical meanings that were ascribed to the concepts of energy and entropy and their respective influence on the cultural and social milieu. A key aspect of the society-thermodynamics interaction is analyzed in the last part of the article: the way in which the laws of thermodynamics were influenced by theological views and how, concurrently, these laws enabled the construction of materialistic, naturalistic and Christian apologetic discourses.

**Key words:** thermodynamics, energy, entropy, historiography, cosmology, science and religion.

<sup>1</sup> Departamento de Historia, Universidad Javeriana. Correo electrónico: spohl@javeriana.edu.co

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Jorge Tadeo Lozano. Correo electrónico: favio.cala@utadeo.edu.co

### Desarrollo conceptual de la termodinámica: en la búsqueda de unidad

En la segunda mitad del siglo XIX la energía fue el concepto fundamental que articuló una concepción unificada de los fenómenos físicos. Para los científicos de finales del siglo XIX la energía significaba la base conceptual que cohesionaba todo el campo de la física, la más grande de todas las generalizaciones exactas. Representaba, en otras palabras, la meta de un largo camino en la búsqueda de una conceptualización unitaria de la naturaleza y sus fenómenos. Esta búsqueda de unidad y armonía se puede rastrear desde el inicio de la cultura occidental, estando presente desde el materialismo de **Epicuro** –que conocemos a través de **Lucrecio**– hasta la física contemporánea en lo que el físico **Steven Weinberg** ha llamado “el sueño de una teoría final” (**Serres**, 1994; **Weinberg**, 2003).

Sin ir tan lejos, una de sus expresiones filosóficas se encuentra en la *Naturphilosophie* alemana de finales del siglo XVIII. Esta filosofía romántica expresaba una firme creencia en la existencia de un principio simple y unificador de todos los fenómenos naturales. Baste recordar las palabras de uno de sus principales representantes, **Friedrich Schelling** (1775-1854), quien sostenía: “los fenómenos magnéticos, eléctricos, químicos y hasta orgánicos, deberían estar entrelazados formando una gran asociación... [la cual] abarca toda la naturaleza” (**Schelling**, 1790; citado en **Kuhn**, 1982: 121-122). Igualmente encontramos esta búsqueda de unidad y simplicidad en el supuesto de economía de la naturaleza característico de la filosofía de la Ilustración. El matemático y filósofo **Jean D’Alambert** (1717-1783) reflejaba a la perfección esta mentalidad económica con su obsesión por un ideal de ciencia universal y deductiva, en el que cada conocimiento particular estaba subordinado de forma lógica al menor número de principios posibles y a los más generales. La Ilustración aportaba pues, una visión de la naturaleza como un ente económico en el que se producían el mayor número de efectos con el menor número de causas (**Hankins**, 1988).

Otra *Weltanschauung* que aportaba un soporte filosófico a la concepción de un mundo físico, si no unificado, al menos compuesto por fenómenos correlacionados, era la *Escuela Escocesa del Sentido Común* del siglo XVIII. En ella, y en especial a través de **Thomas Brown** (1778-1820), se describía al mundo como un conjunto de fenómenos cuyas causas era imposible hacer inteligibles. Según **Brown**, las causas y los efectos en el mundo natural no eran más que sucesiones invariables que la experiencia no podía distinguir; no obstante, a partir del sentido común, era posible derivar de la experiencia nociones coherentes de las causas de los fenómenos. Y la manera de lograr esto

era considerar a las causas como principios de asociación de ideas en la mente. Desde esta perspectiva, el estudio de la naturaleza era válido, no como la búsqueda de las últimas causas, sino como la búsqueda de sus correlaciones. Esta posición permitía considerar a los fenómenos de la naturaleza, no de manera aislada sino correlacionados mediante las fuerzas físicas, con lo que, invariablemente, unos fenómenos se convertían en otros (**Morus**, 1991: 601-604).

Aunque no necesariamente relacionadas directamente con la *Naturphilosophie* u otros supuestos filosóficos, a finales del siglo XVIII estas ideas eran un lugar común para los filósofos naturales. La idea en sí era simple y llamativa, el problema era aplicarla a los muy diversos fenómenos que ocurrían en la naturaleza: ¿Cómo lograr dar una explicación coherente y unificada del disímil comportamiento de los diferentes fenómenos naturales?

Uno de los patrones con que algunos de los científicos de la época se proponían abordar los fenómenos terrestres era la teoría de la gravitación desarrollada por **Isaac Newton** (1642-1727) en el siglo XVII. Su teoría había demostrado que a partir de un tratamiento matemático era posible predecir fenómenos que se correspondían con la observación: utilizando la mecánica basada en las leyes del movimiento (inercia, momentum y acción-reacción) y aplicando la teoría newtoniana de la gravitación –que postula que los cuerpos celestes (como la Tierra o el Sol) se atraen entre ellos con una fuerza proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros–, se podía predecir, por ejemplo, que la Tierra giraba alrededor del Sol siguiendo una trayectoria elíptica, resultado que se corroboraba con datos astronómicos.

En los *Principia (Philosophiae naturalis principia mathematica*, 1687), **Newton** había desarrollado una ciencia matemática aplicada a la mecánica. Mediante ecuaciones que expresaban relaciones geométricas, **Newton** logró resolver problemas físicos de la mecánica, como el estudio de las fuerzas y los cambios de movimiento. Este tipo de abordaje matemático, o “mecánica racional” aplicada al estudio del movimiento de los planetas se llamó entonces mecánica celeste. En su famoso libro, **Newton** destacaba la esperanza de que todos los fenómenos pudiesen ser tratados de manera análoga y daba como ejemplo un tratamiento matemático al fenómeno de la refracción óptica (**Harman**, 1990: 27-28).

A lo largo del siglo XVIII, la matematización de los fenómenos físicos obtuvo grandes éxitos especialmente en el campo de la mecánica y, en gran parte debido a la *Optiks* (1704) de **Newton**, la idea de una física especulativa y

basada en modelos atómicos se convirtió en el modelo a seguir. De este modo, la “mecánica racional” al ser aplicada a los fenómenos físicos admitió el uso de entes explicativos hipotéticos tales como las fuerzas intercorpúsculares de corto alcance para poder dar explicación matemática de su comportamiento. Aunque en el siglo XVIII el estudio del calor, la electricidad y el magnetismo fue en gran medida cualitativo, siempre estuvo presente el “newtonian dream” de abordar estos fenómenos de una forma cuantitativa y matemática. Uno de los grandes objetivos de la física de esa época consistió entonces en tratar de explicar los fenómenos terrestres de la misma forma como lo había realizado la mecánica celeste del siglo XVII con respecto a los fenómenos planetarios (Cala, 2006).

Al finalizar el siglo XVIII, este tipo de aproximación a la física terrestre fue abordado de forma sistemática por científicos franceses tales como **Pierre Simon de Laplace** (1749-1827), **Siméon Denis Poisson** (1811-1842) o **Jean-Baptiste Biot** (1774-1862). La denominada por el historiador **Robert Fox**, “Física Laplaciana”, era una física que buscaba dar cuenta de todos los fenómenos en la escala terrestre y particularmente en la escala molecular, en términos de fuerzas centrales entre partículas ya fueran atractivas o repulsivas. Estas fuerzas eran tratadas de forma análoga a las fuerzas Newtonianas de gravitación (Fox, 1990: 279). **Laplace** tenía como objetivo construir una física unificada, es decir, lograr reducir los fenómenos físicos a un único sistema explicativo, en su caso, al de partículas ejerciendo fuerzas repulsivas y atractivas entre ellas a una muy corta distancia. Bajo este modelo, la hipótesis de que el calor, la luz, la electricidad y el magnetismo fueran considerados como entes materiales, pero cada uno con características particulares, resultó ser muy conveniente.

Bajo esta aproximación los denominados fluidos imponderables tomaron una nueva dimensión, en el sentido que pasaron de ser una teoría vaga y cualitativa a una cuantitativa y matematizable. El modelo estándar de finales del siglo XVIII, como lo ha denominado **John Heilbron**, contaba con seis fluidos ajenos a la acción de la gravedad, además de la materia ordinaria. La interacción de la materia y estos fluidos daba cuenta de los fenómenos del mundo físico. Así, de acuerdo con la física Laplaciana, la materia ordinaria ejercía sobre sí misma las fuerzas de gravedad,

cohesión, afinidad química y capilaridad, mientras que, entre los imponderables, las partículas de la luz interactuaban con la materia ordinaria; el fluido eléctrico (podían ser dos) y el magnético interactuaban entre sí y con la materia; y el fluido del calor o calórico, cuyas partículas se repelían entre sí, daba cuenta de la existencia de diversas fuerzas de cohesión, sin cuya intervención toda la materia terrestre ponderable se colapsaría en una gran masa (Heilbron, 1993: 5-7).

La física Laplaciana logró aplicar su teoría a los fenómenos de la luz y el calor tratándolos como el resultado de las fuerzas que se ejercían entre las partículas de la materia ordinaria y las de estos fluidos imponderables a distancias muy pequeñas, siendo por lo tanto posible representarlos mediante sistemas de ecuaciones diferenciales<sup>3</sup>. En general, el modelo estándar fue interpretado como un modelo que no representaba necesariamente la realidad pero que aportaba una excelente herramienta para poder cuantificar y matematizar los fenómenos terrestres. Muchos de sus seguidores, aunque reconocieron su posible no realidad, destacaron sus ventajas pedagógicas y su capacidad de representar los resultados de la experiencia. Por ejemplo, **Lavoisier & Laplace**, que perfeccionaron la teoría del calórico, reconocieron que la teoría rival –según la cual el calor es una forma de movimiento– podía explicar igualmente todos sus resultados (Heilbron, 1993: 16-23).

En los años veinte del siglo XIX, el programa de **Laplace** empezó a ser abandonado y otras teorías e hipótesis sobre la naturaleza de los fenómenos terrestres comenzaron a tomar fuerza. No obstante, la búsqueda de una explicación unificada de los fenómenos naturales se mantuvo intacta. Un claro ejemplo de esto fueron los trabajos del científico francés **Augustin-Jean Fresnel** (1788-1827) que, rechazando la idea corpuscular de la naturaleza de la luz, propuso que este agente podía ser considerado como un tipo de vibración en un fluido etéreo. La teoría expuesta por **Fresnel** era opuesta a la de **Laplace**, pero sus expectativas similares. **Fresnel** vislumbraba un mundo físico unificado en el que el calor, la luz y otros agentes imponderables serían sólo diferentes tipos de movimiento en un fluido universal<sup>4</sup>. Al inicio de sus investigaciones, en 1814, le escribió una carta a su hermano donde sugería una alternativa a la materialidad de la luz y el calor que podía tener

3 En el caso del calor, uno de los seguidores del programa de **Laplace**, **Siméon Denis Poisson** dio un tratamiento matemático a la conducción de este agente a través de cuerpos sólidos a partir de fuerzas repulsivas y atractivas que se ejercían entre las moléculas de la materia del cuerpo y las del fluido calórico. De esta forma logró obtener una ecuación general del movimiento del calor. Para un estudio general de la influencia y contexto de la física Laplaciana, véase **Fox**, 1990.

4 **Silliman** ha argumentado que la idea de unidad en la física por parte de **Fresnel** se basaba en su creencia en la economía de la naturaleza: esta produce el máximo número de efectos con el mínimo número de causas. (**Silliman**, 1974).

la gran ventaja de abarcar varios fenómenos a la vez, es decir, de unificarlos (citado en **Silliman**, 1974: 146):

Te cuento que estoy muy tentado a creer en las vibraciones de un fluido especial para la transmisión de la luz y el calor. Uno podría explicar la uniformidad de la velocidad de la luz como uno explica la del sonido; y tal vez uno podría ver en las perturbaciones del equilibrio de este fluido la causa de los fenómenos eléctricos. Uno podría fácilmente concebir por qué un cuerpo pierde tanto calor sin perder peso, por qué el sol nos ha iluminado por tanto tiempo sin haber disminuido su volumen<sup>5</sup>.

La idea de unidad en la naturaleza siguió articulándose a lo largo de la primera mitad del siglo XIX, mediante diversos experimentos que permitieron encontrar nuevas relaciones entre fenómenos en apariencia diferentes. En este proceso de articulación, el éter jugó un papel esencial, ya que permitió incorporar la luz y el calor radiante en el marco explicativo de la mecánica y permitió que estos fenómenos estuvieran sujetos a la conservación de la fuerza viva<sup>6</sup>. La fuerza viva y su conservación había sido postulada por **Gottfried Leibniz** (1664-1716) como la masa por el cuadrado de la velocidad ( $mv^2$ ); a diferencia de **René Descartes** (1596-1650), **Leibniz** sostenía que esta era la cantidad que se conservaba en la naturaleza y no la masa por la velocidad ( $mv$ ). Una vez desarrollado el concepto de trabajo, a lo largo del siglo XVIII, éste se relacionó con la fuerza viva. El concepto de trabajo se gestó paralelamente desde la reflexión teórica y la práctica en la ingeniería, permaneciendo separadas estas dos aproximaciones por muchas décadas. A principios del siglo XIX fue comúnmente aceptado que el trabajo mecánico (llamado también por los ingenieros capacidad, o efecto mecánico) se definiera como la integral de la fuerza con respecto a la distancia en que se ejercía esa fuerza. Así, el ‘trabajo’ fue la medida básica para comparar la capacidad de las máquinas (**Cardwell**, 1967). Desde el campo teórico de la mecánica, por su parte, el concepto de fuerza viva fue redefinido como la mitad del postulado por Leibniz ( $1/2mv^2$ ) para poder utilizar el concepto de trabajo como la unidad de medida de la fuerza viva (**Hermann**, 1990: 53-59):

$$T = \int F \cdot dx = \int v \cdot dv = 1/2mv^2 \text{ [N}\cdot\text{m]}$$

5 La traducción es nuestra.

6 Sobre el papel unificador del éter en el siglo XIX véase **Siegel**, 1981; **Wise**, 1981.

7 Al respecto, véase respectivamente **Cardwell**, 1989; **Morus**, 1991; **Caneva**, 1993.

8 **Mayer** no pretendió reducir el calor a movimiento. Para él, el calor y el trabajo mecánico estaban causalmente conectados por medio de una medida cuantitativa de su equivalencia. Pero a pesar de que los dos eran interpretados como fuerzas, Mayer no los asumía como idénticos en esencia. Sobre la concepción de Mayer sobre fuerza y calor, véase **Harman**, 1976; **Caneva**, 1993.

Que la luz y el calor radiante fueran vistos como un tipo de movimiento transmitido a través del éter, unificaba estos dos fenómenos, lo cual coincidía con los experimentos realizados por el científico italiano **Macedonio Melloni** (1798-1854) que demostraban que tanto la luz como el calor radiante se reflejaban, se refractaban y se polarizaban, es decir, tenían comportamientos análogos. Por el otro lado, y reforzado por lo anterior, el concebir el calor en los cuerpos como un movimiento de sus partículas permitía hacer inteligible el supuesto de conservación de la fuerza viva en la conversión de trabajo en calor. La idea de que el calor y el trabajo eran interconvertibles fue expuesta y demostrada experimentalmente en la década de 1840 por diversos científicos, entre ellos **James Prescott Joule** (1818-1889), **William Robert Grove** (1811-1896) y **Julius Robert Mayer** (1814-1878), aunque bajo supuestos diferentes<sup>7</sup>. A partir de esta correlación entre trabajo y calor, si este último era visto como un tipo de movimiento, cuando el trabajo mecánico desaparecía y aparecía calor, se podía interpretar que la fuerza viva externa (trabajo) se transformaba en fuerza viva interna del cuerpo (calor) conservándose su cantidad. Aunque algunos de los científicos que calcularon el equivalente mecánico del calor en los años cuarenta del siglo XIX —y que postularon de una u otra forma un concepto de conversión y conservación— no aceptaban la teoría mecánica del calor (por ejemplo **Mayer**)<sup>8</sup>, la teoría del calor como un modo de movimiento fue la concepción que aportó un fundamento explicativo en términos mecánicos de la conversión y conservación de las capacidades naturales. El fundamento mecánico de la luz, el calor y la conservación se articulaba a través del éter, y satisfacía así la visión de una ciencia física unificada.

A finales de la década de 1840, el físico y fisiólogo alemán **Hermann von Helmholtz** (1821-1894) aportó una formulación matemática del principio de conservación. En su *Über die Erhaltung der Kraft* (1847), **Helmholtz** analizaba las fuerzas en sistemas mecánicos y demostraba que en un sistema cerrado las fuerzas se transformaban unas en otras y no se aniquilaban. Su formulación del principio de conservación de la fuerza se basaba en la imposibilidad del movimiento perpetuo y en el modelo newtoniano de fuerzas centrales (**Bevilacqua**, 1993: 2-3). Aunque su texto no tuvo inicialmente gran acogida entre la comunidad científica, posteriormente sería presentado como la primera formulación general de la conservación de la energía.



Durante las décadas de 1850 y 1860 y especialmente debido a un grupo de científicos e ingenieros escoceses, [**William Thomson** (1824-1907), **Peter Guthrie Tait** (1831-1901), **Macquorn Rankine** (1820-1872), **James Clerk Maxwell** (1831-1879) y **Fleeming Jenkin** (1833-1885)], el concepto fundamental al que se le debía aplicar la idea de conversión y conservación fue ampliamente aceptado bajo el término de *energía* (Smith, 1998: 1). De esta forma el calor, el trabajo, la electricidad, el magnetismo y la luz se volvían simplemente manifestaciones diferentes de un mismo concepto, el de energía. En el universo la energía permanece constante y lo que se transforma son sus manifestaciones. Así, el enunciado de la conservación de la energía cumplió una función unificadora en los fenómenos físicos de manera fundamental: la idea de unidad tomó consistencia científica bajo los conceptos de convertibilidad y conservación; siendo el concepto de energía el sustrato de donde surgía la unidad. A partir de la consolidación de la *ciencia de la energía*—que como ha mostrado el historiador **Crosbie Smith**, fue un producto del mencionado grupo de científicos escoceses— se introdujo un profundo cambio conceptual que produjo una concepción física totalmente nueva (Smith, 1998: 2):

Aunque fundamentalmente mecánico en su naturaleza, el universo dejó de ser entendido tanto en términos de fuerzas ejerciendo su acción a distancia, como en términos de partículas discretas moviéndose a través de un espacio vacío, el universo se consideró entonces como un continuo de materia poseída de energía cinética<sup>9</sup>.

La teoría mecánica del calor fue presentada por este grupo de científicos británicos como el fundamento esencial para la emergencia de la nueva ciencia de la energía. Como diría **Thomson** ante la *British Association for the Advancement of Science* (BAAS) en 1854, el descubrimiento de **Joule** de la conversión del calor en trabajo y el cálculo de su equivalente habían “conducido a la mayor reforma que la ciencia física había sufrido desde los días de **Newton**” (Citado en Harman, 1990: 77). En 1859 **Rankine** consolidó la palabra termodinámica, así como la terminología de la *primera y segunda ley de la termodinámica*. Esto lo hizo en su libro *Manual of the Steam Engine and Other Prime Movers* (1859), que posteriormente **Maxwell** calificó como el primer tratado escrito sobre la materia (Smith, 1998, cap. 8).

No obstante, en la década de 1840 **Thomson** había tenido muchos problemas en aceptar los experimentos de Joule sobre el equivalente mecánico del calor, ya que tenía la convicción de que éste se conservaba en la generación de trabajo mecánico en las máquinas térmicas. En ese momento **Thomson** estaba familiarizado con un importante texto para la historia de la termodinámica, pero que en ese momento era muy poco conocido, y que postulaba precisamente que el calor era un fluido que se conservaba en el ciclo de operación de una máquina de vapor (Smith y Wise, 1989: 294-296).

En efecto, el ingeniero francés **Sadi Carnot** (1796-1832) había publicado en 1824 un texto en el que analizaba el funcionamiento de las máquinas térmicas y buscaba de forma teórica la manera de optimizar su eficiencia. En su *Réflexions sur la puissance motrice du feu* se postulaban los rudimentos de lo que posteriormente se llamaría la segunda ley de la termodinámica. **Carnot** argumentaba que sólo se podía generar trabajo en una máquina térmica en la medida que existiera un flujo de calor que pasara de una temperatura elevada a una inferior. Sin esta diferencia de temperaturas ningún dispositivo térmico podría funcionar, es decir, producir trabajo; esta era la característica esencial que debía tener una máquina térmica. El fluido con que funcionaba la máquina (vapor, aire, etc.) era para **Carnot** solamente el vehículo a través del cual el calor se transportaba de la caldera al condensador. Dada una misma cantidad de calor, entre mayor diferencia de temperaturas hubiera, se produciría una mayor cantidad de trabajo. Para que las máquinas no fueran ilimitadamente eficientes, **Carnot** situaba como límite el que fijaba una máquina perfectamente reversible en la que la capacidad motriz producida por una cantidad de calor cayendo de una temperatura a otra, era exactamente la misma que se necesitaba para elevar la misma cantidad de calor a su temperatura inicial. Una mayor producción de trabajo significaría sacarlo de la nada, lo cual implicaría la posibilidad de construir una máquina perpetua—posibilidad que ya había sido ampliamente rechazada para esa época<sup>10</sup>.

En términos generales, la teoría de **Carnot** admitía que el calor era un fluido imponderable (calórico) que se conservaba en la producción de trabajo mecánico y postulaba que este trabajo sólo se producía si existía una diferencia de temperaturas<sup>11</sup>. Aunque posteriormente el texto de **Carnot** fue considerado de gran importancia, en su momento no

9 La traducción es nuestra.

10 Ya en 1775 la Real Academia de Ciencias en París había decidido rechazar todo trabajo que postulara la posibilidad de construir una máquina de movimiento perpetuo. Al respecto, véase **Ord-Hume**, 1980.

11 **Robert Fox**, estudiando los apuntes de **Carnot**, ha encontrado que antes de su muerte, este ingeniero estaba modificando su teoría, cuestionando la idea de que el calórico se conservaba. Bajo esta nueva perspectiva, **Carnot** empezó a pensar en que el calor se transformaba en trabajo y viceversa (**Fox**, 1986).

logró un gran impacto entre sus contemporáneos. Unos años después, en 1834, las ideas de Carnot fueron reelaboradas y expresadas en lenguaje matemático por **Émile Clapeyron** (1799-1864), pero su trabajo tuvo igualmente poca acogida (**Papanelopoulou**, 2004: 2).

La conservación del calor en los procesos descritos por **Carnot** era el gran problema con el que **Thomson** se debía enfrentar al considerar los experimentos de Joule que parecían demostrar que el calor no se *conservaba* sino que se *transformaba*. Cuando el calor produce trabajo, ¿se comporta como agua en un molino, o como carbón que se consume? **Thomson** se enfrentaba al problema de unificar estos dos conceptos de tal forma que produjeran una imagen de la naturaleza consistente. La solución la aportó **Rudolf Clausius** (1822-1888) en su memoria *Über die bewegende Kraft der Wärme* (1850), al hacer notar que lo esencial en el principio de **Carnot** era la necesidad que tenía el calor de pasar de una temperatura mayor a una menor en la producción de trabajo en un proceso cíclico, y no que éste se conservara. La observación de **Clausius** permitió enunciar los dos principios que posteriormente **Rankine** llamaría las dos leyes de la termodinámica: 1) El calor se transforma en trabajo, es decir, las pérdidas aparentes de energía mecánica en los procesos mecánicos eran en realidad una transformación de parte de esta energía mecánica en energía calorífica. 2) En la generación de trabajo, en un proceso cíclico, una parte del calor que cae de una temperatura mayor a una inferior se convierte en trabajo y el resto desciende a la temperatura menor. Es decir, existe una tendencia a que el calor pase de un cuerpo más caliente a uno más frío. La segunda ley de la termodinámica establecía entonces que en los procesos en los que la energía se transformaba, parte de ésta tendía a dispersarse en forma de calor. La cantidad de energía disponible para realizar trabajo disminuía inexorablemente en los sistemas cerrados. Esta tendencia direccional y de incremento de desorden en un sistema termodinámico fue acuñada por **Clausius** como *entropía*<sup>12</sup>. En síntesis, **Clausius** postuló las dos leyes de la termodinámica de la siguiente forma: “La energía del universo es constante. La entropía del universo tiende a un máximo” (**Clausius**, 1865: 400).

Una conceptualización mecánica del calor y, de forma general, de la energía, con el trabajo como su medida esencial, dominó la física en la segunda mitad del siglo XIX, aunque el significado de energía no asumió un significado inequívoco. Esto se vio reflejado en las numerosas historias de la conservación de la energía que se escribieron an-

tes de que se cerrara el siglo, dando lugar a múltiples controversias sobre la prioridad y sobre el significado científico y filosófico de las diferentes formulaciones de la conservación de la energía (**Bevilacqua**, 1993: 291). Por ejemplo, hacia el final del siglo emergió una perspectiva diferente que hacía énfasis en la independencia de la energía con respecto a la mecánica. Esta corriente, esencialmente alemana, trató de desplazar el fundamento mecánico en el que se basaba la física. **Ernst Mach** (1838-1916) propuso por ejemplo que se tomara el principio de la conservación de la energía como una formulación que describía un amplio rango de hechos de forma concisa, directa y económica, pero que no requería en absoluto de hipótesis mecánicas. **Mach** concebía la ciencia de la energía como un sistema de relaciones que permitían relacionar y describir un amplio rango de hechos físicos sin tener que recurrir a hipótesis especulativas acerca de su funcionamiento (**Mach**, 1872; **Mach**, 1986 [1896]). Por otro lado, los químicos alemanes **Georg Helm** (1851-1923) y **Wilhelm Ostwald** (1853-1922), propusieron derivar las ecuaciones de movimiento a partir de la conservación de la energía otorgándole a este concepto la base fundacional de la mecánica. Estos “energeticistas” rechazaban la teoría atomista así como otras teorías de la materia a favor de un universo de energía (**Smith**, 2003: 309). **Ostwald**, a partir de su energética, intentó desarrollar una filosofía de la naturaleza y de la cultura. Su sistema metafísico, o como él la llamó energética social, era una generalización de las leyes de la energía que pretendían aportar las bases de una teoría y práctica moral, de la acción política y de la felicidad (**Hakfoort**, 1992).

A principios del siglo XX, independientemente de las diversas conceptualizaciones de la energía, este término significó para sus historiadores el gran descubrimiento del siglo XIX y el verdadero elemento unificador de la física. Uno de ellos, **Theodore Merz**, afirmaba en su monumental *A History of European Thought in the Nineteenth Century* que (**Merz**, 1903, vol. 2: 96):

Un término más general debía ser encontrado bajo el cual los diferentes términos podían ser comprendidos, lo que daría una aún mayor generalización, una más completa unificación del conocimiento. Uno de los principales resultados de la segunda mitad del siglo XIX ha sido encontrar ese término más general... el más grande de todas las generalizaciones exactas — la concepción de energía<sup>13</sup>.

12 En términos matemáticos, la entropía fue caracterizada como el cociente entre el calor producido en el proceso y la temperatura absoluta en que ocurría la transformación.

13 La traducción es nuestra.

### La historiografía de la termodinámica

Las palabras de **Merz** reflejan la idea de que en algún momento del siglo XIX se descubrió un concepto con el que se pudo concretar la búsqueda de unidad en la física. El concepto de la energía se interpretó como el máximo progreso alcanzado por la física decimonónica. La reconstrucción histórica de este suceso ha resultado ser muy controvertida desde su mismo inicio y las aproximaciones historiográficas han variado enormemente. Las historias de la termodinámica, prestándole atención ya fuera al contenido o al contexto de la formulación de sus leyes, se han centrado por lo general en la emergencia de la nueva ciencia, pero no en sus implicaciones sociales y culturales.

Una de las primeras narrativas históricas que aportó una visión “externalista” a la emergencia de la termodinámica fue el artículo de **Thomas Kuhn**, “Energy Conservation as an Example of Simultaneous Discovery” (**Kuhn**, 1982)<sup>14</sup>. A pesar del debate que generó la selección realizada por Kuhn de “doce descubridores” del principio de la conservación de la energía, su artículo de 1959 aportó un acercamiento que no se centraba en defender la prioridad del “descubrimiento” entre unos determinados actores, sino que trató de situar este proceso en un contexto determinado. Para **Kuhn**, el hecho de que en un periodo corto de tiempo un número considerable de hombres de ciencia en Europa se hubieran acercado de forma esencial al concepto de energía y al de su conservación, tenía que ser entendido como un proceso en el que la clave debía estar en el contexto social e intelectual en el que surgía este concepto. Según **Kuhn**, la lista de descubridores la conformaron doce personas. Cuatro de ellas, **James Joule**, **Hermann von Helmholtz**, **Robert Julius Mayer** y **L. A. Colding** (1815-1888) combinaron la generalidad en la formulación del concepto con aplicaciones concretas y cuantitativas. Esto ocurrió entre 1842 y 1847. Otros cuatro, **Sadi Carnot**, antes de 1832, **Marc Seguin** (1786-1875) en 1839, **Karl Holtzmann** en 1845 y **Gustav Adolf Hirn** (1815-1890) en 1854, calcularon un valor para el coeficiente de conversión entre calor y trabajo. Aunque estos últimos cuatro científicos no formularon el concepto de energía de forma general, tenían la firme convicción de que el trabajo y el calor eran cuantitativamente intercambiables. El tercer grupo, entre 1837 y 1844, y conformado por **William Robert Grove** (1811-1896), **Karl Friedrich Mohr** (1806-1879), **Michael Faraday** (1791-1867) y **Justus von Liebig** (1803-

1873), no aportaron una demostración cuantitativa pero todos “describieron el mundo de fenómenos como manifestación de una sola ‘fuerza’, que aparecía en formas eléctricas, térmicas, dinámicas y muchas otras, pero que en todas sus transformaciones nunca podía ser creada ni destruida” (**Kuhn**, 1982: 92-93).

**Kuhn** afirmaba en su artículo que existieron unos elementos esenciales en el clima científico europeo de ese periodo (entre 1830 y 1850) que permitieron una nueva visión de la naturaleza con la que se pudo enunciar el principio de conservación de la energía. En este sentido, **Kuhn** hablaba de tres “factores detonantes” que indujeron a que esos elementos se volvieran accesibles: disponibilidad de procesos de conversión, interés por las máquinas térmicas y la filosofía de la naturaleza o *Naturphilosophie*. El primero hacía referencia a los diversos experimentos realizados después de 1800 en los que se mostraba una posible conversión de un fenómeno físico en otro, por ejemplo se descubrió que a partir de una reacción química (pila de Volta) se podía obtener corriente eléctrica, o que ésta producía calor o luz, o que la corriente eléctrica producía efectos magnéticos. El segundo factor resaltaba el creciente interés por las máquinas hidráulicas y térmicas que se generó en el siglo XVIII y que prosiguió en el XIX en el contexto de la revolución industrial. Dentro de este contexto se desarrolló el concepto de “trabajo” que servía para medir el rendimiento de las máquinas. De acuerdo a **Kuhn**, este concepto fue fundamental para la determinación de la conservación de la energía. El movimiento filosófico alemán de finales del siglo XVIII, denominado *Naturphilosophie*, fue el último factor identificado por **Kuhn**. Este movimiento percibía a la naturaleza como un organismo y buscaba un principio unificador que diera cuenta de todos los fenómenos naturales. En este sentido, afirmaba **Kuhn**, la *Naturphilosophie* fue un “adecuado antecedente filosófico para el descubrimiento de la conservación de la energía” (**Kuhn**, 1982: 123).

El artículo de **Kuhn** fue el punto de partida para numerosas investigaciones dedicadas a esclarecer el papel de los factores y protagonistas aludidos en su artículo en el establecimiento y conceptualización de la ley de la conservación de la energía<sup>15</sup>. Uno de los aspectos que se reveló en esta serie de investigaciones fue la muy divergente naturaleza de la conceptualización de ese algo llamado energía que habían realizado varios de los personajes de la

14 El artículo fue publicado originalmente en 1959.

15 Al respecto véase entre otros: (**Bevilacqua**, 1993; **Brush**, 1970; **Caneva**, 1993 y 1997; **Cardwell**, 1967 y 1971; **Harman**, 1974 y 1976; **Silliman**, 1974; **Wise**, 1979).

lista de **Kuhn**. Así, se desarrollaron teorías que tomaron forma desde perspectivas culturales muy diferentes, y que comprendían desde la tradición en ingeniería de Manchester hasta la metafísica alemana (**Smith**, 1990: 336). En otras palabras, el concepto de energía y la redefinición que acarreo en el campo de la física, demostró no ser un proceso universal que se expandió sin dificultades desde un centro generador.

En la década de 1960 otras aproximaciones históricas hacia la termodinámica empezaron a emerger. Uno de sus historiadores, **Erwin Hiebert**, publicó en 1966 un artículo en el que se proponía un enfoque alternativo al estudio histórico de la termodinámica. En su “Uses and Abuses of Thermodynamics in Religion,” **Hiebert** se preguntaba por los usos que se le habían dado a conceptos físicos del siglo XIX para responder cuestiones religiosas, y en particular rastreaba la influencia que había ejercido la termodinámica en el pensamiento religioso (**Hiebert**, 1966).

Una década después, en 1978, el historiador de la física **Stephen Brush** publicó un libro titulado *The temperature of History. Phases of Science and Culture in the Nineteenth Century* en el que trataba de establecer conexiones generales entre la física y la cultura (**Brush**, 1978). **Brush** argumentaba que los conceptos fundamentales de la teoría del calor fueron *leitmotiv* de los movimientos culturales del siglo XIX –romanticismo, realismo y neo-romanticismo– y que los puntos de vista filosóficos de estos movimientos se vieron reflejados en la actitud de los científicos con respecto a la naturaleza del calor y a las leyes de la termodinámica. Aunque el libro fue criticado por una excesiva simplificación y periodización de la cultura general de la época y por catalogar de forma ingenua a determinados científicos dentro de esta clasificación cultural (**Porter**, 1981), aportaba, no obstante, algunas ideas sugerentes. Al argumentar que la física pasó por periodos de romanticismo y realismo, **Brush** resaltaba que esto fue posible porque en el siglo XIX la física se encontraba en un proceso incipiente de especialización y profesionalización, con lo que más que científicos, existían filósofos naturales interesados por muy diversas áreas del saber. Igualmente **Brush** resaltaba que la física de la época no era tan esotérica y que sus conceptos tenían un alto grado de visibilidad a través de publicaciones culturales periódicas, charlas y conferencias públicas y libros populares. Esto permitía que mucha gente opinara sobre la física y que ella se convirtiera en una poderosa fuerza cultural, generadora de

ideas y críticas sociales que un lector culto podía asimilar y discutir (**Brush**, 1978, cap. 2).

El trabajo de **Crosbie Smith** *The Science of Energy. A cultural History of Energy Physics in Victorian Britain* es uno de los trabajos más extensos que exploran los aspectos socio-culturales que influyeron en la emergencia de la termodinámica. En este importante estudio de 1998, **Smith** exploraba las características económicas y culturales relacionadas con un grupo de científicos del norte de Gran Bretaña (**Thomson, Maxwell, Rankine, Tait**, etc.) que construyeron la ciencia de la energía. En particular **Smith** aludía a aspectos como una profunda cultura industrial, valores religiosos, posiciones ideológicas y la elaboración y existencia de redes sociales e institucionales en el proceso de construcción de la nueva ciencia. Una de las conclusiones del trabajo de **Smith** resaltaba que la doctrina de la energía tuvo un significado determinado que se originó en la cultura industrial británica. La forma como sus protagonistas interpretaron y expusieron las dos leyes de la termodinámica se vieron moldeadas además por sus valores presbiterianos. La conservación y la disipación de la energía fueron presentadas como fieles representantes de una visión de la naturaleza acorde con las doctrinas cristianas que ellos tenían. Por un lado, que el hombre pudiera utilizar la energía del universo en su propio provecho aseguraba su libre albedrío, pero, por el otro, que parte de esta energía se disipara sin que se pudiera volver a aprovechar, estaba de acuerdo con la visión calvinista de la criatura caída, con la de un hombre imperfecto. El hecho que la energía no pudiera ser ni creada ni destruida y que, para el hombre, ésta se fuera disipando, caracterizaba la creación del universo por un Dios supremo y el carácter transitorio de la parte material de éste (**Smith**, 1998, cap. 6).

Toda esta serie de estudios –que por lo general se han centrado en el contexto británico<sup>16</sup>– nos demuestra que términos tales como la energía o la entropía no son conceptos monolíticos y universales sino que sus significados sufrieron múltiples transformaciones y fueron utilizados para diversos fines. Para el círculo de **Thomson** y **Maxwell**, por ejemplo, las leyes de la energía sirvieron para respaldar una visión cristiana del cosmos; la ciencia de la energía se convirtió en una confirmación física de verdades morales. Pero a la vez, en las manos de pensadores sociales como **Balfour Stewart** (1828-1887) o **Thomas Henry Huxley** (1825-1895), la idea de la disipación de la energía sirvió para caracterizar –y criticar– una sociedad

16 Importantes excepciones son **Papanelopoulou**, 2004; **Pohl-Valero**, 2007, que trabajan, respectivamente, el contexto francés y español.



comunista destinada a la muerte térmica, y el concepto general de energía para defender una sociedad capitalista (Myers, 1989). No obstante, el uso de los conceptos termodinámicos a la hora de pensar cuestiones religiosas o sociales no respondía a una única posición política. Al igual que como ocurrió con el darwinismo, tanto pensadores de derechas como de izquierdas se apropiaron de las leyes de la termodinámica para legitimar de forma científica sus posturas religiosas e ideológicas<sup>17</sup>. El hecho es que estas leyes, sus cambiantes significados físicos, teológicos y sociales, tuvieron una amplia circulación en la esfera pública europea, influyendo en diferentes ámbitos culturales y sociales.

### Cosmología, teología y termodinámica

Una vez formuladas las leyes de la termodinámica, éstas informaron un amplio debate cosmológico que tuvo como telón de fondo dos concepciones diferentes del universo: uno infinito, eterno y cíclico, y otro claramente delimitado, con un principio y un fin. En torno a este debate es importante señalar que la cosmología, esto es, el estudio del universo como conjunto, su origen y su futuro, ha tenido históricamente una íntima relación con las creencias religiosas, siendo de hecho durante mucho tiempo un campo de estudio de la teología. Como ha identificado Helge Kragh, algunas de las principales preguntas que la cosmología se ha hecho a lo largo de la historia han sido (Kragh, 2004: 3):

- ¿Ha existido siempre el mundo, o por el contrario tuvo un origen? ¿Y tendrá un final?
- ¿Es el mundo, en términos espaciales, finito o infinito?
- ¿Cuál es la relación entre el universo espacial y el material?
- ¿Es el mundo estático o está en estado de evolución?
- ¿De dónde vinieron originalmente la materia (y la energía)? ¿Todavía se les está creando?
- ¿Son las leyes de la naturaleza, como se conocen en su entorno natural, aplicables a todo el universo?

Las leyes de la termodinámica aportaron elementos fundamentales en la discusión de estas preguntas generando una significativa, y también controversial, interacción entre la ciencia y la religión. De este modo, la cosmología fue importante para la teología, pero a la vez,

la teología fue importante también en el debate científico de la cosmología. Como se mencionó anteriormente, la conservación de la energía y la entropía tuvieron múltiples interpretaciones cosmológicas y teológicas, reflejando el carácter complejo de la relación entre ciencia y religión.

Tradicionalmente la historia de la ciencia ha abordado la relación entre ciencia y religión desde una perspectiva que presupone una imagen estática, ya sea de conflicto y confrontación, de separación absoluta (diferentes esferas de prácticas no que no tienen nada que ver entre ellas), o de relación positiva. No obstante, la historiografía actual ha reevaluado este tipo de imágenes llamando la atención sobre la complejidad y el carácter histórico de la relación (Brooke, 1991; Brooke y Cantor, 1998; Ferngren 2002; Gregory 2003; Lindberg y Numbers, 2003). Un aspecto importante a tener en cuenta es que además de los diferentes tipos de relaciones, las interacciones no sólo se basan en cuestiones epistemológicas, en las que se confrontan, se evitan o se apoyan contenidos científicos y contenidos teológicos, sino que la interacción traspasa el ámbito cognitivo y se inserta en significados sociales y culturales más amplios. Las diversas reconstrucciones de la naturaleza que han elaborado los científicos a lo largo de la historia han estado no pocas veces informadas por consideraciones teológicas, culturales y sociales, además de físicas. Y estas reconstrucciones han tenido múltiples interpretaciones por parte de individuos y grupos sociales. Como argumenta Gary Ferngren, los esfuerzos por complejizar la interacción entre ciencia y religión se pueden resumir en el rechazo de la historiografía actual hacia aproximaciones presentistas y esencialistas. Entendiéndose *presentismo* como la tendencia de moldear el pasado empleando definiciones y creencias modernas, y *esencialismo* como la suposición de que las ideas o las disciplinas son básicamente las mismas en todas las épocas. Tanto ciencia como religión han tenido significados muy diferentes a lo largo de la historia. La filosofía natural del siglo XVII tiene una connotación muy diferente a la de física en el siglo XX. Igualmente las fronteras de los contenidos y discusiones *puramente* científicos han demostrado ser muy maleables, y en todo caso no pueden ser definidas por lo que un científico actual consideraría como lo adecuado (Ferngren, 2002: xi).

Y es justamente en torno al desarrollo histórico de la termodinámica que la relación entre ciencia y religión se nos presenta como un campo de análisis inmensamente

<sup>17</sup> Al respecto, véase por ejemplo Bayertz, 1983; Girón Sierra, 2005; Pohl-Valero, 2009.

rico y complejo. No es sólo que algunos “divulgadores” de la termodinámica decidieran recurrir a sus leyes –y por lo tanto a la autoridad de la ciencia– para respaldar discursos apologeticos o materialistas, sino que los mismos científicos (o filósofos naturales como se denominaban en esa época) que articularon sus leyes operaban en un contexto donde las cuestiones filosóficas, teológicas y físicas no eran del todo separables tanto en términos disciplinares como epistemológicos. La ciencia del siglo XIX era una actividad humana que apenas se estaba profesionalizando y especializando y el quehacer científico abarcaba de forma compleja inquietudes de muy variada índole. Ya hemos mencionado cómo el círculo de **Thomson** integró la ciencia de la energía –y especialmente la tendencia en la naturaleza a la disipación de la energía– a una lectura cristiana del cosmos. Sobre este punto volveremos más adelante. Por ahora nos detendremos en la primera ley de la termodinámica y la forma como articuló discursos materialistas y apologeticos.

Durante la segunda mitad del siglo XIX, desde diferentes ámbitos científicos e intelectuales europeos, se fueron creando los espacios necesarios que permitieron una nueva y reforzada concepción materialista de la naturaleza. Mediante esta concepción se argumentaba que una explicación basada en la interacción mecánica de la materia era la forma adecuada y suficiente para desvelar todos los secretos de la naturaleza, incluyendo aquellos relacionados con los procesos orgánicos y mentales (**Gregory**, 2003: 43). Este materialismo científico resaltaba la eternidad del universo y su absoluta determinación por leyes naturales, con lo que la presencia de un Dios creador y omnipresente se volvía del todo irrelevante. El principal argumento científico que sancionaba este determinismo físico, de acuerdo a los materialistas y naturalistas científicos, era la ley de la conservación de la energía. La interpretación determinista del universo que hiciera el físico británico **John Tyndall** (1820-1893), o la promoción de un materialismo científico que expusiera el médico alemán **Ludwig Büchner** (1824-1899) eran sólo algunos ejemplos del tipo de discursos que derivaban su autoridad de la ley científica de la conservación de la energía.

**Tyndall** fue uno de los principales divulgadores de la ley de la conservación de la energía a través de conferencias y libros muy populares como *Heat as a mode of motion*<sup>18</sup>. El punto culminante de la posición materialista de **Tyndall** se presentó en el discurso dirigido a la British

Association for the Advancement of Science (BAAS) en Belfast en 1874. En este discurso, **Tyndall** afirmaba que la ciencia tenía la capacidad de investigar todos los aspectos de la naturaleza a partir de sus leyes, ya que la naturaleza dependía absolutamente de estas leyes, siendo la primera y la base de todas las demás la conservación de la energía. Los fenómenos vitales y físicos estaban bajo el dominio de esa ley de conexión causal; las leyes de la naturaleza eran entonces causales a partir de la conservación de la energía. Esta posición le permitía a **Tyndall** interpretar la ley de la conservación de la energía como la ley natural que excluía de forma definitiva la posibilidad de una interpretación sobrenatural del universo: todo hacia delante y hacia atrás tenía una conexión causal y por lo tanto no había necesidad de una entidad sobrenatural en la explicación de la historia natural.

La posición de **Tyndall** se inscribía dentro de la corriente del naturalismo científico británico que abogaba por la búsqueda de causas exclusivamente observadas empíricamente en la naturaleza, las cuales se interpretaban a través de tres teorías principales: la teoría atómica de la materia, la conservación de la energía y la teoría de la evolución (**Turner**, 1981: 174). A partir de esta interpretación naturalista, el cosmos era concebido como un lugar material autorregulable, auto-sostenible y en eterna evolución, lo que contrastaba claramente con la perspectiva cristiana de un cosmos invariable y con principio y final.

El caso del médico alemán **Ludwig Büchner** es igualmente ilustrativo. **Büchner** formaba parte del llamado materialismo científico que se desarrolló en los países alemanes a mediados del siglo XIX y que a diferencia del naturalismo británico era mucho más amplio en su concepción filosófica materialista y en términos generales más especulativo en cuanto a la conducta y el pensamiento humano (**Gregory**, 1977). En uno de sus libros más famosos, *Kraft und Stoff*, Büchner proponía una visión del mundo que sólo se basaba en hechos empíricos y que rechazaba el recurrir a cualquier tipo de explicación metafísica<sup>19</sup>. En este sentido no había cabida para argumentos sobrenaturales o idealistas en la explicación de los eventos y procesos naturales incluyendo en esto al hombre. La base argumentativa de **Büchner** se desprendía de la aseveración de la inseparabilidad de la materia y la fuerza: “No hay fuerza sin materia; no hay materia sin fuerza”, de lo cual argumentaba que la fuerza no podía ser entendida como una entidad sobrenatural. Una fuerza creadora que formó

<sup>18</sup> Este libro se publicó originalmente en 1855. La primera traducción al español se realizó en 1885 (**Tyndall**, 1885).

<sup>19</sup> A finales del siglo XIX el libro de Büchner había visto innumerables ediciones y se había traducido a más de 17 idiomas.

el mundo a partir de la nada era entonces absurda ya que esa fuerza no tenía sentido sin la presencia de la materia. Así pues, todo evento en la naturaleza, tanto orgánico como inorgánico, seguía unas leyes mecánicas que se aplicaban a la materia, siendo ésta eterna. **Büchner** rechazaba por lo tanto la idea de una entidad individual creadora del universo y afirmaba la eternidad de la materia. Siguiendo ideas de otros materialistas científicos como el zoólogo **Karl Vogt** (1817-1895) o el fisiólogo **Jakob Moleschott** (1822-1893), **Büchner** incluía en su determinismo mecánico el pensamiento y la voluntad humana.

En sus especulaciones filosóficas, **Büchner** basaba la principal fuente de autoridad en el carácter empírico de las ciencias naturales y en este sentido la idea general de la conservación de la energía en el universo representó para él la confirmación irrefutable de la inmortalidad de la materia y la fuerza. Tal como lo destacaba en el prólogo de la octava edición de su libro, la teoría de la evolución de Darwin y la ley de la conservación de la energía eran las teorías científicas que respaldaban de forma contundente su forma de ver al mundo (**Büchner**, 1868: 251):

Al escribir diez años ha el libro FUERZA Y MATERIA, no podía prever que las continuas investigaciones de los naturalistas iban a dar las más brillantes pruebas de lo que yo vaticinaba, a despecho de todas las opiniones admitidas, y que particularmente mis ideas sobre la inmortalidad de la materia recibirían pronto su complemento necesario en el hecho de la conservación o inmortalidad de la fuerza, posteriormente descubierto. Tampoco adiviné que vendrían los más violentos ataques a destruir el dogma, considerado como infalible, de la no existencia de la generación primitiva y de la inmortalidad de las especies, y que la célebre teoría de Darwin reuniría al mundo entero de los organismos antiguos y modernos en una sola concepción grandiosa. Ignoraba asimismo el próximo e inesperado desarrollo de esas teorías y la de las celdillas, destinadas a dar la ley del reino animal lo mismo que la del reino vegetal.

Los discursos de personajes como **Tyndall** o **Büchner** han sido analizados en sus contextos locales y de acuerdo a intenciones específicas. Por ejemplo, la utilización que hizo **Tyndall** de la ley de la conservación de la energía para rechazar cualquier explicación sobrenatural del funcionamiento del universo, ha sido interpretada históricamente dentro de un proceso de profesionalización destinado a

legitimar la autonomía y secularización de los científicos victorianos (**Turner**, 1981; **Barton**, 1987). Igualmente, el discurso materialista de **Büchner** ha sido enmarcado dentro de una estrategia que buscaba proporcionar una forma efectiva de oposición a los poderes políticos reaccionarios. Poderes que habían derrotado las aspiraciones liberales y nacionalistas alemanas después del fracaso de la revolución de 1848 (**Gregory**, 1977; **Heidelberger**, 1998).

Dentro de este proyecto secularizador que buscaba cuestionar la autoridad de la Iglesia y su íntima relación con el Estado, tanto la ciencia como la historia jugaron un papel discursivo importante. En el largo repaso histórico que realizara el químico británico **John Draper** (1811-1882) para demostrar el freno irremediable que suponía la religión católica para el avance de las ciencias, los argumentos termodinámicos no estaban ausentes. En su famoso libro, *History of the Conflict Between Religion and Science*, **Draper** explicaba una visión alternativa a la idea cristiana de un Dios personal que había creado el universo y las almas inmortales de los humanos<sup>20</sup>. Los argumentos de **Draper** no pretendían aportar una visión del mundo materialista, sino rescatar una visión espiritualista alejada, no obstante, de los dogmas católicos. Para **Draper**, en el universo no había un “Ser Supremo” sino un “Poder Supremo” que estaba absolutamente determinado por unas leyes naturales inmutables (**Draper**, 1876: 25):

La fuerza vital que llena el mundo es lo que los ignorantes llaman Dios; las modificaciones porque pasan todas las cosas tienen un lugar de un modo irresistible, y por esto puede decirse que el progreso del mundo, bajo el destino, es como una semilla que no puede germinar sino de un modo determinado.

A partir de un universo caracterizado por una “Fuerza Suprema”, la idea de un Dios personal era reemplazada entonces por la de una inteligencia impersonal y por la idea de un alma que “nace de él y vuelve a él”. En otras palabras **Draper** relacionaba el concepto de energía con la idea de un dios indeterminado o inteligencia impersonal, y recurría a la ley de su conservación para demostrar la eternidad del universo y la imposibilidad de continuas creaciones de almas (**Draper**, 1876: 130-131):

En la India fue donde primero descubrieron los hombres el hecho de que la fuerza es indestructible y eterna. Esto implica ideas más o menos distintas de lo que llamamos ahora “correlación y conservación”.

<sup>20</sup> Al igual que los textos de **Büchner** y **Tyndall**, el libro de **Draper** fue inmensamente popular en la segunda mitad del siglo XIX. Publicado originalmente en 1874, ya en 1876 existían dos traducciones al español.

Consideraciones relacionadas con la estabilidad del universo dan fuerza a esta opinión, puesto que es palmario que si alguna vez hubiera, ya un aumento, ya una disminución, cesaría el orden del mundo. La cantidad definida e invariable de la energía del universo debe ser aceptada, por lo tanto, como un hecho científico; los cambios que presenciamos sólo se refieren a su distribución.

Pero toda vez que el alma debe considerarse como un principio activo, dar existencia a una nueva, sacada de la nada, es necesariamente aumentar la fuerza primitiva del mundo. Y si esto se ha verificado cada vez que ha nacido un individuo y ha de repetirse de aquí en adelante, la totalidad de la fuerza debe ir continuamente aumentando.

A pesar de su íntima relación con discursos naturalistas y materialistas, la conservación de la energía también fue interpretada de forma armónica con supuestos teológicos, a la vez que estos supuestos fueron readaptados a sus leyes. Así como se habló de materialismo y naturalismo científico, también se elaboraron “apologías científicas” de la fe cristiana, o exposiciones científicas que resaltaban el carácter antimaterialista de sus leyes. Tan popular como los libros de **Büchner**, **Tyndall** o **Draper**, lo fueron textos como los escritos por el jesuita y astrónomo italiano **Angelo Secchi** (1818-1878) y sus esfuerzos por armonizar las nuevas leyes de la física con las creencias religiosas. Si cada vez que se nombraba la palabra “materialismo” en la esfera pública europea de la segunda mitad del siglo XIX, los nombres de **Tyndall**, **Büchner** o **Draper** eran imprescindibles, otro tanto ocurría con el nombre de **Secchi** cuando el discurso apuntaba a destacar la armonía entre física y religión.

En efecto, en el libro titulado *L'Unità delle Forze Fisiche. Saggio di Filosofia Naturale*, publicado en Italia en 1864, **Secchi** se proponía presentar los últimos adelantos de la física reunidos de forma sintética (**Secchi**, 1869: vi-viii)<sup>21</sup>. **Secchi** abogaba en su libro por aportar hipótesis que sintetizaran la física, y afirmaba que las fuerzas ya no podían ser consideradas como cualidades ocultas de la materia sino como meros efectos del movimiento. **Secchi**, a partir de una concepción atomista de la materia, postulaba que los fenómenos físicos tales como el calor, la luz, la electricidad y el magnetismo eran explicables en términos exclusivos de la interacción de la materia y el éter. Así como el calor era un movimiento de las partículas de los cuerpos,

o la luz era la vibración del éter, de igual forma se podían explicar los fenómenos electromagnéticos. El énfasis de **Secchi** residía en un argumento ontológico que negaba la realidad de la energía, presentando este concepto como el resultado de dos conceptos más básicos: materia y movimiento. Para **Secchi**, la idea de energía era confusa y se prestaba a que se le otorgaran poderes ocultos y que diera lugar a sofismas. Por consiguiente, una vez explicado el concepto de energía en términos de materia (tanto ponderable como etérea) y movimiento se evitaba toda confusión y se hacía necesaria una causa primera que hubiera generado el movimiento, causa que no era otra, esgrimía **Secchi**, que la mano de Dios.

Además de este argumento ontológico –que tuvo acogida entre diversas comunidades científicas europeas–, en el contexto europeo existieron otras estrategias por evitar que las leyes de la termodinámica se relacionaran con, o sustentaran una visión materialista del universo. Por ejemplo, algunos científicos británicos, entre ellos **William Thompson**, **James Maxwell**, **Peter Tait** o **Balfour Stewart**, resaltaron que la segunda ley caracterizaba un universo en concordancia con las creencias religiosas. Un libro inmensamente popular en Gran Bretaña [tuvo 14 ediciones en trece años (**Myers**, 1989: 327)], *The Unseen Universe* (1875), escrito por los filósofos naturales **Peter G. Tait** (1831-1901) y **Balfour Stewart** (1828-1887), fue un intento de desvincular “la ciencia de la energía” de una posición materialista. En particular, el libro esgrimía refutaciones a las “ideas materialistas” expuestas por **Tyndall** y hacía un esfuerzo por aportarle credibilidad científica a la idea de la inmortalidad del alma (**Harman**, 1972; **Myers**, 1989). El argumento principal de este libro se desprendía del significado religioso que se le podía otorgar a la segunda ley de la termodinámica y que había sido elaborado por los filósofos naturales que habían construido la ciencia de la energía, en especial **Thomson** y **Maxwell** (**Smith**, 1998, cap. 12).

Si la primera ley de la termodinámica podía sugerir un universo eterno y cíclico, era precisamente la segunda ley la que evitaba tal suposición. En los procesos en que la energía se transformaba, una parte de ésta siempre se disipaba en forma de calor. Esto significaba que esta energía no podía volver a ser transformada en su totalidad y por lo tanto no era más aprovechable. La ley de la disipación de la energía caracterizaba un universo material que necesariamente debía tener un inicio y que se dirigía inevitablemente hacia un fin, aquel donde toda la energía estaría disipada en forma de calor y por lo tanto no habría posibilidad de

21 Para este trabajo se ha consultado la edición francesa del libro de **Secchi** publicada en 1869.



ningún tipo de vida. En otras palabras el principio de disipación era una ley natural que negaba la idea de un universo eterno y cíclico.

Cuando **Thomson** publicó su artículo “On a Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy”, en el que explicaba la muerte térmica del universo como consecuencia de la tendencia natural de la energía a disiparse en forma de calor, se estaba escribiendo una profecía bíblica con la autoridad de una fórmula matemática (**Thomson**, 1852). La segunda ley de la termodinámica se convertía así en una confirmación física de una verdad moral. **Thomson** veía en la muerte térmica del universo una confirmación científica de la visión decadente de la tierra expuesta en el Antiguo Testamento y en especial en el pasaje Isaías 51:6 (**Smith**, 1976)<sup>22</sup>. Para **Thomson**, las dos leyes de la energía caracterizaban precisamente el contraste que aparecía en este pasaje bíblico que anunciaba el fin de la tierra y la desaparición de los cielos, pero a la vez la eternidad de la salvación. Este contraste entre temporalidad y eternidad se reflejaba en las leyes de la energía: en la tierra desaparecería el pecado así como se disiparía la energía, pero igualmente la salvación, la rectitud y la energía permanecerían para siempre (**Myers**, 1989: 318).

Hace ya varios años el historiador **Stephen Brush** comentaba que la ley de la disipación de la energía pareció tener poco impacto en el mundo filosófico e intelectual europeo durante la segunda mitad del siglo XIX. Según **Brush**, sólo después de 1900 aparecieron constantes referencias de esta ley y sus consecuencias cosmológicas. Gracias a obras divulgativas de científicos como **James Jeans** o **Artur Eddington** se logró que la idea de la muerte térmica del universo fuera una noción conocida entre los hombres cultos europeos (**Brush**, 1978, cap. 5).

Si bien la primera ley tuvo mucho mayor presencia en la esfera pública de la época, la segunda ley no pasó desapercibida. Ciertamente, y como comentaba **Brush**, la popular obra de **Tyndall**, *Heat as a mode of motion*, no hacía referencia a la posibilidad de la muerte térmica, y de hecho **Büchner** en su *Fuerza y materia* tampoco lo hacía. Evidentemente, tanto para **Tyndall** como para **Büchner** la idea de un universo material con un fin establecido iba en detrimento de su visión naturalista del universo y no era por lo tanto sorprendente su omisión del tema. No obstante, **Büchner** trataría el tema en detalle en su texto *Licht und Leben* publicado en 1882 y traducido al español en 1888. El

texto constaba de tres capítulos y el segundo, “La circulación de las fuerzas y el fin del mundo”, se dedicaba exclusivamente a este tema. **Büchner** se había interesado especialmente por la termodinámica gracias a su amigo e ingeniero **Christian Otto Mohr** (1835-1918), el cual era un experto en estos temas (**Gregory**, 1977: 156). Así pues, **Büchner** explicaba la muerte térmica del universo como consecuencia de la ley de disipación, pero criticaba a sus defensores por llevar sus consecuencias a extremos inaceptables. **Büchner** no aceptaba que la ley de la entropía caracterizara un universo que se dirigía inexorablemente a un fin total en el que el movimiento y la vida cesarían del todo. El significado que le otorgaba **Büchner** a la muerte térmica del universo se caracterizaba por su carácter local. Esta ley predecía correctamente el fin de los sistemas solares pero no evitaba que otros sistemas se formaran. Por lo tanto, argumentaba **Büchner**, la entropía demostraba científicamente que en el universo existían procesos cíclicos de origen y disolución, tal como era la vida misma, pero de forma global el universo era eterno e imperecedero (**Büchner**, 1888, cap. 2).

La escasa mención de la ley de la entropía en los libros más populares que hablaban sobre la unidad de las fuerzas físicas, posiblemente le restó visibilidad en la esfera pública. En todo caso, intelectuales católicos empezaban a utilizar la segunda ley de la termodinámica como argumento antimaterialista en la década de 1880. Una de las principales fuentes de este argumento provino de un libro escrito por el canónigo y decano de la facultad de Letras de la Universidad de Toulouse, **Marc Antonie Duilhé de Saint-Projet** (1822-1897). Este profesor de apologética católica publicó en 1885 un libro que pretendía hacer “la contra-prueba de las certidumbres de la fe por medio de las certidumbres de la ciencia” (**Duilhé**, 1886: xvii). El libro fue traducido al castellano en 1886 bajo el nombre de *Apología científica de la fe cristiana*. En su texto, **Duilhé** se basaba expresamente en el libro de **Tait** y **Stewart**, *The Unseen Universe*, a la hora de utilizar las leyes de la termodinámica en su apologética. Criticando la obra de **Büchner**, *Luz y vida*, **Duilhé** negaba la posibilidad de que se crearan nuevos soles y planetas “cargados de seres tan desgraciados como nosotros.” Esta visión materialista de un universo cíclico y eterno era refutada entonces mediante la segunda ley de la termodinámica que, en palabras de **Duilhé** “nos enseña, como si lo tocáramos con las manos, el principio y el fin del universo físico presente” (**Duilhé**, 1886: 144).

<sup>22</sup> El pasaje reza así: “Alzad a los cielos vuestros ojos, y mirad abajo a la tierra; porque los cielos serán deshechos como humo, y la tierra se envejecerá como ropa de vestir, y de la misma manera perecerán sus moradores; pero mi salvación será para siempre, mi justicia no perecerá.”

Independientemente de su instrumentalización como argumento de apología cristiana, a muchos científicos de la época les impresionó que semejante “profecía” pudiera estar definida en los términos de una ecuación matemática. El físico español **Enrique Serrano Fatigati**, aunque rechazaba la posibilidad de que toda la energía del universo se disipara, resaltaba no obstante que “la promesa de muerte leída por **Thomson** en los sencillos caracteres de los términos de una ecuación parece quitar toda esperanza de encontrar otro futuro destino en el estudio del desenvolvimiento de la materia; esta profecía tiene toda la fuerza de una deducción perfectamente lógica, de una verdad demostrada severamente” (**Serrano Fatigati**, 1873: 75). De forma similar, **Helmholtz** resaltaba en una de sus charlas populares la sagacidad que había demostrado tener **Thomson** al escribir un artículo en el que “en las letras de una vieja conocida fórmula matemática, que sólo habla de calor, volumen y la presión de los cuerpos, fue capaz de distinguir unas consecuencias que, aunque con seguridad después de un periodo infinito de tiempo, amenazan el universo con una muerte eterna” (**Helmholtz**, 1885: 172-173). Impresión que la literatura no tardó en recoger, tal como lo reflejara la famosa novela de **H. G. Wells**, *La máquina del tiempo*, en la que al viajar 30 millones de años al futuro, su protagonista vislumbrara justamente esa promesa de muerte leída por **Thomson**<sup>23</sup> y que **Jorge Luis Borges** expresaría con las siguientes palabras (**Borges**, 1975: 222-223):

La primera ley de la termodinámica declara que la energía del universo es constante; la segunda, que esa energía propende a la incomunicación, al desorden, aunque la cantidad total no decrece. Esa gradual desintegración de las fuerzas que componen el universo, es la entropía. Una vez alcanzado el máximo de entropía, una vez igualadas las diversas temperaturas, una vez excluida (o compensada) toda acción de un cuerpo sobre otro, el mundo será un fortuito concurso de átomos. En el centro profundo de las estrellas, ese difícil y mortal equilibrio ha sido logrado. A fuerza de intercambios el universo entero lo alcanzará, y estará tibio y muerto.

La luz se va perdiendo en calor; el universo, minuto por minuto, se hace invisible. Se hace más liviano también. Alguna vez, ya no será más que calor: calor equilibrado, inmóvil, igual. Entonces habrá muerto.

## Bibliografía

- Barton, R.** 1987. “John Tyndall, Pantheist. A rereading of the Belfast Address”, *Osiris*, 3, pp. 111-134.
- Bayertz, K.** 1983. “Naturwissenschaft und Sozialismus: Tendenzen der Naturwissenschafts-Rezeption in der deutschen Arbeiterbewegung des 19. Jahrhunderts”, *Social Studies of Science*, 13, pp. 355-394.
- Bevilacqua, F.** 1993. “Helmholtz’s Über die Erhaltung der Kraft”, en David Cahan. (ed.), *Hermann von Helmholtz and the foundations of nineteenth-century science*. University of California Press. Berkeley, pp. 291-333.
- Borges, J. L.** 1975. “La doctrina de los círculos”, en *Prosa*. Círculo de Lectores. Barcelona, pp. 216-223.
- Brooke, J.** 1991. *Science and Religion*. Cambridge University Press. Cambridge.
- , **Cantor, G.** 1998. *Reconstructing Nature. The Engagement of Science and Religion*. T&T Clark Ltd. Edinburgh.
- Brush, S.** 1970. “The Wave Theory of Heat: A Forgotten Stage in the Transition from the Caloric Theory to Thermodynamics”, *BJHS*, 5, pp. 145-167.
- . 1978. *The temperature of History. Phases of Science and Culture in the Nineteenth Century*. Burt Franklin. New York.
- Büchner, L.** 1868. *Fuerza y materia. Estudios populares de historia y filosofía naturales*. Librería de Alfonso Durán. Madrid.
- . 1888. *Luz y vida. Tres lecciones populares de Historia Natural: el sol en sus relaciones con la vida, la circulación de las fuerzas y el fin del mundo, de la filosofía de la generación*. Est. tip. de San Francisco de Sales. Madrid.
- Cala, F.** 2006. “La cuestión 31 de la óptica o el programa de las fuerzas en la filosofía mecánica”, *Scientiae Studia: Revista Latino-Americana de Filosofía e História da Ciência*, 4, pp. 163-176.
- Caneva, K.** 1993. *Robert Mayer and the conservation of energy*. Princeton University Press. Princeton, New Jersey.
- . 1997. “Physics and ‘Naturphilosophie’: A reconnaissance”, *History of Science*, 35, pp. 35-106.
- Cardwell, D. S. L.** 1967. “Some Factors in the Early Development of the Concepts of Power, Work and Energy”, *BJHS*, 3, pp. 209-224.
- . 1971. *From Watt to Clausius: the rise of thermodynamics in the early industrial age*. Heinemann Educational. London.
- . 1989. *James Joule: A Biography*. Manchester University Press. Manchester.
- Clarke, B.** 2001. *Energy Forms. Allegory and Science in the era of classical thermodynamics*. The University of Michigan Press. Ann Arbor.
- Draper, J. W.** 1876. *Historia de los conflictos entre la religión y la ciencia*. Imprenta de Aribau. Madrid.
- Duilhé de Saint-Projet, Marc Antonie.** 1886. *Apología científica de la fe cristiana*. Imprenta de Manuel Alufré. Valencia.
- Ferngren, G. B.** 2002. “Introduction”, en Gary B Ferngren. (ed.), *Science and Religion: A Historical Introduction*. The Johns Hopkins University Press. Baltimore, pp. ix-xiv.
- Fox, R.** 1986. “Introduction”, en Robert Fox. (ed.), *Sadi Carnot. Reflexions on the motive power of fire. A critical edition with the surviving manuscripts translated and edited by Robert Fox*. Lilian Barber Press Inc. New York, pp. 1-57.

- . 1990. "Laplacian Physics", en R. C. Olby; G. N. Cantor. (eds.), *Companion to the History of Modern Science*. Routledge. London, pp. 278-294.
- Girón Sierra, A.** 2005. *En la mesa con Darwin: evolución y revolución en el movimiento libertario en España (1869-1914)*. C.S.I.C. Madrid.
- Gregory, F.** 1977. *Scientific Materialism in Nineteenth-Century Germany*. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht.
- . 2003. "Interactions of Physical Science and Western Religion in the Nineteenth and Twentieth Centuries", en Mary Jo Nye. (ed.), *The Cambridge History of Science. Volume 5. The Modern Physical and Mathematical Sciences*. Cambridge University Press. Cambridge, pp. 36-53.
- Hakfoort, C.** 1992. "Science Deified: Wilhem Ostwald's Energeticist World-View and the History of Scientism", *Annals of Science*, 49, pp. 525-544.
- Hankins, T. L.** 1988. *Ciencia e Ilustración. Siglo XXI*. Madrid.
- Harman, P. M.** 1972. "The Unseen Universe: Physics and the Philosophy of Nature in Victorian Britain", *BJHS*, 6, pp. 73-79.
- . 1973. "Conversion of Forces and the Conservation of Energy", *Centaurus*, 66, pp. 147-161.
- . 1974. "Helmholtz and Kant: the metaphysical foundations of 'Ueber die Erhaltung der Kraft'", *Studies in History and Philosophy of Science*, 5, pp. 205-238.
- . 1976. "Mayer's Concept of 'Force': The 'Axis' of a New Science of Physics", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 7, pp. 277-296.
- . 1990. *Energía, fuerza y materia. El desarrollo conceptual de la física del siglo XIX*. Alianza Editorial. Madrid.
- Heidelberger, M.** 1998. "Büchner, Friedrich Karl Christian Ludwig (Louis) (1824-99)", en Edward Craig. (ed.), *Routledge Encyclopedia of Philosophy CD-ROM*. Routledge. London.
- Heilbron, J. L.** 1993. *Weighing Imponderables and Other Quantitative Science Around 1800*. University of California Press. Berkeley.
- Helmholtz, H.** 1885. *Popular Lectures on Scientific Subjects*. D. Appleton and Co. New York.
- Hiebert, E.** 1966. "The Uses and Abuses of Thermodynamics in Religion", *Daedalus*, 95, pp. 1046-1080.
- Kragh, H.** 2004. *Matter and Spirit in the Universe. Scientific and Religious Preludes to Modern Cosmology*. Imperial College Press. London.
- Kuhn, T. S.** 1982. "La conservación de la energía como ejemplo de descubrimiento simultáneo", en Thomas S. Kuhn, *La tensión esencial. Estudios selectos sobre la tradición y el cambio en el ámbito de la ciencia*. Fondo de Cultura Económica. México, pp. 91-128.
- Lindberg, D. C.; Numbers, R. L.** (eds.). 2003. *When Science and Religion Meet*. University of Chicago Press. Chicago.
- Mach, E.** 1872. *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*. Calve. Prag.
- . 1986 [1896]. *Principles of the theory of heat: Historically and critically elucidated*. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht.
- Merz, J. T.** 1965 [1903]. *A History of European Thought in the Nineteenth Century*, 4 volúmenes. Dover. New York.
- Morus, I. R.** 1991. "Correlation and control: William Robert Grove and the construction of a new philosophy of scientific reform", *Studies in History and Philosophy of Science*, 22, pp. 589-621.
- Myers, G.** 1989. "Nineteenth-Century popularizations of Thermodynamics and the Rhetoric of Social Prophecy", en Patrick Brantlinger. (ed.), *Energy & Entropy. Science and Culture in Victorian Britain*. Indiana University Press. Bloomington, pp. 307-338.
- Ord-Hume, A.** 1980. *Perpetual motion: the history of an obsession*. St. Martin's Press. New York.
- Papanelopoulou, F.** 2004. "The Emergence of Thermodynamics in Mid-19th-Century France", D. Phil Thesis, Oxford University.
- Pohl-Valero, S.** 2007. "La 'circulación' de la energía: Una historia cultural de la termodinámica en la España de la segunda mitad del siglo XIX", Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona.
- , S. 2009. "The Circulation of Energy: Thermodynamics, National Culture and Social Progress in Spain, 1868-1890", en Faidra Papanelopoulou; Agustí Nieto-Galan; Enrique Perdiguero (eds.), *Popularizing science and technology in the European periphery, 1800-2000*. Ashgate. Aldershot, pp. 115-134.
- Porter, R.** 1981. "Review of The temperature of History. Phases of Science and Culture in the Nineteenth Century", *Isis*, 72, pp. 520-521.
- Secchi, A.** 1869. *L'Unité des Forces Physiques. Essai de Philosophie Naturelle*. F. Savy, Libraire-Éditeur. Paris.
- Serrano F, E.** 1873. "El progreso de la materia", *Revista de la Universidad de Madrid*, 2, pp. 69-98.
- Seres, M.** 1994. *El nacimiento de la física en el texto de Lucrecio*. Pre-Textos. Valencia.
- Siegel, D. M.** 1981. "Thomson, Maxwell, and the universal ether in Victorian physics", en G. N. Cantor; J. S. Hodge. (eds.), *Conceptions of Ether. Studies in the History of Ether Theories 1740-1900*. Cambridge University Press. Cambridge, pp. 239-268.
- Silliman, R. H.** 1974. "Fresnel and the Emergence of Physics as a Discipline", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 4, pp. 137-162.
- Smith, C. & Wise, N.** 1989. *Energy and Empire. A biographical study of Lord Kelvin*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Smith, C.** 1976. "Natural Philosophy and Thermodynamics: William Thomson and 'the Dynamical Theory of Heat'", *BJHS*, 9, pp. 293-319.
- . 1990. "Energy", en R. C. Olby; G. N. Cantor. (eds.), *Companion to the History of Modern Science*. Routledge. London, pp. 326-341.
- . 1998. *The Science of Energy. A Cultural History of Energy Physics in Victorian Britain*. The University of Chicago Press. Chicago.
- . 2003. "Force, Energy, and Thermodynamics", en Mary Jo Nye. (ed.), *The Cambridge History of Science. Volume 5. The*

Modern Physical and Mathematical Sciences. Cambridge University Press. Cambridge, pp. 289-310.

**Stewart, B., Tait, P. G.** 1875. *The Unseen Universe or Physical Speculations on a Future State*. Macmillan. London.

**Thomson, W.** 1852. "On a Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy", *Philosophical Magazine*, 4, pp. 304-306.

**Turner, F. M.** 1978. "The Victorian Conflict between Science and Religion: A Professional Dimension", *Isis*, 69, pp. 356-376.

———. 1981, "John Tyndall and Victorian Scientific Naturalism" en W. H. Brock; et al. (eds.), *John Tyndall. Essays on a Natural Philosopher*. Royal Dublin Society. Dublin, pp. 169-180.

**Tyndall, J.** 1863. *Heat Considered as a Mode of Motion*. Longmans, Green & Co. London.

———. 1885. *El calor. Modo de movimiento*. El Progreso Científico. Barcelona.

**Weinberg, S.** 2003, *El sueño de una teoría final. La búsqueda de las leyes fundamentales de la naturaleza*. Crítica. Barcelona.

**Wise, N.** 1979. "William Thomson's Mathematical Route to Energy Conservation: A case Study of the Role of Mathematics in Concept Formation", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 10, pp. 49-83.

———. 1981. "German concepts of force, energy, and the electromagnetic ether: 1845-1880", en G. N. Cantor; J. S. Hodge. (eds.), *Conceptions of ether. Studies in the History of ether theories 1740-1900*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 269-307.

Recibido: mayo 28 de 2009.

Aceptado para su publicación: diciembre 18 de 2009.



# ESTUDIO MATEMÁTICO DEL DISEÑO PRECOLOMBINO DE LA ESPIRAL EN EL ARTE RUPESTRE DEL NOROCCIDENTE DEL MUNICIPIO DE PASTO (COLOMBIA)

Por

Armando José Quijano Vodniza<sup>1</sup>

## Resumen

**Quijano Vodniza A. J.:** Estudio matemático del diseño precolombino de la espiral en el arte rupestre del noroccidente del municipio de Pasto (Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (130): 53-69, 2010. ISSN 0370-3908.

La espiral es el diseño precolombino que con mayor frecuencia aparece en el arte rupestre de Nariño, sin embargo, hasta el momento no se han determinado las propiedades geométricas de esta representación. En este sentido, se realizó un estudio estadístico de una muestra de 44 espirales representadas en petroglifos del sector noroccidental del Municipio de Pasto, en el cual se indagó sobre: el número de espirales de acuerdo con la dirección de su giro, dimensiones de las espirales, tramos y números de vueltas de los grabados y el tipo de espiral trazada. La investigación permitió determinar que el diseño en cuestión corresponde a una espiral de dos centros, lo cual arroja las primeras evidencias a favor de la existencia de patrones geométricos en la elaboración de estos vestigios arqueológicos.

**Palabras clave:** arte rupestre, diseño precolombino, etnomatemáticas, espiral de dos centros.

## Abstract

The spiral figure is the Pre-Columbian design that appears most frequently on the rock art in Nariño, however, until now the geometrical properties have not been determined by this representation. Thus, a statistical study is carried out of a sample of the 44 spirals represented in the petroglyphs of the north-western sector of the Municipality of Pasto, in which the following is researched: number of spirals according to the direction of their movement, dimensions of the spirals, lines and number of turns of the engravings and the type of the spiral traced. The research allowed us to determine that the design in question corresponds to a spiral of two centres, which sheds light on the first evidence in favour of the existence of geometrical patterns in the elaboration of these archaeological vestiges.

**Key words:** rock art, pre-columbian design, ethnomathematics, spiral of two centres.

---

<sup>1</sup> Director del grupo de investigación Inti Rumi, Institución Universitaria CESMAG, San Juan de Pasto, Colombia. Correo electrónico: [ajquivo@yahoo.com.co](mailto:ajquivo@yahoo.com.co)

## Introducción

En la zona andina del actual Departamento de Nariño se ha encontrado una cantidad importante de obras rupestres, tanto a nivel de grabados (petroglifos) como de pinturas (pictografías), elaboradas por los primeros pobladores de esta región de Colombia, las cuales se ubican en los territorios habitados en la época prehispánica por las etnias de los Pastos y los Quillacingas.

Los registros adelantados por investigadores como: **Justino Mejía & Mejía** (1934), **Wenseslao Cabrera** (1966), **Oswaldo Granda Paz** (1983), **Ana María Groot** (1991) y **Edgar Rodríguez** (1992) permiten identificar la presencia frecuente de la figura de la espiral en estas obras precolombinas. Efectivamente, la revisión bibliográfica y las visitas adelantadas en la década de los noventa por el autor a algunos de estos petroglifos y pictografías confirman que de las 76 obras rupestres identificadas, en 42 de ellas aparece por lo menos una vez el trazo de la espiral, encontrándose, incluso, que en algunos sitios esta representación se repite hasta 17 veces sobre la superficie de una misma masa rocosa, como sucede con un petroglifo registrado por **Cabrera** en el sector de Pandiaco, hoy barrio de la ciudad de San Juan de Pasto.

La presencia recurrente del diseño de la espiral en el arte rupestre de Nariño sugiere, sin lugar a dudas, el importante valor simbólico de esta representación para sus autores; sin embargo, hasta el momento no se ha realizado ningún tipo de estudio que permita conocer los motivos que tuvieron estos pueblos para preferir esta iconografía, ni siquiera se han considerado en detalle las características geométricas de esta figura precolombina, como: dimensión promedio de las espirales, separación entre tramos o tipo de espiral representada.

Sin lugar a dudas, este desconocimiento de las propiedades matemáticas de los diseños representados en las obras rupestres, que se manifiesta tanto en Nariño como en el resto del país, se debe al planteamiento sostenido por unos algunos autores, quienes han manifestado la imposibilidad de encontrar *patrones* dentro de los diferentes motivos que se han grabado y pintado en las piedras, tachándolos como meras expresiones incoherentes de *mentes primitivas*:

Incurriríamos en cansadas repeticiones si continuáramos describiendo tantos y tantos petroglifos cuyas copias hemos tenido a la vista, y cuyo examen sería enteramente infructuoso. Nada pueden revelar a la ciencia histórica esos ensayos de dibujos de ornamentos, esas figuras informes de animales y

esos garabatos semejantes a los que traza un niño travieso e inexperto. Jamás se observa en ellos el orden ni el encadenamiento que son indicio cierto de una escritura cualquiera. No reproducen siquiera las más sencillas escenas de la vida de los indios, *v.gr.*, una ceremonia religiosa, una pareja humana, una cacería, dos guerreros que se baten, etc. (...). No supieron pintarlos ni grabarlos en las piedras, en las que tampoco trazaron la figura de sus caciques y personas principales, ni siquiera las del venado, las aves y las fieras de su selva. Mudos en razón misma de su origen, condenados esos signos, por la mano inconsciente que los trazó, a un silencio eterno, jamás podrá la vara mágica de la ciencia hacerlos hablar (**Restrepo**, 1972, p. 212).

No obstante, en el presente estudio se pretende refutar esta afirmación a partir del estudio estadístico de una muestra de espirales halladas en obras rupestres del Municipio de Pasto, ubicado en la parte central de los Andes de Nariño. Ciertamente, con el surgimiento en los últimos años de la corriente disciplinar de la Etnomatemática, la postura de considerar los diseños precolombinos como manifestaciones rudimentarias de pueblos atrasados ha comenzado a cambiar.

Desde que Ubiratan D'Ambrosio presentó la base teórica de la Etnomatemática durante la sesión inaugural del *Quinto Congreso Internacional de Matemática Educativa en Adelaida* (evento celebrado en Australia en el año de 1.984), la comunidad académica internacional y nacional se ha interesado en investigar las diferentes ideas y prácticas matemáticas que cada cultura ha desarrollado desde tiempos prehistóricos:

A la hora en que el australopiteco escogió y cortó un pedazo de piedra con el objetivo de descarnar un hueso, su mente matemática fue revelada. Para seleccionar la piedra es necesario evaluar sus dimensiones y para cortar el requisito necesario y suficiente que le permitía lograr su objetivo... consistía en evaluar y comparar las dimensiones [esta actividad] es una de las manifestaciones más elementales del pensamiento matemático (**Rosa & Orey**, 2005, pp. 364-365).

Al mismo tiempo que el conocimiento matemático progresaba en las civilizaciones del Antiguo Continente, en América las comunidades indígenas “también desarrollaban maneras específicas de conocer, entender, comprender y trabajar con el propio medio ambiente” (**Rosa & Orey**, 2005, p. 367), alcanzando niveles muy significativos como sucedió con la civilización Maya, una de las primeras culturas

que utilizó el número cero. Desafortunadamente, con la llegada de los conquistadores españoles al Nuevo Mundo en los siglos XV y XVI, gran parte de estos logros matemáticos se perdieron, debido a que los europeos que arribaron a este territorio, en su afán de riquezas materiales y de poder, despreciaron a las comunidades indígenas que habían florecido durante cientos y miles de años en América e impusieron su propia cultura, incluyendo el pensamiento matemático occidental: “aunque la civilización precolombina de América poseía conocimiento matemático..., se realizó un esfuerzo para transferir las matemáticas desde las tradiciones europeas a las colonias” (D’Ambrosio, 1999, p. 347).

Uno de los pocos testimonios de la época Colonial que describe los logros matemáticos alcanzados por los pueblos indígenas (D’Ambrosio, 1999), y el cual afortunadamente ha perdurado hasta el presente, es la obra del sacerdote franciscano Juan Diez Freyle, quien en el año 1.556 publicó en la ciudad de México “el primer libro de aritmética del Nuevo Mundo, titulado: *Sumario compendio de las cuentas de plata y oro que en los reinos del Perú son necesarias a los mercaderes y todo genero de tratantes: con algunas reglas tocantes al aritmética*” (Rosa & Orey, 2005, p. 369).

A pesar de tal sometimiento cultural por más de quinientos años, algunas prácticas de medición, cálculo y conocimiento matemático tradicional todavía prevalecen en algunas comunidades nativas, como sucede con los grupos étnicos de los Andes y la Amazonía (D’Amore, 2003); así, por ejemplo, “es común ver a los indígenas de América utilizando números indo-arábigos, pero realizando las operaciones de abajo a arriba, aduciendo que ésta es la manera en que crecen los árboles” (D’Ambrosio, 1999, p. 349), así mismo, “andando o conduciendo se memorizan rutas, en muchos casos optimizando trayectorias, lo cual es una costumbre de naturaleza matemática” (D’Ambrosio, 1999, p. 349).

En este sentido, se podría definir a la Etnomatemática como aquel campo de la ciencia que permite indagar: a) la historia de las ideas matemáticas que se encuentran en contextos culturales específicos y las cuales son transmitidas a través de las generaciones (Rosa & Orey, 2005; Rosa, 2008); b) los procesos de generación, organización, difusión y aplicación de los conocimientos matemáticos en dichos sistemas culturales (Ortiz-Franco, 2004); c) las técnicas, habilidades, al igual que las prácticas de contar, medir, pensar, ordenar, clasificar, inferir y calcular empleadas por los grupos culturales (D’Ambrosio, 1999; Ortiz-Franco, 2004); y d) los esquemas utilizados para desarrollar un sistema

numérico por medio de patrones de medida que corresponden a las necesidades culturales particulares, poblacionales, de producción y de intercambio (Higuera, 2008).

Un estudio etnomatemático muy importante se publicó en el libro *Native American Mathematics*, editado por Michael Closs de la Universidad de Texas, “el cual se enfoca en el desarrollo matemático indígena del Nuevo Mundo” (Closs, 1986, preface). Así mismo, otro trabajo que muestra claramente el nexo entre matemáticas, antropología e historia es *Ethnomathematics: a multicultural view of mathematical ideas* de Ascher (citado por Ortiz-Franco, 2004), en donde se exploran las ideas matemáticas de culturas como los incas, aztecas y mayas, relacionadas con sus prácticas de numeración, lógica, configuraciones espaciales y organización.

Con respecto a las destrezas matemáticas de las comunidades indígenas del actual Departamento de Nariño, se destaca el artículo: *Las proporciones del Sol de los Pastos*, elaborado por Albis y publicado en 1.987 en el *Boletín de Matemáticas* de la Universidad Nacional de Colombia, en donde se estudian las proporciones geométricas del motivo prehispánico de la estrella de ocho puntas inscrito en dos círculos concéntricos (denominado en la región como el *Sol de los Pastos*), y el cual está presente en el arte rupestre, la cerámica prehispánica y los tejidos artesanales de los andes del sur de Colombia y el norte del Ecuador.

## Metodología

En la presente investigación se visitaron en total doce sitios de interés en la zona noroccidental del Municipio de Pasto, de los cuales once tenían manifestaciones de arte rupestre y un caso –en el sector de San Juan Pamba, en Genoy–, correspondía a una piedra con una serie de surcos formados de manera natural. Dos obras rupestres se seleccionaron por ser prácticamente una de las últimas expresiones de este tipo de vestigios arqueológicos que quedan en la zona urbana de la actual ciudad de San Juan de Pasto: uno ubicado en el barrio de Pandiaco y el otro en el barrio de Torobajo.

Para definir los otros lugares se realizaron una serie de talleres con los habitantes de los corregimientos de Mapachico y de Genoy, en los cuales participaron personas que tenían conocimiento sobre este tipo de bienes culturales. Los asistentes elaboraron unos mapas parlantes con el fin de ubicar sobre pliegos de papel periódico los yacimientos arqueológicos con grabados o pinturas rupestres, así como los diferentes diseños que los pobladores recordaban haber visto en estas obras rupestres.

El primero de ellos se efectuó en la Escuela de Mapachico, el día sábado 9 de junio del 2007, entre las 6 de la tarde y las 8:30 de la noche, con la participación de las siguientes personas: Irma Vergara (Corregidora de Mapachico), Marcionila Botina, Luís H. Figueroa García, Lourdes Ortiz, Norberto Ortiz y Nicanor Criollo. Como resultado de este taller se identificaron las siguientes obras rupestres: El pictógrafo de El Higuieron, el petroglifo de la Gran Espiral, el petroglifo de la Vuelta Larga y la cueva del padre Francisco de la Villota.

Una semana después, el sábado 16 de junio, se adelantó el mismo taller en la Casa de la Junta Comunal de Genoy Centro, entre las 4:30 de la tarde y la 8:30 de la noche, con la participación de las siguientes personas: Célmo Criollo Carlosama, Diógenes Jiménez Villota, José Orlando Criollo Criollo, Crisóstomo Romualdo Criollo Villota, Juan Pablo Guevara Portilla, Héctor Miguel Jiménez, Quintín Arnulfo Luna Figueroa, José Francisco Yaqueno y Leonso Hernando Botina Jiménez.

Los resultados de este taller permitió identificar siete sitios (Figura 1), denominados por los asistentes como las piedras de: los Játivas, Turguaico, San Juan Pamba, Chasquisca, Tomates y El Edén (conformado éste último por dos petroglifos). Por otro lado, el petroglifo del Mantel de Piedra (Figura 2), que completa la muestra de obras rupestres estudiadas, fue descubierta por el grupo de investigación Inti Rumi en el momento que se hacía el reconocimiento del petroglifo de Tomates.

**Tabla 1.** Motivos representados en las obras rupestres visitadas

Motivos	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa
Figuras geométricas:		
Espirales	80	58,40%
Cuadriláteros	8	5,80%
Círculos	4	2,90%
Líneas rectas	4	2,90%
Líneas curvas	3	2,20%
Figuras zoomorfas:		
Monos	1	0,70%
Otros diseños de animales	5	3,60%
Figuras antropomorfas	3	2,20%
Figuras antropozoomorfas	1	0,70%
Canales	9	6,60%
Cavidades circulares (aljueros)	10	7,40%
Diseños indescifrables	9	6,60%
Total	137	100%

Mediante la técnica de calco o *frottage* se consiguieron imágenes de las obras rupestres en escala 1:1, es decir, de igual tamaño a los diseños presentes en la roca, respetando el trazo original de los grabados, e incluso, de las particularidades estructurales de las piedras. De manera más precisa, el *frottage* se realizó utilizando tiras de tela de interlón, de una longitud igual a la longitud de la pared de roca y con ancho comercial de 1,5 metros, las cuales se superpusieron sobre la superficie de la roca para cubrir todo su ancho. Luego, sobre la tela, se aplicó un material que tenía la propiedad de dejar una impronta sobre el interlón con los diferentes diseños de la obra rupestre, debido al efecto de la presión que los integrantes del grupo de investigación efectuaron sobre la tela colocada encima de los grabados. De esta manera, se obtuvieron negativos de las obras rupestres, sobre los cuales se midieron cuidadosamente las características de 44 de las espiras grabadas en los sitios visitados que todavía conservan su diseño original, teniendo el cuidado de no producir ningún tipo de daño sobre los petroglifos.

## Resultados

A partir de la información recopilada en cada uno de los sitios visitados se puede confirmar que efectivamente el diseño que con mayor frecuencia aparece en las obras rupestres ubicadas en la zona noroccidental del Municipio de Pasto es la espiral, con el 58,4% (Tabla 1).

El diseño de la espiral corresponde a una curva plana y abierta que da vueltas indefinidamente alrededor de un punto denominado origen, alejándose de él o aproximándose (Trejos, 2008); y dependiendo del giro que hacen, éstas se clasifican como *dextrógiras*, cuando viran hacia la derecha, o *levógiras*, cuando lo hacen hacia la izquierda (Figura 3).

Aplicando la regla de la mano derecha que se utiliza en el estudio del movimiento circular, en la espiral *dextrógira* el dedo pulgar indica hacia fuera del plano que contiene el diseño, mientras que los cuatro dedos restantes siguen el sentido de las vueltas que se pliegan hacia el origen; por el contrario, en la espiral *levógira* el dedo pulgar señala hacia adentro de dicho plano.

En el caso de las 44 espirales examinadas en el sector noroccidental del Municipio de Pasto, 23 de ellas son *dextrógiras* (52,3%), mientras que 21 son *levógiras* (47,7%), difiriendo los dos valores en el 4,6%.

La Tabla 1 también permite inferir la preferencia de los diseñadores de las obras rupestres por las figuras geométricas, por cuanto 99 de los motivos corresponden a esta categoría, representando el 72,2% del total de la muestra.



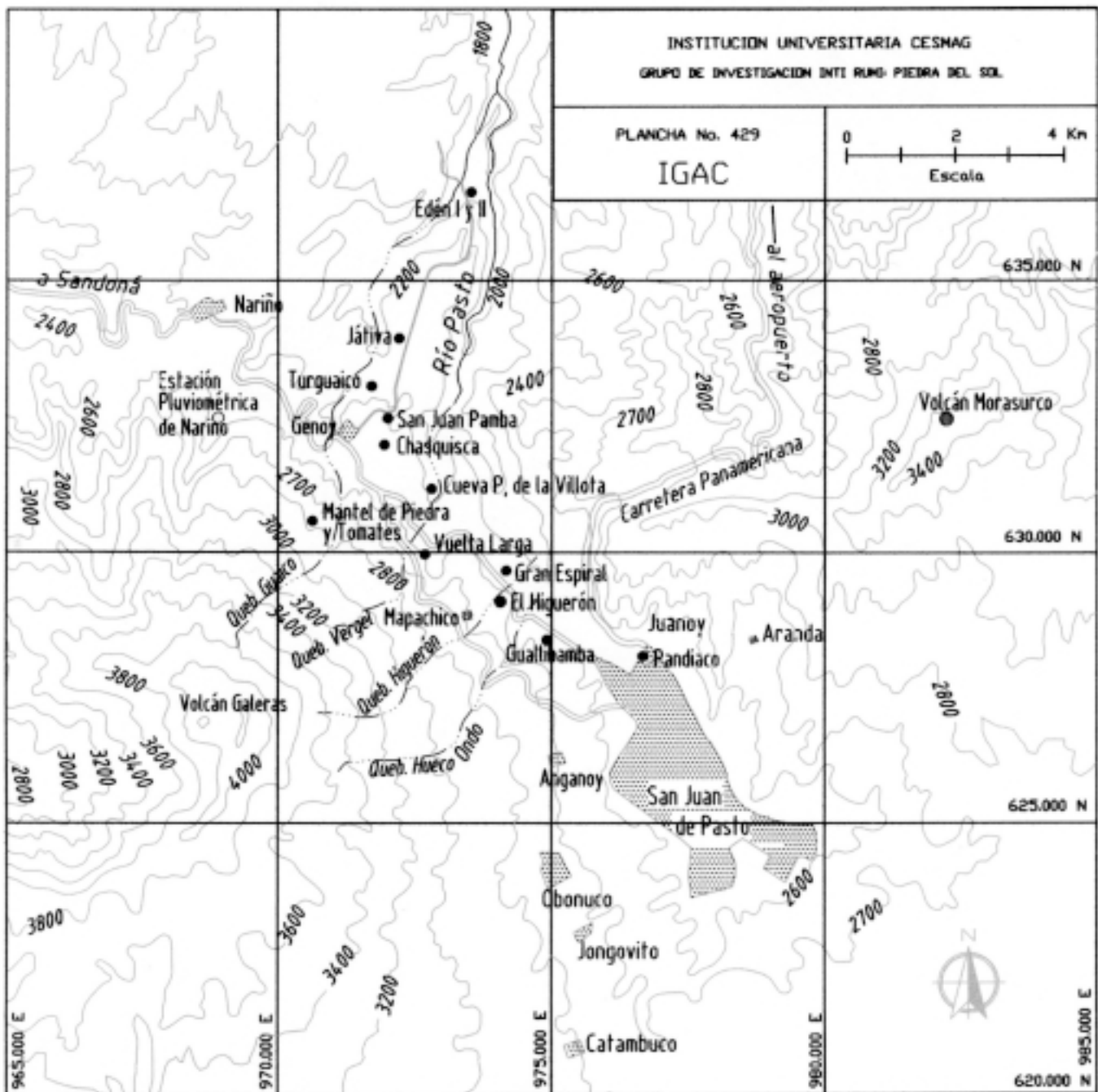


Figura 1. Ubicación de las obras rupestres estudiadas.

Por otro lado, con la utilización de una regla perfectamente graduada (escalímetro) se procedió a medir con todo detalle las dimensiones de las espirales sobre los *frottages* realizados, valiéndose para ello de un sistema de referencia cartesiano formado por dos ejes perpendiculares entre sí (X,Y) que pasan por el *origen* del grabado (Figura 4).

En este sentido, en el anexo 1 se presenta el tamaño de las diferentes espirales en cada uno de los ejes ortogonales, al final del cual se indica: el número total de datos (n), la mayor dimensión de la espiral en la dirección respectiva (L máx.), la menor dimensión de la espiral en la dirección respectiva (L mín.), el rango (R), la media aritmética (m), la desviación

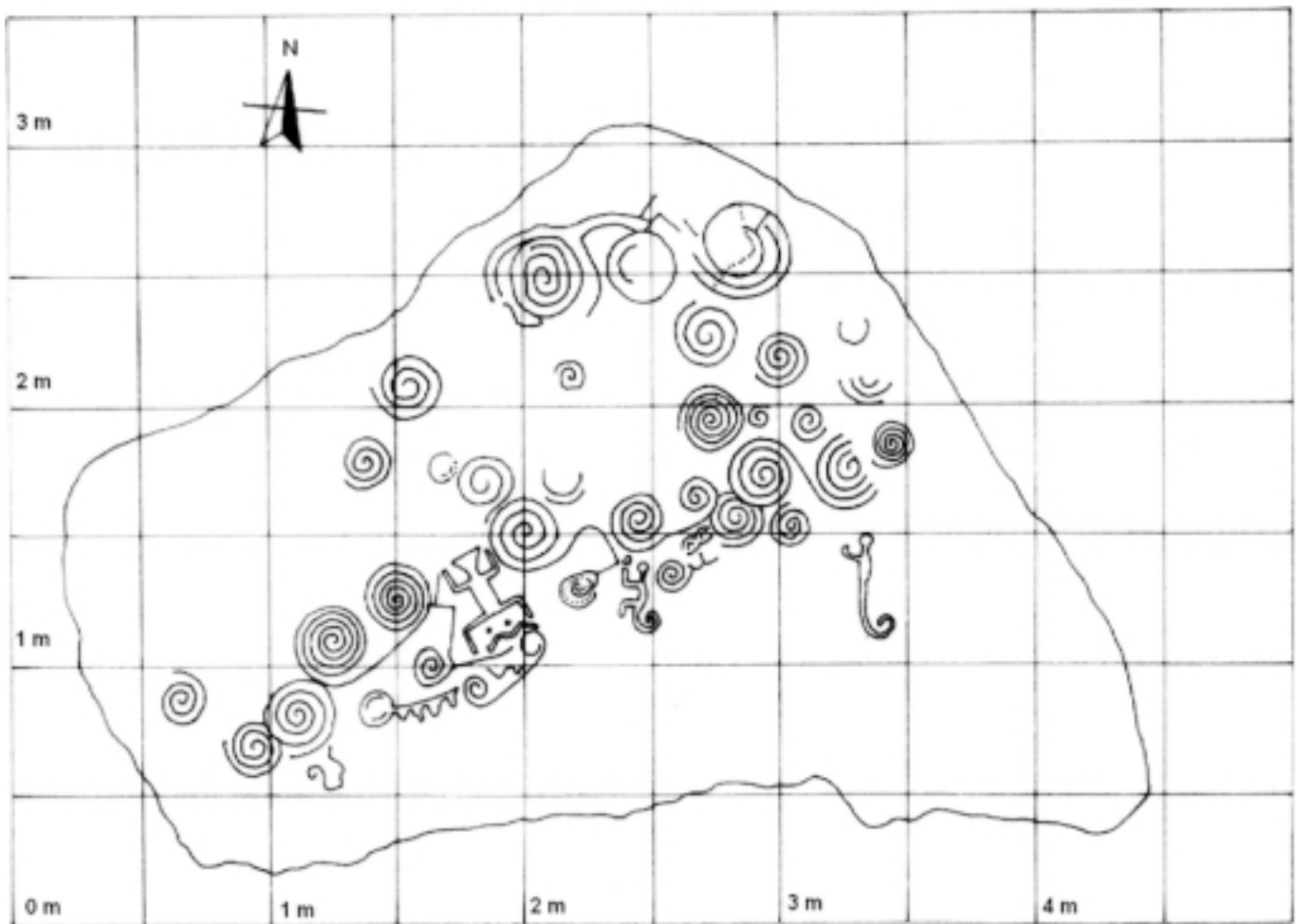


Figura 2. Petrogifo Mantel de Piedra (Municipio de Pasto).

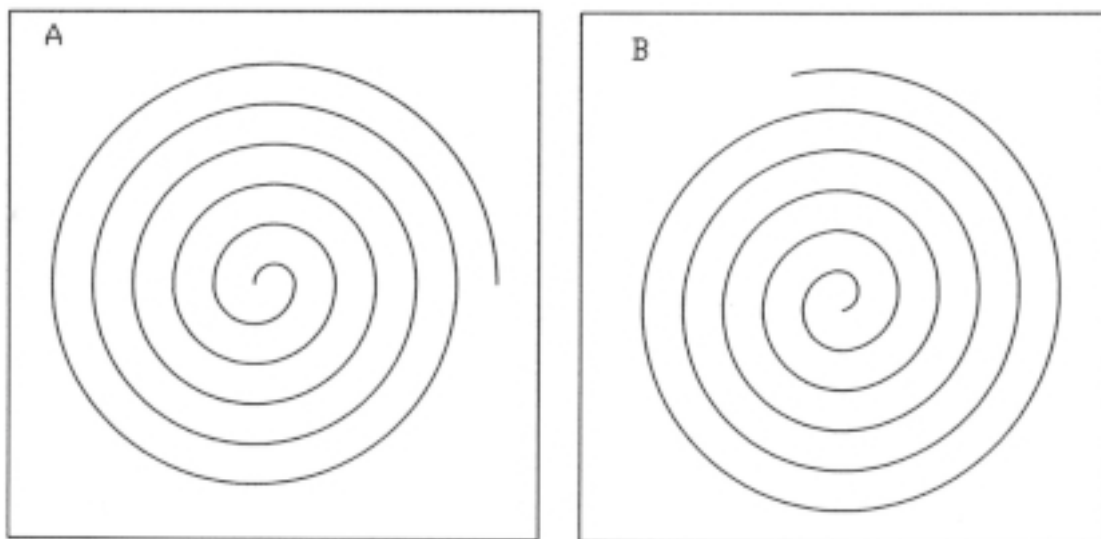
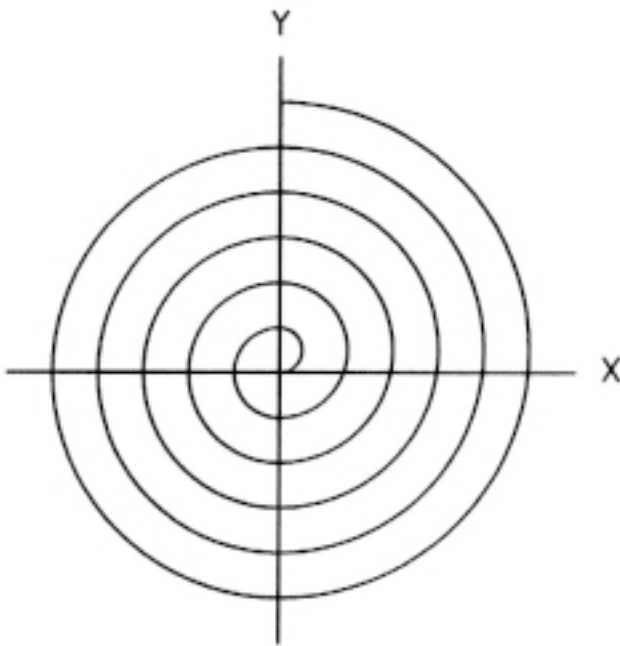


Figura 3. Tipos de espirales de acuerdo a la dirección del giro: *dextrógiro* (A) y *levógira* (B).



**Figura 4.** Sistema de referencia cartesiano adoptado para la medición de las espirales.

estándar (S), el coeficiente de variación o de dispersión de Pearson (V) y el coeficiente de uniformidad de los datos (U).

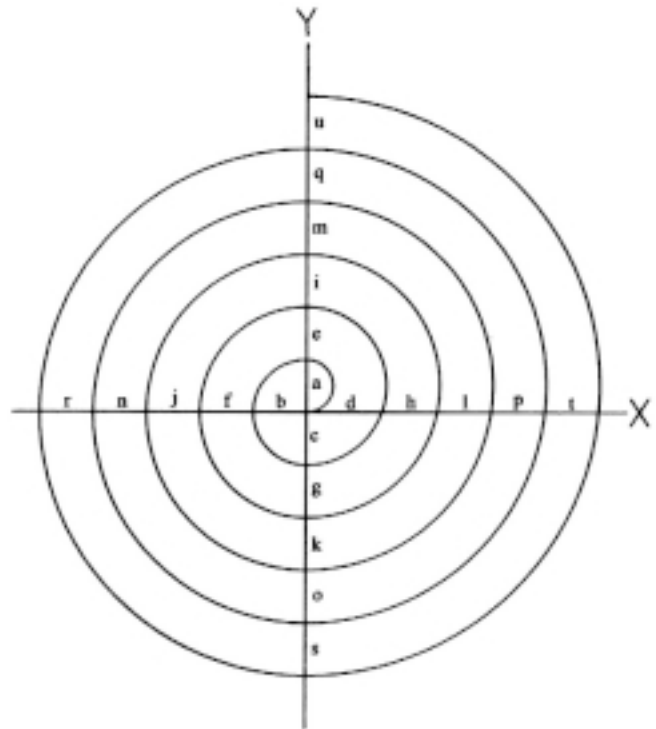
De esta información<sup>2</sup> se puede deducir que la espiral de mayor dimensión en las dos direcciones corresponde al motivo número uno, del conjunto uno, localizado en el petroglifo de Turguaico, con 32,8 centímetros de longitud en la dirección X y 35,2 centímetros en la dirección Y; mientras que la espiral más pequeña corresponde al motivo 35 del petroglifo Mantel de Piedra, que tiene una longitud de 9,10 centímetros en la dirección X y 6,75 centímetros en la dirección Y, siendo la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de 23,70 centímetros y de 28,45 centímetros en cada una de las dos direcciones, respectivamente.

En promedio, las espirales estudiadas tienen un tamaño de 20,41 centímetros en la dirección X y 20,63 centímetros en la dirección Y, siendo su desviación estándar de 6,36 y 6,45 centímetros para cada uno de los ejes ortogonales; por este motivo, la colección de datos alcanza una misma dispersión o variación promedio del 31,3 % y un grado de uniformidad del 68,8 %. Este tamaño promedio se considera pequeño y se justifica por el interés que tenían los indígenas de cubrir la superficie de la roca con la mayor cantidad

de diseños, especialmente con otras espirales. De esta manera, las volutas de mayor tamaño se han grabado como motivos aislados en alguna de las caras de la piedra.

Por otro lado, a partir del punto origen también se midieron los diferentes tramos de cada una de las espirales, los cuales se denominaron con las letras minúsculas: *a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p, q, r, s, t, u* (figura 5 y anexos 2 a 5). Los tramos *a, b, c* y *d* corresponden a la primera vuelta de la espiral; los tramos *e, f, g* y *h* a la segunda vuelta; *i, j, k* y *l* a la tercera vuelta; *m, n, o* y *p* a la cuarta vuelta; *q, r, s* y *t* a la quinta vuelta y *u* al primer tramo de la sexta vuelta.

El análisis de los datos permite determinar que la separación máxima hallada entre dos vueltas de una espiral fue de 7,90 centímetros, mientras que la menor separación fue de 1,45 centímetros; situación condicionada directamente por el tamaño total del grabado e inversamente por el número de giros de la misma. Así mismo, las espirales medidas en la zona de estudio tienen, en promedio, un tramo de 3,37 centímetros en cualquiera de las direcciones.



**Figura 5.** Tramos de la espiral medidos con un escalímetro.

<sup>2</sup> En el caso de las espirales identificadas con los número 18 y 28 en el Anexo 1, no se pudo determinar la dimensión total de la figura en ambas direcciones, debido al mal estado de conservación de los grabados rupestres.

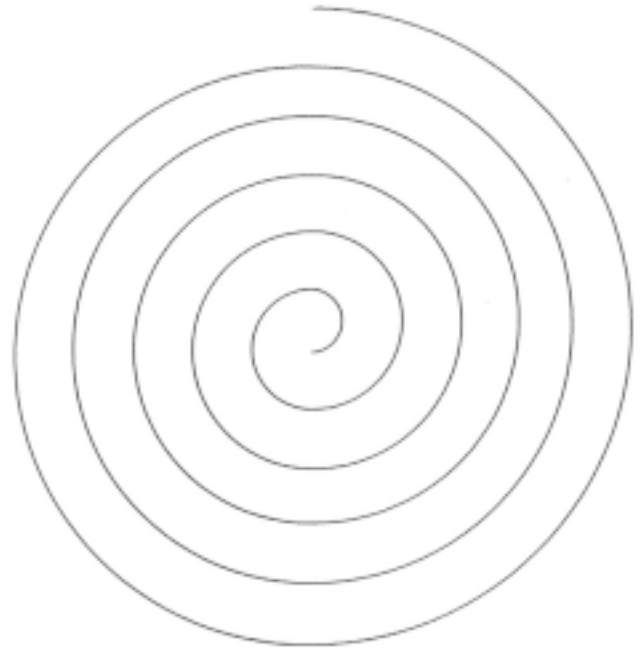
El 95,5% de las espirales analizadas tienen el giro completo correspondiente a la primera vuelta, el 84,1% poseen dos vueltas completas y cerca de la mitad de las volutas (el 56,8%) se desarrollan hasta el tramo  $k$  de la tercera vuelta, es decir, alcanzan  $2\frac{3}{4}$  vueltas. El número de espirales con tres, cuatro y cinco vueltas completas es de 20 (45,5%), 9 (20,5%) y 2 (4,5%), respectivamente. Sólo una espiral grabada en el petroglifo del Guallibamba se desarrolla hasta alcanzar el primer tramo de la sexta vuelta (Tabla 2).

**Tabla 2.** Distribución de frecuencias por vueltas y tramos de las espirales

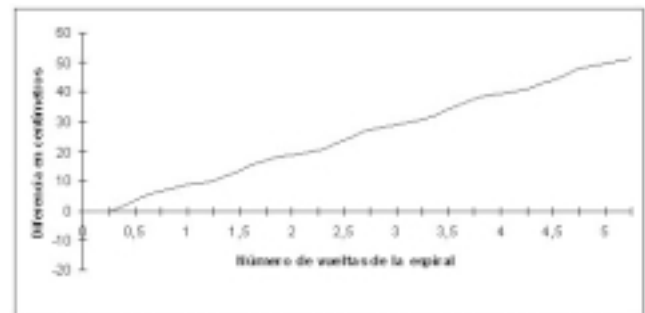
Vuelta de la espiral	Tramo	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa (%)
1	a	43	97,7
	b	43	97,7
	c	43	97,7
	d	42	95,5
2	e	42	95,5
	f	43	97,7
	g	42	95,5
	h	37	84,1
3	i	33	75,0
	j	30	68,2
	k	25	56,8
	l	20	45,5
4	m	16	36,4
	n	12	27,3
	o	11	25,0
	p	9	20,5
5	q	8	18,2
	r	5	11,4
	s	4	9,1
	t	2	4,5
6	u	1	2,3

Ahora, a partir de los promedios aritméticos obtenidos para cada tramo, se ha elaborado la Figura 6 con el apoyo del software de dibujo técnico *AutoCAD*, la cual corresponde a la espiral promedio de todos los 44 motivos considerados en este estudio.

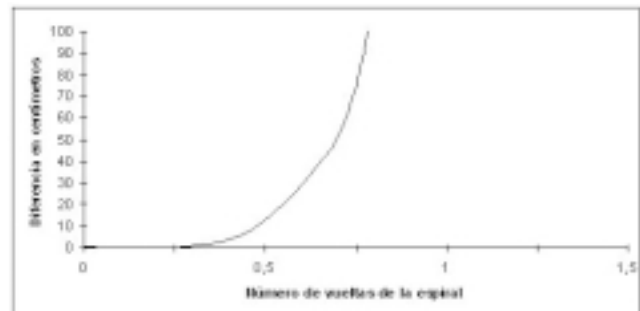
Con el propósito de determinar a qué tipo de espiral corresponde la espiral promedio mostrada en la Gráfica 6, en las Figuras 7, 8, 9 y 10 se representa la diferencia (medida en centímetros) entre los valores obtenidos para cada tramo de giro de la espiral promedio y los respectivos valores de tramo, considerando las espirales más conocidas: aritmética o de Arquímedes, logarítmica, hiperbólica y de



**Figura 6.** Espiral promedio elaborada con el software *AutoCAD* a partir de las medias aritméticas de cada uno de los tramos de los 44 motivos analizados.

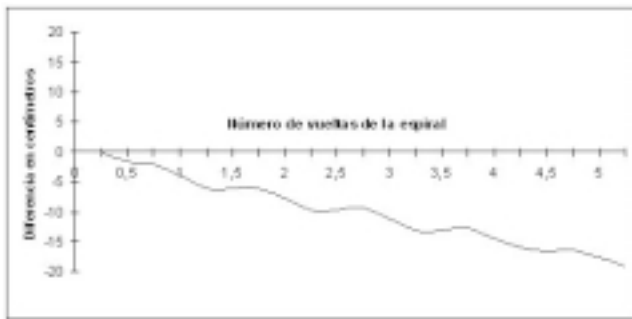


**Figura 7.** Diferencia entre la espiral aritmética y la espiral promedio.

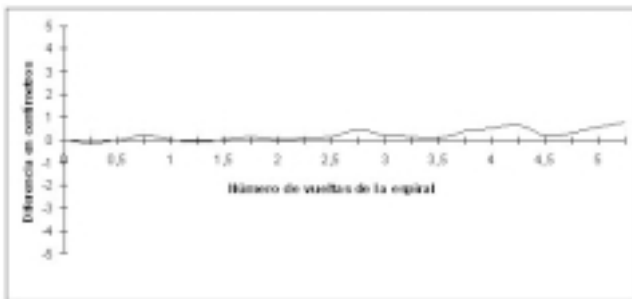


**Figura 8.** Diferencia entre la espiral logarítmica y la espiral promedio.





**Figura 9.** Diferencia entre la espiral hiperbólica y la espiral promedio.



**Figura 10.** Diferencia entre la espiral de dos centros y la espiral promedio.

dos centros. El signo positivo en el eje de las ordenadas significa que el valor del tramo de espiral calculado con expresiones matemáticas es mayor que el respectivo valor medido en las obras rupestres, mientras que el signo negativo indica lo contrario.

Es importante anotar que la espiral aritmética o de Arquímedes es aquella espiral que se caracteriza porque la relación entre el ángulo de giro y el alejamiento del centro es de tipo lineal. En coordenadas polares su ecuación viene dada por:  $r = a \cdot \theta$ , en donde  $r$  es la distancia al origen o polo,  $\theta$  el ángulo de giro y  $a$  es una constante<sup>3</sup> (Gracián, 2009).

Por otro lado, la espiral logarítmica es una curva que obedece a la ecuación:  $r = ae^{b\theta}$ , en donde  $a$  y  $b$ <sup>4</sup> son constantes,  $e$  es el número de Euler<sup>5</sup>,  $r$  es la distancia al origen o polo y  $\theta$  el ángulo de giro.

La espiral hiperbólica, también conocida con el nombre de espiral recíproca, es la inversa de la espiral de Arquímedes, por este motivo, su ecuación en coordenadas polares se expresa como:  $r = a / \theta$ , siendo  $r$  la distancia al origen o polo,  $\theta$  el ángulo de giro y  $a$ <sup>6</sup> una constante.

Finalmente, la espiral de dos centros es una curva abierta, compuesta por arcos de semicircunferencia entrelazados entre sí, que se trazan alternativamente desde cada uno de los dos centros previamente establecidos. En este sentido, en la Tabla 3 se presentan las coordenadas polares que permiten la determinación de la distancia al origen ( $r$ ) conociendo el valor del ángulo de giro ( $\theta$ ). En este caso, el valor de la constante  $a$  es de 3,37 centímetros, que corresponde al tramo promedio de las espirales grabadas en las obras rupestres.

El análisis de las Figuras 7, 8, 9 y 10 permite evidenciar la relación de la espiral promedio con la espiral de dos centros. Efectivamente, la diferencia entre los valores obtenidos con las expresiones matemáticas mostradas en la Tabla 3 y los valores medidos en los petroglifos no supera, por exceso o por defecto, de un centímetro. Las mayores diferencias se presentan en: la cuarta vuelta, con 0,52 cm; la quinta vuelta, con 0,56 cm y la 5  $\frac{1}{4}$  vuelta, con 0,72 cm. En todos los tramos de la espiral, hasta la 2  $\frac{1}{2}$  vuelta, los valores calculados y los medidos prácticamente coinciden (la máxima diferencia es de 2,2 mm, por defecto, en el primer cuarto de giro de la espiral).

No sucede lo mismo con los otros tipos de espirales considerados. En el caso de la espiral aritmética o de Arquímedes, a partir de la mitad de la primera vuelta, el valor calculado supera en 3,38 cm el valor medido en los bienes arqueológicos. Dicha diferencia se incrementa de manera proporcional a medida que aumenta el número de giros, de tal manera que en la 5  $\frac{1}{4}$  vuelta dicha discrepancia alcanza los 51,42 cm.

En la espiral logarítmica la situación es mucho más crítica, pues en la mitad de la primera vuelta la diferencia entre el valor calculado y el medido alcanza los 12,85 cm y antes de llegar a la primera vuelta la desigualdad ha superado el metro. Esto se debe a que “esta espiral es muy diferente a la de Arquímedes, por cuanto conforme va

3 En este caso,  $a = 2,15$  cm, considerando que cuando  $\theta = \pi/2$ , la distancia al origen debe ser  $r = 3.37$  cm, de acuerdo con el valor promedio medido en los petroglifos.

4 En este caso,  $b = 1$  y  $a = 0,701$  cm, considerando que cuando  $\theta = \pi/2$ , la distancia al origen debe ser  $r = 3.37$  cm, de acuerdo con el valor promedio medido en los petroglifos.

5 El valor del número de Euler ( $e$ ) se considera igual a 2, 71828182.

6 En este caso,  $a = 5,29$  cm, considerando que cuando  $\theta = \pi/2$ , la distancia al origen debe ser  $r = 3.37$  cm, de acuerdo con el valor promedio medido en los petroglifos.

**Tabla 3.** Distancia al origen para una espiral de dos centros de acuerdo con su ángulo de giro y valor teórico de cada tramo de la espiral.

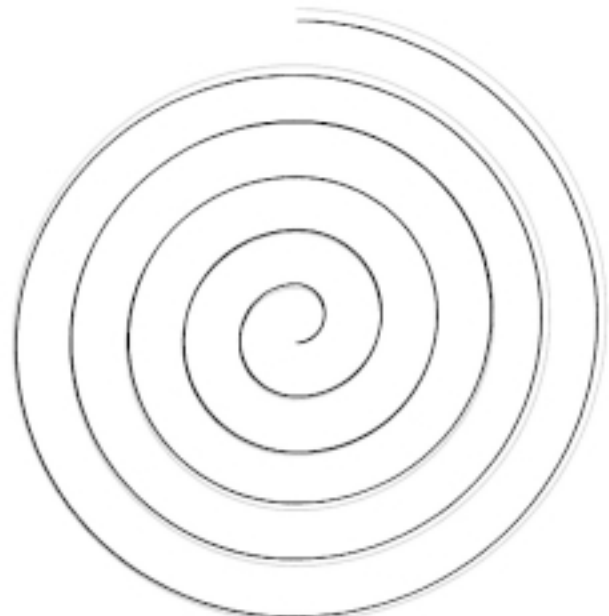
Vuelta de la espiral	Ángulo de giro $\Theta$	Distancia al origen $r$	Valor del tramo de la espiral
1	0	0	-
	$\pi/2$	a	A
	$\pi$	a	b = a
	$3\pi/2$	a	c = a
	$2\pi$	$a\sqrt{2}$	d = $a\sqrt{2}$
2	$5\pi/2$	2a	e = a
	$3\pi$	2a	f = a
	$7\pi/2$	2a	g = a
	$4\pi$	$a\sqrt{6}$	h = $a(\sqrt{6} - \sqrt{2})$
3	$9\pi/2$	3a	i = a
	$5\pi$	3a	j = a
	$11\pi/2$	3a	k = a
	$6\pi$	$2a\sqrt{3}$	l = $a(2\sqrt{3} - \sqrt{6})$
4	$13\pi/2$	4a	m = a
	$7\pi$	4a	n = a
	$15\pi/2$	4a	o = a
	$8\pi$	$2a\sqrt{5}$	p = $2a(\sqrt{5} - \sqrt{3})$
5	$17\pi/2$	5a	q = a
	$9\pi$	5a	r = a
	$19\pi/2$	5a	s = a
	$10\pi$	$a\sqrt{30}$	t = $a(\sqrt{30} - 2\sqrt{5})$
6	$21\pi/2$	6a	u = a

girando alrededor del polo, la curva se aleja de éste exponencialmente. Visualmente es una espiral que se abre muy rápidamente” (Gracián, 2009, ¶ 22).

Al contrario de lo que sucede con la espiral aritmética y la espiral logarítmica, en la espiral hiperbólica, a medida que aumenta el número de giros de la curva, los valores de los tramos calculados son cada vez más pequeños que los valores medidos, de tal manera que en la primera vuelta dicha diferencia (por defecto) es de 3,89 cm y en la quinta vuelta de 17,73 cm. Evidentemente, “esta curva se caracteriza porque comienza en una distancia infinita del polo central (cuando  $\Theta = 0$ ), y se enrolla cada vez más rápidamente mientras se aproxima al polo central” (Trejos, 2008).

El vínculo matemático entre la espiral promedio y la espiral de dos centros también se puede comprobar en la

Figura 11, en la cual se muestran las dos espirales simultáneamente para su respectiva comparación: la espiral promedio (resultado de las mediciones de campo), tiene su trazo en color negro, mientras que la espiral matemática de dos centros se ha dibujado utilizando el color gris.



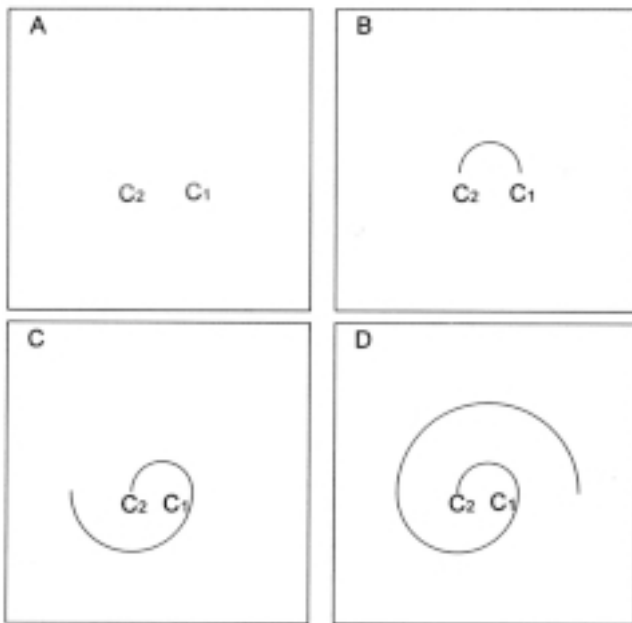
**Figura 11.** Correspondencia gráfica de la espiral promedio obtenida a partir de las mediciones realizadas en el terreno (de color negro) y la espiral de dos centros calculada matemáticamente (de color gris).

## Discusión de los resultados

A diferencia de lo que puede suceder con otro tipo de espirales, como en el caso de la espiral aritmética, logarítmica e hiperbólica, el diseño de esta figura geométrica a partir de dos centros tiene una implicación práctica muy importante que apoya la hipótesis de que los indígenas que habitaron este territorio del sur de Colombia la emplearon en el arte rupestre: la facilidad de su trazo. Evidentemente, la espiral de dos centros se puede grabar sobre las superficies de las rocas utilizando elementos conocidos por estas comunidades desde tiempo inmemoriales, como piedras con la suficiente dureza para rayar sobre los afloramientos superficiales o las paredes de roca y cuerdas elaboradas con fibras vegetales o animales, tal como se explica a continuación:

En primer lugar, se seleccionan dos centros ( $C_1$  y  $C_2$ ) ubicados sobre la superficie de la roca de acuerdo con el

ancho de tramo que se quiera obtener (Figura 12); luego, con centro en  $C_1$  se traza una semicircunferencia con un radio igual a la distancia entre  $C_1$  y  $C_2$ , ayudándose para ello de una cuerda; posteriormente, el diseñador se ubica en el centro  $C_2$  y traza la otra semicircunferencia, uniendo las dos curvas; a partir de este momento se regresa al centro  $C_1$  y el proceso se repite, siempre considerando el último punto del arco dibujado como lugar de intersección de dos trazos continuos. De esta manera, se pueden conseguir todas las vueltas de la espiral que se deseen.



**Figura 12.** Procedimiento para trazar una espiral de dos centros: A) Ubicación de los dos centros ( $C_1$  y  $C_2$ ). B) Trazo de la primera semicircunferencia desde  $C_1$  con radio igual a la distancia  $C_1$ - $C_2$ . C) Trazo de la segunda semicircunferencia desde  $C_2$  a partir del último punto del arco anterior. D) Trazo de la siguiente semicircunferencia nuevamente desde el centro  $C_1$ .

Una vez que los indígenas conseguían el *rayado* sobre la roca con el trazo general de la espiral, entonces, procedían a tallarla:

También conocidas como grabados rupestres, estas manifestaciones fueron elaboradas al sustraer material de la superficie rocosa con instrumentos de una dureza superior. Para lograrlo, el antiguo ejecutor pudo utilizar punteros de piedra u otros elementos elaborados específicamente para este fin, pero hasta ahora en Colombia no ha sido posible hallar herramientas de este tipo que se puedan asociar con algún sitio rupestre. Lo común, en cambio,

ha sido encontrar fragmentos de roca tallada (lascas) que podrían evidenciar que los instrumentos se realizaban en el mismo sitio y que no se trataba de objetos muy elaborados, pues, su vida útil era muy corta. Es posible que el instrumento utilizado se destruyera en la acción de grabar y por eso no se puede encontrar hoy en día (Martínez & Botiva, 2002, p. 12).

Mediante la arqueología experimental, la cual “permite conocer la manera en que un objeto fue producido mediante el análisis de sus rasgos y la imitación de procedimientos e instrumentos similares a los empleados en la antigüedad” (Velásquez, 2006, p. 44), en la Figura 13 se muestra un ejemplo del trazo de una espiral de dos centros aplicando el procedimiento antes señalado, en donde se puede apreciar el enorme parecido de este diseño con los grabados precolombinos frecuentes en los Andes de Nariño.

### Conclusiones

La investigación permitió determinar que las figuras geométricas son las que se presentan con mayor frecuencia en las obras rupestres de la zona noroccidental del Municipio de Pasto, con el 72,3% del total de los motivos, lo que coincide con lo que los arqueólogos han encontrado en otras manifestaciones culturales de los Andes de Nariño, como la cerámica, la orfebrería y los tejidos. De este tipo de diseños geométricos el más representativo desde el punto de vista estadístico es la espiral, con el 58,4 %. Es importante resaltar que de acuerdo con Marriner “la espiral es un motivo común en el arte rupestre colombiano” (2008, ¶ 71) y que dicha representación se ha encontrado en la mayoría de los países y culturas a lo largo del mundo (Trejos, 2008; Marriner, 2008).

Por otro lado, en esta investigación se pudo comprobar por primera vez en el estudio del arte rupestre regional, que el diseño de la espiral corresponde matemáticamente a la figura geométrica de la espiral de dos centros, la cual fue empleada por los indígenas por su relativa facilidad de trazo sobre la superficie de las piedras, a diferencia de lo que ocurre con otro tipo de espirales. A su vez, la Estadística permite determinar que la espiral característica de esta región tiene, en promedio, un tamaño de 20,5 centímetros en cualquiera de los ejes ortogonales y un ancho de tramo de 3,37 centímetros en cualquiera de las direcciones. También se resalta que el 56,8% de las volutas se desarrollan hasta alcanzar cerca de 3 vueltas completas.

Este hallazgo se constituye en una evidencia que permite reconocer la existencia de patrones en el trazo de este tipo de motivos, como una clara señal de un desarrollo de

nociones de geometría en la mente de sus diseñadores, contradiciendo aquella concepción equivocada de algunos autores de arte rupestre sobre el atraso cultural de los pueblos que encontraron los primeros europeos que arribaron a este territorio en el siglo XVI, tradición legada principalmente a través del testimonio de los cronistas españoles como **Pedro de Cieza de León** (1962).

En efecto, según **Plasencia** el dibujo de una figura geométrica, como una espiral, es una concretización de ideas o conceptos matemáticos; es decir, una representación externa de una imagen interna que se ha formado en la mente de una persona debido a sus estructuras cognitivas: “las representaciones externas aparecen en escena cuando queremos comunicar las ideas matemáticas que hemos construido o estamos construyendo” (2000, p. 27-28).

La arqueóloga Leticia González (citada por **Mendiola**, 2002) expresa que los petroglifos se presentan como imágenes visuales, es decir, como comunicación visual que expresa los intereses de quienes los crearon desde una perspectiva gráfico visual en la cual: “1. Las figuras son la representación de un sistema estandarizado de expresiones visuales, 2. Dispuestas bajo ciertas convenciones y no como producto del azar, 3. Las figuras seleccionadas y su distribución responden a una lógica, representando unas figuras, repitiendo unas y otras no, y 4. Reflejando en su conjunto un sistema cognoscitivo” (**Mendiola**, 2002, ¶ 40).

Más aún, desde la Etnomatemática, la recurrencia del motivo de la espiral en el arte rupestre de Nariño apoya al planteamiento que sostiene que el conocimiento matemá-



**Figura 13.** Comprobación del trazo de una espiral de dos centros sobre una superficie similar a las superficies pétreas en donde se han hallado los grabados indígenas.

tico es un producto cultural (**Gómez-Granell**, 1989; **Rosa & Orey**, 2005), es decir, que se origina en contextos de interrelación social, los cuales han acompañado a la humanidad desde la prehistoria hasta la actualidad:

Nosotros concluimos que matemáticos, científicos e ingenieros no son los únicos que usan y construyen conocimiento matemático. Este conocimiento ha sido alcanzado por procesos diferentes, común a todos los grupos socio-culturales que hacen posible la elaboración y el uso de habilidades matemáticas, que incluyen contar, localizar, medir, dibujar, representar, jugar, entender, comprender y explicar las necesidades e intereses de diversos grupos e individuos (**Rosa**, 2008, p. 109).

### Bibliografía

- Albis, V. S.** 1987. Las proporciones del Sol de los Pastos. Boletín de Matemáticas de la Universidad Nacional de Colombia, **21**(2-3): p. 110-134.
- Cabrera, W.** 1966. Pictógrafos y petroglifos de Nariño. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, **12**(48): 391-400.
- Closs, M. (Ed.)** 1986. Native American Mathematics. Austin: University of Texas Press.
- Cieza, P.** 1962 [1553]. La crónica del Perú. Madrid: Espasa-Calpe.
- D'Ambrosio, U.** 1999. La transferencia del conocimiento matemático a las colonias: factores sociales, políticos y culturales. Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas, **22**(44): 347-380.
- D'Amore, B.** 2003. Matemática en algunas culturas suramericanas: una contribución a la Etnomatemática. Revista Latinoamericana de Investigación en Matemática Educativa, **6**(3): 279-291.
- Gómez-Granell, C.** 1989. La adquisición del lenguaje matemático: un difícil equilibrio entre el rigor y el significado. Revista Comunicación, Lenguaje y Educación, **3**(4): 5-15.
- Gracián, E.** 2009. Espirales. *Blog de Sangakoo: matemáticas desde el otro lado*. Recuperado el 15 de abril de 2010, de <http://blog.sangakoo.com/divulgacion/ espirales/>
- Granda, O.** 1983. Arte rupestre Pasto y Quillacinga. Pasto: Sindamanoy.
- Groot, A. & Hooykas, E.** 1991. Intento de delimitación del territorio de los grupos étnicos Pastos y Quillacingas en el altiplano nariñense. Santafé de Bogotá: Fundación de Investigaciones Arqueológicas Nacionales.
- Higuera, C. L.** 2008. Concepción matemática indígena en la Amazonía colombiana. Revista Latinoamericana de Etnomatemática, **1**(1): 12-20.
- Marriner, H. A.** 2008. The colombian rock art spiral: A shamanic tunnel? *Rupestreweb*. Recuperado el 18 de diciembre de 2009, de <http://www.rupestreweb.info/espiral.html>



- Martínez, D. & Botiva, A.** 2002. Manual de arte rupestre de Cundinamarca. Bogotá: Instituto Colombiano de Antropología e Historia ICANH.
- Mejía, J.** 1934. Ensayo sobre prehistoria nariñesa. Pasto: Imprenta de la Diócesis de Pasto.
- Mendiola, F.** (2002, 6 de mayo). Arte rupestre: epistemología, estética y geometría. Sus interrelaciones con la simetría de la cultura. Ensayo de explicación sobre algunas ideas centrales de Adolfo Best Maugard y Beatriz Braniff. *Rupestreweb*. Recuperado el 17 de diciembre de 2009, de <http://rupestreweb.tripod.com/mendiola2.html>
- Ortiz-Franco, L.** 2004. Prolegómenos a las etnomatemáticas en Mesoamérica. *Revista Latinoamericana de Investigación en Matemática Educativa*, 7(2): 171-185.
- Plasencia, I. C.** 2000. Análisis del papel de las imágenes en la actividad matemática: un estudio de casos. Tesis para optar al título de Doctor en Ciencias Matemáticas, Departamento de Análisis Matemático de la Universidad de La Laguna, La Laguna, España.
- Restrepo, V.** 1972. Los chibchas antes de la conquista española. Bogotá: Imprenta Banco Popular.
- Rodríguez, E.** 1992. Fauna precolombina de Nariño. Santafé de Bogotá: Fundación de Investigaciones Arqueológicas Nacionales.
- Rosa, M.** 2008. A dialogue with Ubiratan D'Ambrosio: a brazilian conversation about ethnomathematics. *Revista Latinoamericana de Etnomatemática*, 1(2): 88-110.
- . & **Orey, D. C.** 2005. Las raíces históricas del programa Etnomatemáticas. *Revista Latinoamericana de Investigación en Matemática Educativa*, 8(3): 363-377.
- Trejos, H. E.** 2008. Espirales y homotecias: ¿autonomía o capricho de la forma? *Rupestreweb*. Recuperado el 18 de diciembre de 2009, de <http://www.rupestreweb.info/espiales.htm>
- Velásquez, A.** 2006. Producción de objetos de concha en el Templo Mayor: Arqueología experimental. *Revista Arqueología Mexicana*, 14(18): 44-48.

Recibido: agosto 28 de 2009.

Aceptado para su publicación: diciembre 18 de 2009.

**Anexo 1.** Tamaño de las espirales en las dos direcciones perpendiculares X,Y.

No.	Petroglifo	Conjunto	Motivo	Tamaño en cm	
				Lx	Ly
1	Guallibamba	1	1	30,10	31,80
2	Guallibamba	1	2	31,25	33,70
3	Edén I	1	2	26,10	25,50
4	Edén I	1	3	31,30	27,40
5	Edén II	1	1	19,95	18,45
6	Edén II	1	2	15,05	13,30
7	Edén II	1	3	13,20	15,15
8	Chasquisca	1	1	18,15	15,40
9	Turguaico	1	1	32,80	35,20
10	Turguaico	1	2	20,05	19,75
11	Tomates	1	2	26,70	27,00
12	Tomates	1	3	21,15	17,10
13	Tomates	1	4	14,85	16,10
14	Tomates	2	1	27,15	29,20
15	Tomates	3	1	19,95	21,00
16	Tomates	3	2	14,85	12,40
17	Mantel de Piedra	1	1	26,80	26,35
18	Mantel de Piedra	1	2	-	-
19	Mantel de Piedra	1	3	15,95	15,40
20	Mantel de Piedra	1	4	20,50	22,60
21	Mantel de Piedra	1	5	13,95	17,20
22	Mantel de Piedra	1	6	20,85	22,55
23	Mantel de Piedra	1	7	25,35	23,70
24	Mantel de Piedra	1	9	11,20	13,80
25	Mantel de Piedra	1	12	23,80	26,25
26	Mantel de Piedra	1	13	13,55	17,05
27	Mantel de Piedra	1	14	11,05	14,35
28	Mantel de Piedra	1	15	-	-
29	Mantel de Piedra	1	18	14,50	16,00
30	Mantel de Piedra	1	19	26,05	24,75
31	Mantel de Piedra	1	20	29,15	30,40
32	Mantel de Piedra	1	21	26,45	29,05
33	Mantel de Piedra	1	22	18,90	17,45
34	Mantel de Piedra	1	25	18,85	17,30
35	Mantel de Piedra	1	26	18,75	17,85
36	Mantel de Piedra	1	27	19,75	20,20
37	Mantel de Piedra	1	30	12,45	14,80
38	Mantel de Piedra	1	31	17,75	16,50
39	Mantel de Piedra	1	32	21,00	18,50
40	Mantel de Piedra	1	35	9,10	6,75
41	Mantel de Piedra	1	36	25,20	22,95
42	Mantel de Piedra	1	37	9,60	11,65
43	Mantel de Piedra	1	38	25,25	21,05
44	Mantel de Piedra	1	39	18,85	23,75
Total de datos (n):				42	42
Mayor valor (L máx.):				32,80	35,20
Menor valor (L mín.):				9,10	6,75
Rango (R):				23,70	28,45
Media aritmética (m):				20,41	20,63
Desviación estándar (S):				6,36	6,45
Coeficiente de dispersión (V) en %:				31,2	31,3
Coeficiente de uniformidad (U) en %:				68,8	68,7

## Anexo 2. Medición de los tramos a, e, i, m, q, u de las espirales analizadas.

No.	Petroglifo	Conjunto	Motivo	Tramo en centímetros					
				a	e	i	m	q	u
1	Guallibamba	1	1	2,85	2,35	2,65	2,70	2,85	3,30
2	Guallibamba	1	2	4,60	2,50	3,85	4,85	3,45	-
3	Edén I	1	2	3,05	2,85	3,00	2,55	1,60	-
4	Edén I	1	3	2,90	2,55	2,55	1,95	2,55	-
5	Edén II	1	1	3,40	2,75	2,75	-	-	-
6	Edén II	1	2	3,25	2,40	2,80	-	-	-
7	Edén II	1	3	3,15	2,15	2,60	-	-	-
8	Chasquisca	1	1	2,75	2,50	2,85	-	-	-
9	Turgaico	1	1	4,70	3,55	4,25	4,55	3,10	-
10	Turgaico	1	2	4,65	3,70	3,15	-	-	-
11	Tomates	1	2	3,80	3,00	2,80	3,65	-	-
12	Tomates	1	3	4,45	3,60	-	-	-	-
13	Tomates	1	4	3,25	2,80	3,20	-	-	-
14	Tomates	2	1	5,05	4,00	3,80	5,00	-	-
15	Tomates	3	1	2,60	3,05	3,05	3,65	-	-
16	Tomates	3	2	3,65	2,70	-	-	-	-
17	Mantel de Piedra	1	1	3,70	3,45	4,15	3,95	-	-
18	Mantel de Piedra	1	2	4,40	-	-	-	-	-
19	Mantel de Piedra	1	3	3,00	2,15	2,55	-	-	-
20	Mantel de Piedra	1	4	3,50	2,80	3,10	3,50	-	-
21	Mantel de Piedra	1	5	2,90	4,10	4,30	-	-	-
22	Mantel de Piedra	1	6	3,50	3,30	2,50	2,60	-	-
23	Mantel de Piedra	1	7	2,65	3,00	2,70	2,00	2,65	-
24	Mantel de Piedra	1	9	2,35	3,15	3,15	-	-	-
25	Mantel de Piedra	1	12	4,15	4,70	4,90	-	-	-
26	Mantel de Piedra	1	13	5,00	4,40	-	-	-	-
27	Mantel de Piedra	1	14	4,25	2,75	-	-	-	-
28	Mantel de Piedra	1	15	-	-	-	-	-	-
29	Mantel de Piedra	1	18	3,40	3,10	3,00	-	-	-
30	Mantel de Piedra	1	19	1,75	2,10	2,60	2,90	3,55	-
31	Mantel de Piedra	1	20	3,25	3,75	2,40	2,70	2,70	-
32	Mantel de Piedra	1	21	3,35	3,30	3,70	4,55	-	-
33	Mantel de Piedra	1	22	3,80	3,95	-	-	-	-
34	Mantel de Piedra	1	25	2,70	3,10	4,25	-	-	-
35	Mantel de Piedra	1	26	4,05	3,45	3,70	-	-	-
36	Mantel de Piedra	1	27	6,00	4,60	-	-	-	-
37	Mantel de Piedra	1	30	3,40	3,95	-	-	-	-
38	Mantel de Piedra	1	31	1,45	2,00	1,95	2,40	-	-
39	Mantel de Piedra	1	32	2,05	3,50	2,70	-	-	-
40	Mantel de Piedra	1	35	2,00	2,75	-	-	-	-
41	Mantel de Piedra	1	36	5,95	3,95	4,30	-	-	-
42	Mantel de Piedra	1	37	1,90	4,35	-	-	-	-
43	Mantel de Piedra	1	38	5,60	3,95	3,15	-	-	-
44	Mantel de Piedra	1	39	6,10	5,45	3,00	-	-	-
Total de datos (n):				43	42	33	16	8	1
Mayor valor (L máx.):				6,10	5,45	4,90	5,00	3,55	3,30
Menor valor (L mín.):				1,45	2,00	1,95	1,95	1,60	3,30
Rango (R):				4,65	3,45	2,95	3,05	1,95	0,00
Media aritmética (m):				3,59	3,27	3,19	3,34	2,81	3,30
Desviación estándar (S):				1,13	0,78	0,69	0,98	0,57	-
Coeficiente de dispersión (V) en %:				31,6	23,9	21,5	29,3	20,4	-
Coeficiente de uniformidad (U) en %:				68,4	76,1	78,5	70,7	79,6	-

Anexo 3. Medición de los tramos b, f, j, n, r de las espirales analizadas.

No.	Petroglifo	Conjunto	Motivo	Tramo en centímetros				
				b	f	j	n	r
1	Guallibamba	1	1	2,55	2,75	2,60	3,10	3,70
2	Guallibamba	1	2	2,90	2,80	4,20	3,90	-
3	Edén I	1	2	3,55	3,75	3,00	3,05	-
4	Edén I	1	3	2,95	3,40	2,35	2,75	2,45
5	Edén II	1	1	3,00	3,20	2,40	-	-
6	Edén II	1	2	2,95	2,80	2,50	-	-
7	Edén II	1	3	2,20	2,40	2,40	-	-
8	Chasquisca	1	1	2,15	3,00	3,05	-	-
9	Turguaico	1	1	4,00	3,80	4,00	3,85	-
10	Turguaico	1	2	3,85	3,80	3,05	-	-
11	Tomates	1	2	3,60	3,40	4,25	4,60	-
12	Tomates	1	3	5,20	4,10	-	-	-
13	Tomates	1	4	4,35	3,35	-	-	-
14	Tomates	2	1	4,60	4,55	4,30	-	-
15	Tomates	3	1	2,20	2,85	3,10	-	-
16	Tomates	3	2	3,85	3,10	-	-	-
17	Mantel de Piedra	1	1	4,00	3,45	4,00	-	-
18	Mantel de Piedra	1	2	5,20	2,75	3,20	3,90	-
19	Mantel de Piedra	1	3	3,30	2,80	2,95	-	-
20	Mantel de Piedra	1	4	2,50	3,20	3,60	-	-
21	Mantel de Piedra	1	5	2,50	3,45	-	-	-
22	Mantel de Piedra	1	6	3,50	3,90	3,10	-	-
23	Mantel de Piedra	1	7	2,55	2,75	2,25	2,95	3,15
24	Mantel de Piedra	1	9	2,55	2,80	-	-	-
25	Mantel de Piedra	1	12	5,10	4,00	4,20	-	-
26	Mantel de Piedra	1	13	4,35	3,40	-	-	-
27	Mantel de Piedra	1	14	2,65	4,85	-	-	-
28	Mantel de Piedra	1	15	-	-	-	-	-
29	Mantel de Piedra	1	18	2,20	4,55	-	-	-
30	Mantel de Piedra	1	19	1,70	2,55	2,95	3,40	3,85
31	Mantel de Piedra	1	20	2,75	2,95	2,65	2,80	3,20
32	Mantel de Piedra	1	21	3,20	3,45	4,40	3,60	-
33	Mantel de Piedra	1	22	4,05	3,40	2,85	-	-
34	Mantel de Piedra	1	25	2,55	2,75	4,50	-	-
35	Mantel de Piedra	1	26	2,95	3,05	3,85	-	-
36	Mantel de Piedra	1	27	5,10	4,00	-	-	-
37	Mantel de Piedra	1	30	3,90	3,85	-	-	-
38	Mantel de Piedra	1	31	1,65	1,85	2,05	3,05	-
39	Mantel de Piedra	1	32	3,45	2,60	3,50	-	-
40	Mantel de Piedra	1	35	2,00	3,60	-	-	-
41	Mantel de Piedra	1	36	5,05	4,00	4,00	-	-
42	Mantel de Piedra	1	37	2,35	2,95	-	-	-
43	Mantel de Piedra	1	38	5,40	3,60	3,65	-	-
44	Mantel de Piedra	1	39	4,30	4,40	-	-	-
Total de datos (n):				43	43	30	12	5
Mayor valor (L máx.):				5,40	4,85	4,50	4,60	3,85
Menor valor (L mín.):				1,65	1,85	2,05	2,75	2,45
Rango (R):				3,75	3,00	2,45	1,85	1,40
Media aritmética (m):				3,37	3,35	3,30	3,41	3,27
Desviación estándar (S):				1,04	0,63	0,72	0,54	0,49
Coeficiente de dispersión (V) en %:				30,8	18,9	21,9	15,8	15,1
Coeficiente de uniformidad (U) en %:				69,2	81,1	78,1	84,2	84,9



## Anexo 4. Medición de los tramos c, g, k, o, s de las espirales analizadas.

No.	Petroglifo	Conjunto	Motivo	Tramo en centímetros				
				b	f	j	n	r
1	Guallibamba	1	1	2,90	2,65	2,75	3,20	3,60
2	Guallibamba	1	2	2,55	3,25	5,25	3,40	-
3	Edén I	1	2	2,75	2,55	2,95	4,20	-
4	Edén I	1	3	2,50	2,85	3,00	3,10	3,45
5	Edén II	1	1	2,85	3,45	3,25	-	-
6	Edén II	1	2	2,15	2,70	-	-	-
7	Edén II	1	3	1,85	2,75	2,65	-	-
8	Chasquisca	1	1	2,00	2,80	2,50	-	-
9	Turgaico	1	1	3,60	3,40	3,25	4,80	-
10	Turgaico	1	2	3,20	2,80	2,25	-	-
11	Tomates	1	2	3,10	3,25	3,50	3,90	-
12	Tomates	1	3	4,95	4,10	-	-	-
13	Tomates	1	4	3,15	3,70	-	-	-
14	Tomates	2	1	3,80	3,85	3,70	-	-
15	Tomates	3	1	2,70	2,55	3,40	-	-
16	Tomates	3	2	3,15	2,90	-	-	-
17	Mantel de Piedra	1	1	4,00	3,50	3,60	-	-
18	Mantel de Piedra	1	2	5,20	3,20	3,25	-	-
19	Mantel de Piedra	1	3	2,70	2,75	2,25	-	-
20	Mantel de Piedra	1	4	2,60	3,35	3,75	-	-
21	Mantel de Piedra	1	5	2,30	3,60	-	-	-
22	Mantel de Piedra	1	6	2,75	3,85	4,05	-	-
23	Mantel de Piedra	1	7	2,60	3,65	2,25	2,20	-
24	Mantel de Piedra	1	9	2,00	3,15	-	-	-
25	Mantel de Piedra	1	12	5,05	4,60	2,85	-	-
26	Mantel de Piedra	1	13	7,65	-	-	-	-
27	Mantel de Piedra	1	14	2,00	5,35	-	-	-
28	Mantel de Piedra	1	15	-	2,40	-	-	-
29	Mantel de Piedra	1	18	2,50	4,00	-	-	-
30	Mantel de Piedra	1	19	2,25	2,15	2,50	2,45	2,50
31	Mantel de Piedra	1	20	3,05	2,40	2,70	3,05	4,40
32	Mantel de Piedra	1	21	2,80	3,90	3,85	3,60	-
33	Mantel de Piedra	1	22	4,25	3,15	2,30	-	-
34	Mantel de Piedra	1	25	2,75	4,50	-	-	-
35	Mantel de Piedra	1	26	3,20	3,45	-	-	-
36	Mantel de Piedra	1	27	4,90	4,70	-	-	-
37	Mantel de Piedra	1	30	3,45	4,00	-	-	-
38	Mantel de Piedra	1	31	1,50	1,75	2,05	3,40	-
39	Mantel de Piedra	1	32	3,00	4,20	3,05	-	-
40	Mantel de Piedra	1	35	2,00	-	-	-	-
41	Mantel de Piedra	1	36	4,15	4,60	-	-	-
42	Mantel de Piedra	1	37	2,45	2,95	-	-	-
43	Mantel de Piedra	1	38	5,10	3,25	-	-	-
44	Mantel de Piedra	1	39	5,30	3,90	-	-	-
Total de datos (n):				43	42	25	11	4
Mayor valor (L máx.):				7,65	5,35	5,25	4,80	4,40
Menor valor (L mín.):				1,50	1,75	2,05	2,20	2,50
Rango (R):				6,15	3,60	3,20	2,60	1,90
Media aritmética (m):				3,23	3,38	3,08	3,39	3,49
Desviación estándar (S):				1,20	0,75	0,71	0,71	0,67
Coeficiente de dispersión (V) en %:				37,2	22,3	23,1	20,8	19,4
Coeficiente de uniformidad (U) en %:				62,8	77,7	76,9	79,2	80,6

Anexo 5. Medición de los tramos d, h, l, p, t de las espirales analizadas.

No.	Petroglifo	Conjunto	Motivo	Tramo en centímetros				
				b	f	j	n	r
1	Guallibamba	1	1	3,75	2,35	3,20	3,10	3,00
2	Guallibamba	1	2	4,75	4,05	4,65	4,00	-
3	Edén I	1	2	3,50	3,45	2,90	2,90	-
4	Edén I	1	3	4,00	2,80	2,70	4,20	3,70
5	Edén II	1	1	4,45	3,85	3,05	-	-
6	Edén II	1	2	3,70	3,10	-	-	-
7	Edén II	1	3	3,90	2,30	-	-	-
8	Chasquisca	1	1	3,55	3,70	2,70	-	-
9	Turguaico	1	1	7,20	4,00	3,60	2,35	-
10	Turguaico	1	2	4,60	2,30	2,45	-	-
11	Tomates	1	2	4,55	2,95	3,35	-	-
12	Tomates	1	3	6,50	5,35	-	-	-
13	Tomates	1	4	3,65	3,50	-	-	-
14	Tomates	2	1	5,80	3,70	4,20	-	-
15	Tomates	3	1	4,85	3,90	3,05	-	-
16	Tomates	3	2	4,80	3,10	-	-	-
17	Mantel de Piedra	1	1	6,40	4,20	4,75	-	-
18	Mantel de Piedra	1	2	-	-	-	-	-
19	Mantel de Piedra	1	3	4,10	2,80	-	-	-
20	Mantel de Piedra	1	4	4,50	3,35	3,35	-	-
21	Mantel de Piedra	1	5	4,25	3,75	-	-	-
22	Mantel de Piedra	1	6	4,10	3,15	3,10	-	-
23	Mantel de Piedra	1	7	3,90	3,45	2,30	2,05	-
24	Mantel de Piedra	1	9	2,90	2,95	-	-	-
25	Mantel de Piedra	1	12	6,60	3,90	-	-	-
26	Mantel de Piedra	1	13	5,80	-	-	-	-
27	Mantel de Piedra	1	14	3,55	-	-	-	-
28	Mantel de Piedra	1	15	-	-	-	-	-
29	Mantel de Piedra	1	18	4,50	3,25	-	-	-
30	Mantel de Piedra	1	19	3,25	2,25	3,25	2,85	-
31	Mantel de Piedra	1	20	5,10	3,65	2,85	3,20	-
32	Mantel de Piedra	1	21	4,30	3,50	4,00	-	-
33	Mantel de Piedra	1	22	5,20	3,40	-	-	-
34	Mantel de Piedra	1	25	4,75	4,30	-	-	-
35	Mantel de Piedra	1	26	5,00	3,90	-	-	-
36	Mantel de Piedra	1	27	7,30	3,35	-	-	-
37	Mantel de Piedra	1	30	4,70	-	-	-	-
38	Mantel de Piedra	1	31	2,30	1,65	2,30	2,90	-
39	Mantel de Piedra	1	32	4,40	3,65	3,40	-	-
40	Mantel de Piedra	1	35	3,50	-	-	-	-
41	Mantel de Piedra	1	36	6,80	5,35	-	-	-
42	Mantel de Piedra	1	37	4,30	-	-	-	-
43	Mantel de Piedra	1	38	7,90	4,70	-	-	-
44	Mantel de Piedra	1	39	5,50	4,65	-	-	-
Total de datos (n):				42	37	20	9	2
Mayor valor (L máx.):				7,90	5,35	4,75	4,20	3,70
Menor valor (L mín.):				2,30	1,65	2,30	2,05	3,00
Rango (R):				5,60	3,70	2,45	2,15	0,70
Media aritmética (m):				4,73	3,50	3,26	3,06	3,35
Desviación estándar (S):				1,23	0,80	0,68	0,65	0,35
Coeficiente de dispersión (V) en %:				26,1	22,7	20,9	21,3	10,4
Coeficiente de uniformidad (U) en %:				73,9	77,3	79,1	78,7	89,6

# A UNIQUE CONTINUATION RESULT FOR A GENERALIZED KDV TYPE EQUATION WITH VARIABLE COEFFICIENTS

By

Alex Montes<sup>1</sup> & José Raúl Quintero<sup>2</sup>

## Abstract

**Montes, A. & J. R. Quintero:** A unique continuation result for a generalized KDV type equation with variable coefficients. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **34** (130): 71-88, 2010. ISSN 0370-3908.

In this paper we establish a unique continuation result for a generalized KdV type equation with variable coefficients of the form

$$u_t + \gamma \partial_x^3 u + k r_1(x, t) u^{k-1} \partial_x u + r_2(x, t) \partial_x u + r_3(x, t) u = 0, \quad (k \geq 2)$$

in the following sense. If  $u$  is a sufficiently smooth solution such that  $\text{supp } u(x, t) \subseteq [-B, B] \times [-T, T]$ , then  $u$  must be necessarily the zero solution, assuming some decay in the Fourier transform of the coefficients  $r_i(x, t)$  with respect to the spatial variable. The result follows by adapting and extending the techniques developed by **J. Bourgain** in [1], used to obtain a unique continuation result for a generalized KdV type equation (constant coefficient case).

**Key words:** KdV type equation with variable coefficients, unique continuation.

## Resumen

En este trabajo establecemos un resultado de continuación única para la ecuación del tipo KdV generalizada

$$u_t + \gamma \partial_x^3 u + k r_1(x, t) u^{k-1} \partial_x u + r_2(x, t) \partial_x u + r_3(x, t) u = 0, \quad (k \geq 2)$$

en el siguiente sentido. Si  $u$  una solución suficientemente suave tal que  $\text{supp } u(x, t) \subseteq [-B, B] \times [-T, T]$ , entonces  $u$  necesariamente debe ser cero, bajo la suposición de que la transformada de Fourier de los coeficientes  $r_i(x, t)$  tiene algún tipo de decaimiento con respecto a la variable  $x$ . El resultado es obtenido adaptando y extendiendo las técnicas desarrolladas por **J. Bourgain** en [1], utilizadas para obtener el resultado de continuación única para la ecuación generalizada KdV (coeficientes constantes).

**Palabras clave:** Ecuaciones de tipo KdV con coeficientes variables, continuación única.

<sup>1</sup> Departamento de Matemáticas, Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. Correo electrónico: amontes@unicauca.edu.co

<sup>2</sup> Departamento de Matemáticas, Universidad del Valle. A.A. 25360. Cali, Colombia. Correo electrónico: quinthen@univalle.edu.co 2000  
AMS Mathematics Subject Classification: 35Q35, 35B60.

## 1. Introduction

In a recent work, **Jean Bourgain** in [1] proved that solutions  $u$  sufficiently smooth with  $\text{supp } u(x, t) \subseteq [-B, B] \times [-T, T]$  of the generalized Korteweg–De Vries type equation

$$u_t + \partial_x^3 u + \partial_x F(u) = 0 \quad \text{en } \mathbb{R}^{1+1}, \quad (\text{FKdV})$$

with  $F$  being a real polynomial, must be trivial ( $u \equiv 0$  in  $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$ ).

In order to have an insight into **Bourgain's** proof, we want to point out that the main idea is to take advantage of two facts: 1.- The Fourier transform with respect to the spatial variable  $x$  of a continuous real function  $u(t)(x) = u(x, t)$  defined in  $\mathbb{R} \times [-T, T]$  having

$$\text{supp } u(t)(\cdot) \subseteq [-B, B], \quad \text{for } t \in [-T, T]$$

can be extended to  $\mathbb{C} \times [-T, T]$ , having exponential order.

2. The derivative of entire functions having exponential order and being bounded in the real axis can be some how controlled. These facts are evident in the following complex analysis results.

**Theorem 1.1.** [Paley-Wiener Theorem] *Let  $u(t)(x) = u(x, t)$  be a continuous real function defined in  $\mathbb{R} \times [-T, T]$  such that*

$$\text{supp } u(t)(\cdot) \subseteq [-B, B], \quad \text{for all } t \in I = [-T, T].$$

*Then, the Fourier transform of  $u(t)$  with respect to the spatial variable  $x$ ,*

$$\widehat{u(t)}(\lambda) = \int_{\mathbb{R}} e^{-i\lambda x} u(t)(x) dx,$$

*has a unique analytic extension to  $\mathbb{C}$ . Moreover, the extension has exponential order. In other words, there is a positive constant  $k > 0$  such that for  $t \in I$ ,*

$$|\widehat{u(t)}(\lambda + i\sigma)| \leq k e^{|\sigma|B}, \quad \lambda, \sigma \in \mathbb{R}. \quad (1)$$

**Theorem 1.2.** *Let  $\phi : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$  be an entire function such that*

$$|\phi(\lambda + i\sigma)| \leq \kappa e^{|\sigma|B}, \quad \lambda, \sigma \in \mathbb{R}. \quad (2)$$

*Then there is  $\mu > 0$  such that for any  $\lambda_1 > 0$ ,*

$$|\phi'(\lambda_1)| \leq \mu B \left( \sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\phi(\xi)| \right) \left[ 1 + \left| \log \left( \sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\phi(\xi)| \right) \right| \right].$$

**Theorem 1.3.** *Let  $\phi : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$  as in previous Theorem. Then there is  $\mu > 1$  such that if*

$$\sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\phi(\xi + i\sigma)| \leq 2 \sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\phi(\xi)|, \quad (3)$$

*holds for  $\lambda_1 > 0$  and  $\sigma \in \mathbb{R}$ , then*

$$\sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\phi'(\xi + i\sigma)| \leq \mu B \left( \sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\phi(\xi)| \right) \left[ 1 + \left| \log \left( \sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\phi(\xi)| \right) \right| \right]. \quad (4)$$

Finally, to related these results, we must establish for functions  $u$  as in the Paley–Wiener Theorem for  $\lambda_1 > 0$ , and  $t_0 \in I$  fixed, that we have the estimate

$$\sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\widehat{u(t_0)}(\xi + i\sigma)| \leq 2 \sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\widehat{u(t_0)}(\xi)|, \quad (5)$$

for  $\sigma \in \mathbb{R}$  with  $|\sigma|$  small enough (see Lemma (3.2) below).

In order to illustrate the situation, let us suppose that  $u$  is a smooth solution of the linear equation

$$u_t + \gamma u_{xxx} = 0,$$

with  $\text{supp } u(t) \subseteq [-B, B] \times I$ , then by the Paley–Wiener Theorem we conclude that  $\widehat{u(t)}$  has an analytic extension in  $\mathbb{C}$  and there exists  $\kappa > 0$  such that for all  $t \in I$ , the function  $\widehat{u(t)}(\lambda + i\sigma)$  has the exponential order (1). Now, using the semigroup associated with the linear equation, we know for  $t_1 \in I$  that the solution  $u(t)(\cdot)$  can be expressed in terms of the Fourier transform as

$$\widehat{u(t)}(\lambda) = e^{i\gamma\lambda^3\Delta t} \widehat{u(t_1)}(\lambda), \quad \Delta t = t - t_1.$$

Moreover, we have that the extension has the form

$$\widehat{u(t)}(\lambda + i\sigma) = e^{i\gamma(\lambda+i\sigma)^3\Delta t} \widehat{u(t_1)}(\lambda + i\sigma).$$

Now, applying the triangular inequality and the generalized Mean Value Theorem, we conclude that there is some  $0 \leq |\sigma_0| \leq |\sigma|$  such that

$$\begin{aligned} |\widehat{u(t)}(\lambda + i\sigma)| &\geq e^{\gamma(\sigma^3 - 3\sigma\lambda^2)\Delta t} \left[ |\widehat{u(t_1)}(\lambda)| \right. \\ &\quad \left. - |\widehat{u(t_1)}(\lambda + i\sigma) - \widehat{u(t_1)}(\lambda)| \right] \\ &\geq e^{\gamma(\sigma^2 - 3\lambda^2)\sigma\Delta t} \left[ |\widehat{u(t_1)}(\lambda)| - |\sigma| \left| \left( \widehat{u(t_1)} \right)'(\lambda + i\sigma_0) \right| \right]. \end{aligned}$$

Since we know that the derivative of an entire function with exponential decay and bounded in the real axis (see Theorem (1.3)) is controlled, then for  $|\sigma|$  small enough, we have that

$$C e^{|\sigma|B} \geq |\widehat{u(t)}(\lambda + i\sigma)| \geq \frac{1}{2} e^{\gamma(\sigma^2 - 3\lambda^2)\sigma\Delta t} |\widehat{u(t_1)}(\lambda)|,$$



which implies that

$$e^{|\sigma|B-\gamma\sigma^3\Delta t+3\gamma\lambda^2\sigma\Delta t} \geq \frac{1}{2C}|\widehat{u}(t_1)(\lambda)|.$$

As a consequence of this, if for some  $t_1$  we have that  $|\widehat{u}(t_1)(\lambda)| > 0$  for  $\lambda$  sufficiently large and we are able to choose  $\gamma\sigma\Delta t < 0$ , then we will reach a contradiction since the left hand side is converging rapidly to zero, as  $\lambda$  tends to  $\infty$ . Essentially, this is also the situation while trying to obtain a unique continuation result for the equation

$$u_t + \gamma\partial_x^3 u = G(t)(x),$$

in case  $G(t)(x) = -\partial_x F(u(x))$  where  $F$  is a polynomial (corresponding to the (FKdV) equation), and in case

$$\begin{aligned} G(t)(x) &= -(kr_1(t)(x)u^{k-1}\partial_x u + r_2(t)(x)\partial_x u + r_3(t)(x)u) \\ &= -(r_1(t)(x)\partial_x(u^k) + r_2(t)(x)\partial_x u + r_3(t)(x)u), \end{aligned}$$

which corresponds to the equation we are considering in this work.

The equation (FKdV) is well known in the literature as the generalized Korteweg–De Vries equation when  $F(s) = s^k$  with  $k \geq 2$ . In this case, the equation takes the form

$$u_t + \gamma\partial_x^3 u + ku^{k-1}\partial_x u = 0 \text{ en } \mathbb{R}^{1+1}. \quad (\text{gKdV})$$

In particular, if we assume that  $u$  and  $v$  are sufficiently smooth solutions of the equation (gKdV), then  $w = u - v$  is a solutions of the generalized KdV type equation with variable coefficients

$$w_t + \gamma\partial_x^3 w + \alpha_1(x, t)\partial_x w + \alpha_2(x, t)w = 0,$$

where  $\alpha_i$  depends on  $u$  and  $v$ . Then if we have that  $u = v$  in  $\mathbb{R}^2 \setminus [-B, B] \times I$ , we obtain that

$$\text{supp } w(x, t) \subseteq [-B, B] \times I.$$

Thus if there is a unique continuation result for generalized KdV type equations with variable coefficients analogous to the **Bourgain's** result, we conclude that  $w = 0$  in  $\mathbb{R} \times I$ . In other words,  $u \equiv v$  in  $\mathbb{R} \times I$ .

We want to point out that the unique continuation problem for KdV type equation has brought the attention to well known mathematicians. In fact, **J. C. Saut** and **B. Scheurer** in ([6]), using estimates of Carleman, proved that if  $u$  satisfies the linear equation

$$u_t + u_{xxx} + r_2(x, t)u_{xx} + r_1(x, t)u_x + r_0(x, t)u = 0$$

en  $(a, b) \times (t_1, t_2)$ , and  $u$  is zero in an open set  $\Omega \subset (a, b) \times (t_1, t_2)$ , then  $u$  is zero in the horizontal component of  $\Omega$  given by

$$\{(x, t) \in (a, b) \times (t_1, t_2) : (y, t) \in \Omega \text{ for some } y \in (a, b)\}.$$

Moreover, if  $u$  is a sufficiently smooth solution of the generalized KdV equation (gKdV) with  $\text{supp } u \subset \mathbb{R} \setminus (a, b)$  for all  $t \in (t_1, t_2)$ , then  $u \equiv 0$  in  $(a, b) \times (t_1, t_2)$ .

On the other hand, **B. Zhang** in [7] showed that the unique smooth solution  $u$  of the Korteweg–de Vries equation

$$u_t + u_{xxx} + 2uv_x = 0 \text{ en } \mathbb{R} \times \mathbb{R} \quad (\text{KdV})$$

is  $u \equiv 0$  in  $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$ , if there are times  $t_1 < t_2$  such that for some  $\alpha \in \mathbb{R}$ ,

$$\text{supp } u(t_j) \subset (-\infty, \alpha), j = 1, 2,$$

or

$$\text{supp } u(t_j) \subset (\alpha, \infty), j = 1, 2.$$

In particular, if  $u(x, t)$  is a smooth solution of the equation (KdV) vanishing in the open set of  $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$ , then  $u$  must be the zero function in  $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$ . Through the Miura transformation, **B. Zhang** obtained a similar result for the modified (KdV) equation

$$v_t + v_{xxx} - 6v^2v_x = 0 \text{ en } \mathbb{R} \times \mathbb{R}.$$

**Zhang's** approach is based on the inverse scattering transform theory and properties of the Hardy spaces  $H^2_+$ .

**C. Kenig, G. Ponce** and **L. Vega** in [4] combining decay properties of solutions and **J. C. Saut** and **B. Scheurer** results proved that sufficiently smooth solutions  $u$  of the generalized (gKdV) equation are zero, whenever

$$\text{supp } u(t_j) \subset (-\infty, \alpha) \text{ or } \text{supp } u(t_j) \subset (\alpha, \infty) \quad (j = 1, 2).$$

In this paper, we are interested in obtaining a unique continuation result for a generalized Korteweg–de Vries equation with variable coefficients

$$u_t + \gamma\partial_x^3 u + kr_1(x, t)u^{k-1}\partial_x u + r_2(x, t)\partial_x u + r_3(x, t)u = 0, \quad (6)$$

for ( $k \geq 2$ ). This model is appropriated to describe large-amplitude internal waves in a variable medium, as is the case of the coastal waters of the ocean. (see [2] and [3]). It is important to point out that the existence of sufficiently smooth solutions for the generalized Korteweg–de Vries equation with variable coefficients (6) follows by the remark (c) to Theorem 1.3 in **Kenig et. al.** paper [4] (see also [5]). In this case, we write the equation (6) as

$$u_t + \gamma\partial_x^3 u + G(x, t, u, \partial_x u) = 0,$$

where  $G(x, t, u, v) = kr_1(x, t)u^{k-1}v + r_2(x, t)v + r_3(x, t)u$ .

The result is obtained by adapting and extending the techniques developed by **J. Bourgain** in [1]. It is important to mention that the variable coefficients case is rather different from the constant coefficient case since the nonlinear estimates require a more careful analysis. We will obtain a unique continuation result by imposing some restriction to the variables coefficients  $r_i(t)(\cdot)$ , which are related with the need of having the global bound

$$|\widehat{r_i(t)}(\lambda)| \leq \frac{ce^{-|\lambda|}}{1 + \lambda^2}. \quad (7)$$

We note that functions  $r_i(t)(\cdot)$  satisfying the estimate (7) are easily obtained. For instance, if  $r_i(t)(\cdot)$  is sufficiently smooth, then it is easy to see that the bound (7) holds locally, and we also know that the Fourier transform  $\widehat{r_i(t)}(\lambda)$  decays rapidly to zero, as  $\lambda \rightarrow \infty$ .

This paper is organized as follows. In section 2, we extend **Bourgain's** results to the variable coefficients case. We exhibit a class of variable coefficients  $r_i(t)(\cdot)$  having the global bound (7) in the spatial variable. In section 3, we prove the unique continuation result for equation (6).

## 2. Extension of Bourgain's Results

In this section we will establish the extension of **Bourgain's** results to study the case of variable coefficients, including nontrivial examples of coefficients  $r_i(t)(\cdot)$  satisfying the global bound (7). In particular, we obtain a variation of the Lemma in page 440 of **J. Bourgain's** work in [1] for the variable coefficients case. This result will be clever in the next section to get the extension of the unique continuation result in the case of variable coefficients.

Hereafter we will assume the same type of hypotheses as in **J. Bourgain's** paper [1]. We say that a function  $u$  defined in  $\mathbb{R} \times I$  is sufficiently smooth, if the partial derivatives  $u_t$  and  $\partial_x^4 u$  exist and are continuous. It is clear that this is not a restriction at all since we are dealing with solutions of partial differential equations with smooth coefficients, for which the smoothness is guaranteed at least locally in time.

**Definition 2.1.** Let  $u$  be a sufficiently smooth function in  $\mathbb{R} \times I$  such that for any  $t \in I$ ,

$$\int_{\mathbb{R}} (|u(t)(x)| + |\partial_x^4 u(t)(x)|) dx \leq M. \quad (8)$$

Let  $u^*$  and  $a_u$  be the functions defined as

$$u^*(\lambda) = \sup_{t \in I} |\widehat{u(t)}(\lambda)|, \quad \lambda \in \mathbb{R}, \quad (9)$$

$$a_u(\lambda) = \sup_{|\xi| \geq |\lambda|} u^*(\xi), \quad \lambda \in \mathbb{R}. \quad (10)$$

For the sake of completeness, we include and/or complete the proof of some result of **J. Bourgain** in ([1]), mainly those results that we must extend. Hereafter,  $a_u \equiv a$ , unless we want to emphasize the function  $u$ .

**Lemma 2.1.** Let  $u$  be a sufficiently smooth function in  $\mathbb{R} \times I$  satisfying (8). Then the function  $a$  is an even, bounded, nonnegative, and decreasing in the following sense:

$$a(\lambda_2) \leq a(\lambda_1), \quad \text{if } |\lambda_1| \leq |\lambda_2|. \quad (11)$$

Moreover, we have that

$$\lim_{|\lambda| \rightarrow \infty} a(\lambda) = 0. \quad (12)$$

*Proof.* We claim that  $u^*$  and  $a$  are well defined. From the hypotheses on  $u$ , there exists  $M > 0$  such that for any  $t \in I$  and  $\lambda \in \mathbb{R}$ ,

$$|\widehat{u(t)}(\lambda)| \leq \int_{\mathbb{R}} |u(t)(x)| dx \leq M. \quad (13)$$

Thus we conclude that  $u^*$  is well defined. On the other hand,

$$i^4 \lambda^4 \widehat{u(t)}(\lambda) = \widehat{\partial_x^4 u(t)}(\lambda) = \int_{\mathbb{R}} e^{-i\lambda x} \partial_x^4 u(t)(x) dx,$$

Thus we obtain

$$\lambda^4 |\widehat{u(t)}(\lambda)| \leq \int_{\mathbb{R}} |\partial_x^4 u(t)(x)| dx \leq M. \quad (14)$$

Using (13) and (14), we have for  $t \in I$  that

$$(1 + \lambda^4) |\widehat{u(t)}(\lambda)| \leq 2M,$$

implying that for some  $C > 0$  and for any  $\lambda \in \mathbb{R}$ ,

$$u^*(\lambda) < \frac{C}{1 + \lambda^4}.$$

Then for  $|\xi| \geq |\lambda|$ , we have that

$$u^*(\xi) < \frac{C}{1 + |\xi|^4} \leq \frac{C}{1 + \lambda^4}.$$

In other words, we have for  $\lambda \in \mathbb{R}$  that

$$a(\lambda) \leq \frac{C}{1 + \lambda^4}.$$

Moreover, for some  $C_1 > 0$ ,

$$a(\lambda) < \frac{C_1}{1 + \lambda^4} < C_1, \quad (15)$$

implying that the function  $a$  is integrable in  $\mathbb{R}$  and bounded. Note that  $a$  is an even function, since

$$a(-\lambda) = \sup_{|\xi| \geq |-\lambda|} u^*(\xi) = \sup_{|\xi| \geq |\lambda|} u^*(\xi) = a(\lambda).$$

Now, for  $|\lambda_1| \leq |\lambda_2|$ , we have that

$$a(\lambda_2) = \sup_{|\xi| \geq |\lambda_2|} u^*(\xi) \leq \sup_{|\xi| \geq |\lambda_1|} u^*(\xi) = a(\lambda_1),$$

proving (11). Finally, from (15) we obtain that

$$\lim_{|\lambda| \rightarrow \infty} a(\lambda) = 0. \quad \square$$

**Lemma 2.2.** *Let  $u$  be a sufficiently smooth function in  $\mathbb{R} \times I$  satisfying (8), then there exists  $B_1 > 0$  such that for  $\lambda_0 > 0$  fixed,*

$$a(\lambda) < \frac{2B_1}{1 + \lambda^2} e^{\frac{-|\lambda|}{2(\lambda_0 + Q)}}, \quad (16)$$

whenever  $|\lambda| \leq \lambda_0$  and for any  $Q > 0$ .

*Proof.* First note that for some  $B_1 > 0$  (which depends only on the regularity of  $u$ ), we have for  $\lambda \in \mathbb{R}$  that

$$a(\lambda) < \frac{B_1}{1 + \lambda^4} \quad \text{and} \quad a(\lambda) < \frac{B_1}{1 + \lambda^2}. \quad (17)$$

In fact, from (15) we know that there is  $C_1 > 0$  such that

$$a(\lambda) < \frac{C_1}{1 + \lambda^4}.$$

Then we also have for  $|\lambda| > 1$  that

$$a(\lambda) < \frac{C_1}{1 + \lambda^2}.$$

Moreover, for  $|\lambda| \leq 1$ , there exists  $k_1 > 0$  such that

$$\frac{1 + \lambda^2}{1 + \lambda^4} < k_1,$$

and so,

$$a(\lambda) < \frac{k_1 C_1}{1 + \lambda^2}.$$

Taking  $B_1 = \max\{C_1, k_1 C_1\}$  we obtain the estimates. Now assume that  $|\lambda| \leq \lambda_0$ . Then we observe for any  $Q > 0$  that

$$\frac{|\lambda|}{\lambda_0 + Q} < 1 < \log(4),$$

which is equivalent to have

$$1 < 2e^{\frac{-|\lambda|}{2(\lambda_0 + Q)}}.$$

Using (17) we have that

$$a(\lambda) < \frac{2B_1}{1 + \lambda^2} e^{\frac{-|\lambda|}{2(\lambda_0 + Q)}}. \quad \square$$

Now we state and sketch the proof of an important result in Bourgain's work, which we must extend in the case of having variable coefficients.

**Lemma 2.3.** J. Bourgain (see [1], page 440). *Let  $u$  be a sufficiently smooth function in  $\mathbb{R} \times I$  such that*

$$\text{supp } u(t)(\cdot) \subseteq [-B, B] \quad \text{for } t \in I. \quad (18)$$

*If there are  $x_0 \in [-B, B]$  and  $t_0 \in I$  such that  $u(t_0)(x_0) \neq 0$ , then there is  $c > 0$  such that for all  $Q > 0$  there exists  $\lambda > 0$  arbitrarily large such that*

$$a(\lambda) > c(a * \dots * a)(\lambda) \quad \text{and} \quad a(\lambda) > e^{-\frac{\lambda}{Q}}.$$

*Proof.* We only sketch the proof since many of the estimates have to be extended to the variable coefficients case. The first observation is that

$$\begin{aligned} (a_0 * a_1 * \dots * a_k)(\lambda) &= \int_{\mathbb{R}^k} a_0(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) a_1(\lambda_1) \dots a_k(\lambda_k) d\lambda_1 \dots d\lambda_k. \end{aligned} \quad (19)$$

Now we argue by contradiction. Assume that for given  $c > 0$ , there are  $Q > 0$  and  $\lambda_0$  large enough such that, if  $\lambda > \lambda_0 > 0$ , then we have either

$$a(\lambda) \leq c(a * \dots * a)(\lambda) \quad (20)$$

or

$$a(\lambda) \leq e^{-\frac{\lambda}{Q}}. \quad (21)$$

Then it is possible to conclude (see [1]) that  $a$  has the global bound for  $\lambda \in \mathbb{R}$ .

$$a(\lambda) < \frac{2B_1}{1 + \lambda^2} e^{\frac{-|\lambda|}{2(\lambda_0 + Q)}} < 2B_1 e^{\frac{-|\lambda|}{2(\lambda_0 + Q)}}. \quad (22)$$

This fact implies that

$$|\widehat{u(t_0)}(\lambda)| < 2B_1 e^{\frac{-|\lambda|}{2(\lambda_0 + Q)}}, \quad \text{for } \lambda \in \mathbb{R}.$$

Using this, it is straightforward to see that

$$u(t_0)(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbb{R}} e^{ix\lambda} \widehat{u(t_0)}(\lambda) d\lambda, \quad x \in \mathbb{R},$$

has an analytic extension in a neighborhood of the real axis. In fact, let  $z = z_1 + iz_2 \in \mathbb{C}$  be such that  $|z_2| < \frac{1}{2(\lambda_0 + Q)}$ , then

$$\begin{aligned} |u(t_0)(z_1 + iz_2)| &\leq (2\pi)^{-1} \int_{\mathbb{R}} e^{-z_2\lambda} |\widehat{u(t_0)}(\lambda)| d\lambda \\ &\leq B_1 \pi^{-1} \int_{\mathbb{R}} e^{|\lambda z_2|} e^{\frac{-|\lambda|}{2(\lambda_0 + Q)}} d\lambda \\ &= B_1 \pi^{-1} \int_{\mathbb{R}} e^{-\left(\frac{1}{2(\lambda_0 + Q)} - |z_2|\right)|\lambda|} d\lambda \\ &= B_1 \pi^{-1} \frac{4(\lambda_0 + Q)}{1 - 2|z_2|(\lambda_0 + Q)}, \end{aligned}$$



In other words, the extension

$$u(t_0)(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbb{R}} e^{i\lambda z} \widehat{u(t_0)}(\lambda) d\lambda \tag{23}$$

is well defined in the domain  $\Pi = \left\{ z \in \mathbb{C} : |Im z| < \frac{1}{2(\lambda_0 + Q)} \right\}$ .

We claim now that  $u(t_0) \equiv 0$ . To see this, take  $z \in \Pi$  and a sequence  $\{z_n\}$  in  $\Pi$  such that  $\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = z$ . Then we have that

$$|u(t_0)(z_n) - u(t_0)(z)| \leq B\pi^{-1} \int_{\mathbb{R}} |e^{i\lambda z_n} - e^{i\lambda z}| e^{-\frac{|\lambda|}{2(\lambda_0 + Q)}} d\lambda.$$

Now from the generalized Mean Value Theorem, we have for  $n$  large enough that

$$|e^{i\lambda z_n} - e^{i\lambda z}| e^{-\frac{|\lambda|}{2(\lambda_0 + Q)}} \leq 2|z|^2 |\lambda|^2 e^{-\frac{|\lambda|}{2(\lambda_0 + Q)}} \in L_1(\mathbb{R}, d\lambda).$$

Then, from the Lebesgue Dominate Convergence Theorem we conclude that

$$\lim_{n \rightarrow \infty} |u(t_0)(z_n) - u(t_0)(z)| = 0.$$

In other words, we have shown that  $u(t_0)(\cdot)$  is continuous in  $\Pi$ . We will see for any triangle  $\Delta$  in  $\Pi$  that

$$\int_{\partial\Delta} u(t_0)(z) dz = 0.$$

In fact, from Fubini's Theorem

$$\begin{aligned} 2\pi \int_{\partial\Delta} u(t_0)(z) dz &= \int_{\partial\Delta} \left( \int_{\mathbb{R}} e^{iz\lambda} \widehat{u(t_0)}(\lambda) d\lambda \right) dz \\ &= \int_{\mathbb{R}} \left( \int_{\partial\Delta} e^{iz\lambda} dz \right) \widehat{u(t_0)}(\lambda) d\lambda. \end{aligned}$$

Since the function  $g(z) = e^{iz\lambda}$  is analytic, then the Cauchy Theorem implies that

$$\int_{\partial\Delta} e^{iz\lambda} dz = 0,$$

and so,

$$\int_{\partial\Delta} u(t_0)(z) dz = 0.$$

We conclude that  $u(t_0)(\cdot)$  is an analytic function in  $\Pi$ , by applying Morera's Theorem. Recall that we are assuming that  $u(t_0)(x) = 0$  for  $x \in [-B, B]$ , then we must have that  $u(t_0) \equiv 0$  due to its analyticity. This is a contradiction since we are assuming that  $u(t_0)(x_0) \neq 0$  for some  $x_0 \in [-B, B]$ .  $\square$

Another clever fact in **J. Bourgain's** result is related with the continuity of the functions  $u^*(\lambda)$  and  $|\widehat{u(t)}(\lambda)|$  given by the following result.

**Lemma 2.4.** ([1], equation 1.12) *Under the hypotheses of Lemma 2.3, there exists  $c > 0$  such that for  $Q > 0$  there are  $t_1 \in I$  and  $\lambda \in \mathbb{R}$ , with  $|\lambda|$  arbitrarily large such that*

$$|\widehat{u(t_1)}(\lambda)| = u^*(\lambda) = a(\lambda) > e^{-\frac{|\lambda|}{Q}}$$

and  $a(\lambda) > c(a * \dots * a)(\lambda)$ .

**A Remark on Bourgain's Results.** The key estimate in the proof of Lemma 2.3 in the work by **J. Bourgain** [1] is the global estimate (22), which is obtained arguing by contradiction. In order to extend **J. Bourgain's** results to the variable coefficients case, we impose some hypotheses in the Fourier transform of the coefficients to obtain similar estimates. The first observation is that global exponential decay (22) holds for  $|\lambda|$  bounded (see (16) in Lemma (2.2)). In the coming result, we will assume that the variable coefficient  $\beta$  has a global exponential decay of the form (7), in its Fourier transform with respect to the spatial variable. More concretely, we set the following class of functions

$$\mathcal{A} = \left\{ w \in \mathcal{D}'(\mathbb{R}) : e^{|\lambda|}(1 + \lambda^2)\widehat{w} \in L^\infty(\mathbb{R}) \right\}$$

where  $\mathcal{D}'(\mathbb{R})$  denotes the set of distributions in  $\mathbb{R}$ . We will exhibit below some classes of functions contained in  $\mathcal{A}$ , which satisfy the global exponential decay (7).

**Lemma 2.5.** *Let  $\beta$  be a continuous function in  $\mathbb{R} \times I$  such that  $\beta(t) \in \mathcal{A}$  uniformly for  $t \in I$ . Let  $\beta^*$  and  $a_\beta$  be defined as in (9) and (10), respectively. Then  $a_\beta$  satisfies the conditions given in Lemma (2.1) and for some  $k > 0$*

$$a_\beta(\lambda) \leq \frac{ke^{-|\lambda|}}{1 + \lambda^2}. \tag{24}$$

*Proof.* The result follows by noting that for some  $k > 0$ , we have for  $t \in I$  that

$$|\widehat{\beta(t)}(\lambda)| \leq \frac{ke^{-|\lambda|}}{1 + \lambda^2}.$$

So, the same estimate holds for  $a_\beta$ . The rest of the proof follows as in Lemma 2.1.  $\square$

Now we are in position to establish the extension to the variable coefficients case of the main Lemma in [1].

**Lemma 2.6.** *Let  $\beta_i$  be continuous functions in  $\mathbb{R} \times I$  ( $1 \leq i \leq 5$ ) such that  $\beta_i(t) \in \mathcal{A}$  uniformly for  $t \in I$ . Let  $u$  be a sufficiently smooth function in  $\mathbb{R} \times I$  such that*

$$\text{supp } u(t) \subseteq [-B, B], \quad \text{for all } t \in I.$$

*If there are  $x_0 \in [-B, B]$  and  $t_0 \in I$  such that  $u(t_0)(x_0) \neq 0$ , then there exists  $c > 0$  such that for*

all  $Q > 0$  there is  $\lambda > 0$  arbitrarily large such that

$$a(\lambda) > c[(a_{\beta_1} * a * \dots * a)(\lambda) + (a_{\beta_2} * a * \dots * a)(\lambda) \\ + (a_{\beta_3} * a)(\lambda) + (a_{\beta_4} * a)(\lambda) + (a_{\beta_5} * a)(\lambda)]$$

and  $a(\lambda) > e^{-\frac{\lambda}{Q}}$ .

*Proof.* For simplicity we only show that

$$a(\lambda) > c[(a_{\beta_1} * a * \dots * a)(\lambda) + (a_{\beta_2} * a)(\lambda)]$$

and  $a(\lambda) > e^{-\frac{\lambda}{Q}}$ . The general case follows in a similar fashion. We will argue by contradiction, as done by **J. Bourgain** in [1]. Suppose that for  $c > 0$  that there are  $Q > 0$  and  $\lambda_0 > 0$  sufficiently large such that, if  $\lambda > \lambda_0$ , then either

$$a(\lambda) \leq c[(a_{\beta_1} * a * \dots * a)(\lambda) + (a_{\beta_2} * a)(\lambda)] \quad (25)$$

or

$$a(\lambda) \leq e^{-\frac{\lambda}{Q}}. \quad (26)$$

As shown in Lemma (2.2), there exists  $B_1 > 1$  such that

$$a(\lambda) < \frac{2B_1}{1 + \lambda^2} e^{-\frac{|\lambda|}{2(\lambda_0 + Q)}}, \quad \text{si } |\lambda| \leq \lambda_0. \quad (27)$$

We will see, as in ([1]), that this estimate must be global for  $\lambda \in \mathbb{R}$ . Assume that (27) were false for  $\lambda > \lambda_0$ , then

Thus we have that

$$a(\lambda') \leq c \int_{\mathbb{R}^k} a_{\beta_1}(\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) a(\lambda_1) \dots a(\lambda_k) d\lambda_1 \dots d\lambda_k + c \int_{\mathbb{R}} a_{\beta_2}(\lambda' - \lambda_1) a(\lambda_1) d\lambda_1 \\ \leq c \int_U a_{\beta_1}(\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) a(\lambda_1) \dots a(\lambda_k) d\lambda_1 \dots d\lambda_k \\ + c \sum_{i=1}^k \int_{|\lambda_i| > \lambda'} a_{\beta_i}(\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) a(\lambda_1) \dots a(\lambda_k) d\lambda_1 \dots d\lambda_k \\ + c \int_{|\lambda_1| < \lambda'} a_{\beta_2}(\lambda' - \lambda_1) a(\lambda_1) d\lambda_1 + c \int_{|\lambda_1| > \lambda'} a_{\beta_2}(\lambda' - \lambda_1) a(\lambda_1) d\lambda_1.$$

Now we will see that there is  $c_1 > 0$  such that

$$\int_{|\lambda_1| > \lambda'} a_{\beta_1}(\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) a(\lambda_1) \dots a(\lambda_k) d\lambda_1 \dots d\lambda_k \leq c_1 a(\lambda'). \quad (28)$$

From Lemma (2.5), the function  $a_{\beta}$  satisfies the property (24), and then we have that

$$\int_{-\infty}^{-\lambda'} a_{\beta_1}(\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) d\lambda_1 \leq k_1 \int_{-\infty}^{-\lambda'} \frac{1}{1 + |\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k|^2} d\lambda_1 \leq k_1 \pi. \quad (29)$$

there is  $\lambda'$  such that

$$\lambda_0 < \lambda' = \min \left\{ \lambda > \lambda_0 : a(\lambda) \geq \frac{2B_1}{1 + \lambda^2} e^{-\frac{|\lambda|}{2(\lambda_0 + Q)}} \right\}.$$

If (26) holds for  $\lambda'$ , we will obtain a contradiction. In fact, suppose that (26) holds for  $\lambda'$ . Then from (17), we have that

$$|a(\lambda')|^2 < \frac{B_1}{1 + (\lambda')^4} e^{-\frac{\lambda'}{Q}} < \frac{B_1}{1 + (\lambda')^4} e^{-\frac{\lambda'}{2(\lambda_0 + Q)}},$$

meaning that

$$a(\lambda') < \left( \frac{B_1}{1 + (\lambda')^4} \right)^{1/2} e^{-\frac{\lambda'}{2(\lambda_0 + Q)}}.$$

Since we have that  $B_1 > 1$ , then

$$\sqrt{B_1} (1 + (\lambda')^2) < 2B_1 (1 + (\lambda')^4)^{1/2},$$

then

$$a(\lambda') < \frac{2B_1}{1 + (\lambda')^2} e^{-\frac{\lambda'}{2(\lambda_0 + Q)}},$$

contradicting the definition of  $\lambda'$ .

Now assume that (25) holds for  $\lambda'$  and consider the set

$$U = \left\{ (\lambda_1, \dots, \lambda_k) \in \mathbb{R}^k : |\lambda_1| < \lambda', \dots, |\lambda_k| < \lambda' \right\}.$$



Similarly we have that

$$\int_{\lambda'}^{\infty} a_{\beta_1}(\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) d\lambda_1 \leq k_1 \pi. \quad (30)$$

Now from the property (11), we obtain that

$$\begin{aligned} & \int_{|\lambda_i| > \lambda'} a_{\beta_1}(\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) a(\lambda_1) \dots a(\lambda_k) d\lambda_1 \dots d\lambda_k \\ & \leq a(\lambda') \int_{|\lambda_i| > \lambda'} a_{\beta_1}(\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) a(\lambda_2) \dots a(\lambda_k) d\lambda_1 \dots d\lambda_k \\ & = a(\lambda') \int_{\mathbb{R}^{k-1}} \left( \int_{-\infty}^{-\lambda'} a_{\beta_1}(\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) d\lambda_1 \right) a(\lambda_2) \dots a(\lambda_k) d\lambda_2 \dots d\lambda_k \\ & \quad + a(\lambda') \int_{\mathbb{R}^{k-1}} \left( \int_{\lambda'}^{\infty} a_{\beta_1}(\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) d\lambda_1 \right) a(\lambda_2) \dots a(\lambda_k) d\lambda_2 \dots d\lambda_k \\ & \leq 2k_1 \pi a(\lambda') \left( \int_{\mathbb{R}} a(\lambda) d\lambda \right)^{k-1}, \end{aligned}$$

obtaining (28) as desired. Arguing in the same way, it is possible to show that there are positive constants  $c_2, \dots, c_k, \kappa$  such that for  $i = 2, \dots, k$ , we have the estimates

$$\begin{aligned} & \int_{|\lambda_i| > \lambda'} a_{\beta_i}(\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) a(\lambda_1) \dots a(\lambda_k) d\lambda_1 \dots d\lambda_k \leq c_i a(\lambda'), \\ & \int_{|\lambda_i| > \lambda'} a_{\beta_2}(\lambda' - \lambda_1) a(\lambda_1) d\lambda_1 \leq \kappa a(\lambda'). \end{aligned}$$

Thus, we get

$$\begin{aligned} a(\lambda') & \leq c \int_U a_{\beta_1}(\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) a(\lambda_1) \dots a(\lambda_k) d\lambda_1 \dots d\lambda_k \\ & \quad + c \int_{|\lambda_i| < \lambda'} a_{\beta_2}(\lambda' - \lambda_1) a(\lambda_1) d\lambda_1 + c a(\lambda') \sum_{i=1}^k c_i + c \kappa a(\lambda'). \end{aligned}$$

Then taking  $c$  sufficiently small we conclude that

$$\begin{aligned} a(\lambda') & \leq 2c \int_U a_{\beta_1}(\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) a(\lambda_1) \dots a(\lambda_k) d\lambda_1 \dots d\lambda_k \\ & \quad + 2c \int_{|\lambda_i| < \lambda'} a_{\beta_2}(\lambda' - \lambda_1) a(\lambda_1) d\lambda_1. \end{aligned}$$

Now, since  $\lambda_0$  is large, then  $2(\lambda_0 + Q) > 1$ , and so,

$$-|\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k| < \frac{-|\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k|}{2(\lambda_0 + Q)},$$

Again from Lemma (2.5), the function  $a_{\beta_1}$  satisfies the property (24), and then we have that

$$\begin{aligned} & \int_U a_{\beta_1}(\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) a(\lambda_1) \dots a(\lambda_k) d\lambda_1 \dots d\lambda_k \\ & \leq k_1 (2B_1)^k \int_U \frac{e^{-\frac{|\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k|}{2(\lambda_0 + Q)}}}{1 + |\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k|^2} \frac{e^{-\frac{|\lambda_1|}{2(\lambda_0 + Q)}}}{1 + |\lambda_1|^2} \dots \frac{e^{-\frac{|\lambda_k|}{2(\lambda_0 + Q)}}}{1 + |\lambda_k|^2} d\lambda_1 \dots d\lambda_k \\ & \leq k_1 (2B_1)^k e^{\frac{-\lambda'}{2(\lambda_0 + Q)}} \int_U \frac{1}{1 + |\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k|^2} \frac{1}{1 + |\lambda_1|^2} \dots \frac{1}{1 + |\lambda_k|^2} d\lambda_1 \dots d\lambda_k. \end{aligned}$$

Now we consider the sets

$$\begin{aligned} U_1 &= U \cap \left\{ (\lambda_1, \dots, \lambda_k) \in \mathbb{R}^k : \lambda_1 + \dots + \lambda_k > \frac{\lambda'}{2} \right\}, \\ U_2 &= U \cap \left\{ (\lambda_1, \dots, \lambda_k) \in \mathbb{R}^k : \lambda_1 + \dots + \lambda_k < \frac{\lambda'}{2} \right\}, \end{aligned}$$

then it is not difficult to show that there exists  $\rho_1 > 0$  such that for  $i = 1, 2$ ,

$$\int_{U_i} \frac{1}{1 + |\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k|^2} \frac{1}{1 + |\lambda_1|^2} \dots \frac{1}{1 + |\lambda_k|^2} d\lambda_1 \dots d\lambda_k < \frac{\rho_1}{1 + (\lambda')^2},$$

Then we also have that

$$\begin{aligned} & \int_U a_{\beta_1}(\lambda' - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) a(\lambda_1) \dots a(\lambda_k) d\lambda_1 \dots d\lambda_k \\ & \leq \frac{2k_1 \rho_1 (2B_1)^k}{1 + (\lambda')^2} e^{\frac{-\lambda'}{2(\lambda_0 + Q)}}. \end{aligned}$$

Similarly, there exists  $\rho_2 > 0$  such that

$$\int_{|\lambda_1| < \lambda'} a_{\beta_2}(\lambda' - \lambda_1) a(\lambda_1) d\lambda_1 \leq \frac{2k_2 \rho_2 (2B_1)}{1 + (\lambda')^2} e^{\frac{-\lambda'}{2(\lambda_0 + Q)}}.$$

Since  $c$  is being taken small enough, the we have that

$$a(\lambda') < \frac{2B_1}{1 + (\lambda')^2} e^{\frac{-\lambda'}{2(\lambda_0 + Q)}},$$

contradicting again the definition of  $\lambda'$ . In other words, we have the global estimate for  $\lambda \in \mathbb{R}$ ,

$$a(\lambda) < \frac{2B_1}{1 + \lambda^2} e^{\frac{-|\lambda|}{2(\lambda_0 + Q)}} < 2B_1 e^{\frac{-|\lambda|}{2(\lambda_0 + Q)}}.$$

As in the last part of the proof of Lemma 2.3 we also reach a contradiction.

Similarly to the Lemma 2.4, it is possible to show that

**Lemma 2.7.** *Under the hypotheses of the Lemma 2.6, there exists  $c > 0$  such that for given  $Q > 0$  there are  $t_1 \in I$  and  $\lambda \in \mathbb{R}$  arbitrarily large, such that*

$$|\widehat{u}(t_1)(\lambda)| = u^*(\lambda) = a(\lambda) > e^{\frac{-|\lambda|}{Q}}.$$

Moreover, we also have

$$\begin{aligned} a(\lambda) &> c[(a_{\beta_1} * a * \dots * a)(\lambda) \\ &+ (a_{\beta_2} * a * \dots * a)(\lambda) + (a_{\beta_3} * a)(\lambda) \\ &+ (a_{\beta_4} * a)(\lambda) + (a_{\beta_5} * a)(\lambda)]. \end{aligned}$$

**2.1. Some Examples of Functions in the Class  $\mathcal{A}$ .** Now we will exhibit examples of functions in the class  $\mathcal{A}$ , including functions  $f$  defined in  $\mathbb{R} \times I$  having the exponential decay (7) uniformly in  $t$ .

**Example 2.1.** Let  $K$  and  $g$  be functions such that

$$|\widehat{K}(\lambda)| \leq \frac{c_1}{1 + |\lambda|^2}, \quad |\widehat{g}(\lambda)| \leq c_2 e^{-|\lambda|}.$$

Then we have that the function  $\beta = K * g \in \mathcal{A}$ . In fact, a simple computation gives us for some constant  $c > 0$  that

$$|\widehat{\beta}(\lambda)| = |\widehat{K * g}(\lambda)| = |\widehat{K}(\lambda)\widehat{g}(\lambda)| \leq \frac{ce^{-|\lambda|}}{1 + \lambda^2}.$$

We note that such functions  $K$  and  $g$  can be even built explicitly. The first observation is that  $K(x) = \frac{e^{-|x|}}{2}$  if and only if  $\widehat{K}(\lambda) = \frac{1}{1 + \lambda^2}$ . In fact,

$$\begin{aligned} \widehat{K}(\lambda) &= \frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}} e^{-i\lambda x} e^{-|x|} dx \\ &= \frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}} \cos(\lambda x) e^{-|x|} dx - \frac{i}{2} \int_{\mathbb{R}} \sin(\lambda x) e^{-|x|} dx. \end{aligned}$$

Since we know that  $\sin(\lambda x)e^{-|x|}$  is an odd function (in  $x$ ), and that  $\cos(\lambda x)e^{-|x|}$  is an even function, we have

that

$$\widehat{K}(\lambda) = \frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}} \cos(\lambda x) e^{-|x|} dx = \int_0^{\infty} \cos(\lambda x) e^{-x} dx.$$

Now, using integration by parts, we conclude that

$$(1 + \lambda^2) \int_0^{\infty} \cos(\lambda x) e^{-x} dx = -\cos(\lambda x) e^{-x} + \lambda \sin(\lambda x) e^{-x},$$

which implies that

$$(1 + \lambda^2) \int_0^{\infty} \cos(\lambda x) e^{-x} dx = -\lim_{t \rightarrow \infty} \cos(\lambda t) e^{-t} + 1 + \lambda \lim_{t \rightarrow \infty} \sin(\lambda t) e^{-t} = 1.$$

This means that

$$\widehat{K}(\lambda) = \frac{1}{1 + \lambda^2}.$$

Since the Fourier transform is a bijection from  $L_2(\mathbb{R})$  to  $L_2(\mathbb{R})$ , we have that  $K(x) = \frac{e^{-|x|}}{2}$  if and only if  $\widehat{K}(\lambda) = \frac{1}{1 + \lambda^2}$ . Now, we will build some functions  $g$ . Using the same type of estimates, we have for any  $\alpha \neq 0$  that  $g_\alpha(y) = \frac{1}{\pi} \frac{\alpha}{\alpha^2 + y^2}$  if and only if  $\widehat{g}_\alpha(\lambda) = e^{-\alpha|\lambda|}$ . To see this, we observe that  $\widehat{g}_\alpha \in L_2(\mathbb{R})$  and that

$$\begin{aligned} g_\alpha(x) &= \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbb{R}} e^{i\lambda x} e^{-\alpha|\lambda|} d\lambda = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \cos(\lambda x) e^{-\alpha\lambda} d\lambda \\ &= \frac{1}{\pi} \frac{\alpha}{\alpha^2 + x^2}, \end{aligned}$$

proceeding as above. Then, for  $\alpha \geq 1$ , we have that the function  $\beta = K * g_\alpha \in \mathcal{A}$ , since

$$|\widehat{\beta}(\lambda)| = |\widehat{K} * \widehat{g}_\alpha(\lambda)| = |\widehat{K}(\lambda) \widehat{g}_\alpha(\lambda)| = \frac{e^{-\alpha|\lambda|}}{1 + \lambda^2} \leq \frac{e^{-|\lambda|}}{1 + \lambda^2}.$$

As we will see below, there are many functions  $K$  satisfying the estimate  $|\widehat{K}(\lambda)| \leq \frac{c}{1 + |\lambda|^2}$ .

**Example 2.2.** Let  $\rho$  be a bounded continuous function such that  $1 \leq |\rho(t)|$  for  $t \in \mathbb{R}$ . Define now the function  $G(t)(x) = K_{\rho(t)}(x) = K(\rho(t)x)$ , where  $K$  is a function as in previous example. Then we have that

$$\widehat{G}(t)(\lambda) = \frac{1}{\rho(t)} \widehat{K} \left( \frac{\lambda}{\rho(t)} \right).$$

Thus the function  $\beta(t) = G(t) * g_\alpha \in \mathcal{A}$  uniformly for  $t \in \mathbb{R}$ . In fact,

$$\begin{aligned} |\widehat{\beta}(t)(\lambda)| &= |\widehat{G}(t) * \widehat{g}_\alpha(\lambda)| = |\widehat{G}(t)(\lambda) \widehat{g}_\alpha(\lambda)| \\ &\leq \frac{\rho(t) e^{-\alpha|\lambda|}}{\rho^2(t) + \lambda^2} \leq \frac{M e^{-|\lambda|}}{1 + \lambda^2}. \end{aligned}$$

**Example 2.3.** Let  $K$  be a continuous function such that  $K, \partial_x^2 K \in L^1(\mathbb{R})$ . Then we have that

$$\begin{aligned} (1 + \lambda^2) |\widehat{K}(\lambda)| &= |\widehat{K}(\lambda)| + |\widehat{\partial_x^2 K}(\lambda)| \\ &\leq \int_{\mathbb{R}} |K(x)| dx + \int_{\mathbb{R}} |\partial_x^2 K(x)| dx. \end{aligned}$$

Thus we conclude that

$$|\widehat{K}(\lambda)| \leq \frac{c}{1 + \lambda^2},$$

providing in addition functions  $K$  as needed in previous examples. Now define  $h(x) = e^{-\frac{1}{2}x^2}$ . Then for some positive constant  $k_1$ , we have that  $\widehat{h}(\lambda) = k_1 e^{-\lambda^2}$ . As a consequence of this, there is a positive constant  $k_2$  such that for  $\lambda \in \mathbb{R}$

$$|\widehat{h}(\lambda)| \leq k_2 e^{-|\lambda|}.$$

Then we have that  $\beta = K * h$  and  $\beta(t) = K_{\rho(t)} * h$  belong to  $\mathcal{A}$ , uniformly in  $t \in \mathbb{R}$ , for any function  $\rho$  as in the second example.

### 3. Unique Continuation Results

In this section we present some results related with unique continuation for the differential equation (6), including the extension of **J. Bourgain** results in [1] to the variable coefficients case. We start the discussion by proving an important property of the function  $a$ , whose proof was not included in **J. Bourgain**'s paper ([1]).

**Lemma 3.1.** Let  $\lambda_1 \in \mathbb{R}$ ,  $u$  be as in Lemma 2.1 and  $\lambda \in \mathbb{R}$  be such that  $a(\lambda) < 1$ . Then there exist a constant  $\rho > 1$  independent of  $\lambda_1$  and  $\lambda$  such that for  $\bar{\lambda} = \min\{|\lambda_1|, |\lambda|\}$  we have the estimate

$$a(\bar{\lambda}) [1 + |\log a(\bar{\lambda})|] \leq \rho [a(\lambda) + a(\lambda_1)] [1 + |\log a(\lambda)|]. \quad (31)$$

*Proof.* If  $\bar{\lambda} = |\lambda|$ , then the estimate follows since  $a$  is a nonnegative even function. Assume that  $\bar{\lambda} = |\lambda_1|$ . If  $|\lambda_1| \leq |\lambda|$ , then  $a(\lambda) \leq a(\lambda_1)$ . Thus,  $a(\lambda_1) \leq 1$  implies that

$$|\log a(\lambda_1)| \leq |\log a(\lambda)|,$$

and so we have the estimate. Now, recall that  $a$  is a bounded function, thus, for  $a(\lambda_1) > 1$ , there exists  $C > 0$  such that

$$a(\lambda) \leq 1 < a(\lambda_1) < C.$$

Taking  $k_1 < 1$  and such that  $k_1 C < 1$ , we obtain  $k_1 a(\lambda_1) < 1$ . Thus we have either

$$k_1 a(\lambda_1) \leq a(\lambda) < 1 \quad \text{or} \quad a(\lambda) \leq k_1 a(\lambda_1) < 1.$$

In the first case, we use that  $f(x) = x(1 + |\log x|)$ ,  $x > 0$ , is an increasing function to conclude that

$$\begin{aligned} a(\lambda_1)[1 + |\log a(\lambda_1)|] &\leq k_1^{-1}a(\lambda)[1 + |\log(k_1^{-1}a(\lambda))|] \\ &\leq k_1^{-1}[a(\lambda) + a(\lambda_1)][1 + |\log k_1| + |\log a(\lambda)|] \\ &\leq k_1^{-1}(1 + |\log k_1|)[a(\lambda) + a(\lambda_1)][1 + |\log a(\lambda)|]. \end{aligned}$$

In the second case, if  $a(\lambda) \leq k_1a(\lambda_1) < 1$ , then  $|\log(k_1a(\lambda_1))| \leq |\log a(\lambda)|$ . Using this we obtain that

$$\begin{aligned} a(\lambda_1)[1 + |\log a(\lambda_1)|] &\leq a(\lambda_1)[1 + |\log k_1| + |\log(k_1a(\lambda_1))|] \\ &\leq (1 + |\log k_1|)[a(\lambda) + a(\lambda_1)][1 + |\log a(\lambda)|]. \quad \square \end{aligned}$$

As we mention in the introduction, we need to apply Theorem (1.3) to be able to handle the derivative of  $u$ .

**Lemma 3.2.** *Let  $u$  be as in the Paley–Wiener Theorem. Let  $\lambda_1 > 0$  and  $t_0 \in I$  be fixed, and let  $\widehat{u(t_0)}(z)$  be the analytic extension of the Fourier transform of  $u(t_0)(x)$ . Then for  $\sigma \in \mathbb{R}$  such that  $|\sigma|$  is small enough, we have that*

$$\sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\widehat{u(t_0)}(\xi + i\sigma)| \leq 2 \sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\widehat{u(t_0)}(\xi)|. \quad (32)$$

*Proof.* Let  $M > 0$  be such that

$$|u(x, t)| < M, \quad x \in [-B, B]. \quad (33)$$

Now take  $\xi \in \mathbb{R}$  such that  $|\xi| \geq \lambda_1$ , then

$$\begin{aligned} |\widehat{u(t_0)}(\xi + i\sigma) - \widehat{u(t_0)}(\xi)| &\leq \left| \int_{-B}^B e^{-i(\xi+i\sigma)x} u(t_0)(x) dx \right. \\ &\quad \left. - \int_{-B}^B e^{-i\xi x} u(t_0)(x) dx \right| \\ &\leq \int_{-B}^B |e^{\sigma x} - 1| |u(t_0)(x)| dx \leq M \int_{-B}^B |e^{\sigma x} - 1| dx \\ &\leq M \left( \frac{e^{|\sigma|B} + e^{-|\sigma|B} - 2}{|\sigma|} \right). \end{aligned}$$

But we have that

$$\lim_{|\sigma| \rightarrow 0} \frac{e^{|\sigma|B} + e^{-|\sigma|B} - 2}{|\sigma|} = 0,$$

then we are able to take  $|\sigma|$  small enough such that

$$M \left( \frac{e^{|\sigma|B} + e^{-|\sigma|B} - 2}{|\sigma|} \right) \leq \sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\widehat{u(t_0)}(\xi)|.$$

Thus we have that

$$|\widehat{u(t_0)}(\xi + i\sigma)| \leq 2 \sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\widehat{u(t_0)}(\xi)|,$$

obtaining the desired estimate (32).  $\square$

Using this result, we also have that

**Lemma 3.3.** *Let  $u$  be a sufficiently smooth function in  $\mathbb{R} \times I$  such that*

$$\text{supp } u(t) \subseteq [-B, B], \quad \text{for } t \in I.$$

Then we can choose  $\lambda_1 \in \mathbb{R}$ , with  $|\lambda_1|$  sufficiently large, such that for

$$|\sigma| < B^{-1}[1 + |\log a(\lambda_1)|]^{-1},$$

we have that

$$\sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\widehat{u(t_0)}(\xi + i\sigma)| \leq 2 \sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\widehat{u(t_0)}(\xi)|,$$

where  $t_0 \in I$  and  $\widehat{u(t_0)}(z)$  denotes the analytic extension of the Fourier transform of  $u(t_0)(x)$ .

*Proof.* Since  $\lim_{|\lambda| \rightarrow \infty} a(\lambda) = 0$ , then we can choose  $|\lambda_1|$  sufficiently large such that

$$|\sigma| < B^{-1}[1 + |\log a(\lambda_1)|]^{-1}$$

is small enough. Thus applying Lemma 3.2 we have that

$$\sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\widehat{u(t_0)}(\xi + i\sigma)| \leq 2 \sup_{|\xi| \geq \lambda_1} |\widehat{u(t_0)}(\xi)|. \quad \square$$

Now we present one of the main theorems in this work.

**Theorem 3.1.** *Let  $r_i$  and  $\partial_x r_j$  be continuous functions in  $\mathbb{R} \times I$  for  $i = 1, 2, 3$  and  $j = 1, 2$  with  $r_i, \partial_x r_j \in L^1(\mathbb{R})$  uniformly for  $t \in I$ , and such that  $\partial_x r_j(t), r_3(t) \in \mathcal{A}$  uniformly for  $t \in I$ . If  $u$  is a sufficiently smooth solution of the (KdV) equation with variable coefficients*

$$u_t + \gamma \partial_x^3 u + k r_1(t)(x) u^{k-1} \partial_x u + r_2(t)(x) \partial_x u + r_3(t)(x) u = 0 \quad (34)$$

in  $\mathbb{R} \times I$ , ( $k \geq 2$ ) such that

$$\text{supp } u(t) \subseteq [-B, B], \quad \text{for } t \in I.$$

Then  $u(x, t) = 0$  for all  $(x, t) \in \mathbb{R} \times I$ .

*Proof.* Hereafter we set

$$\begin{aligned} F(t)(x) &= F(t)(x, r_1, r_2, r_3, u, \partial_x u) \\ &= -(k r_1(t)(x) u^{k-1} \partial_x u + r_2(t)(x) \partial_x u + r_3(t)(x) u) \\ &= -(r_1(t)(x) \partial_x (u^k) + r_2(t)(x) \partial_x u + r_3(t)(x) u). \end{aligned}$$

We first note that  $\widehat{r_1(t)}$  and  $\widehat{r_2(t)}$  also have the global decay estimate (7), uniformly in  $t$ . In other words,  $r_1(t), r_2(t) \in \mathcal{A}$ , uniformly in  $t$ . In fact, using that  $r_i(t) \in L^1(\mathbb{R})$  uniformly in  $t$ , we have for  $i = 1, 2$ , that

$$|\widehat{r_i(t)}(\lambda)| < C.$$



Now, since the function  $f(\lambda) = \frac{e^{-|\lambda|}}{1+\lambda^2}$  is continuous and is never zero in  $[-1, 1]$ , there are positive constants  $k_i$  such that

$$|\widehat{r_i}(t)(\lambda)| \leq \frac{k_i e^{-|\lambda|}}{1+\lambda^2}, \quad \lambda \in [-1, 1].$$

But  $\partial_x r_i(t)$  satisfies condition (7) uniformly in  $t$ , implying for  $|\lambda| > 1$  that

$$|\widehat{r_i}(t)(\lambda)| \leq \frac{c_i e^{-|\lambda|}}{|\lambda|(1+\lambda^2)} \leq \frac{c_i e^{-|\lambda|}}{1+\lambda^2}.$$

Thus we conclude that there are positive constants  $c_i$  such that for  $t \in I$  and  $\lambda \in \mathbb{R}$ ,

$$|\widehat{r_i}(t)(\lambda)| \leq \frac{c_i e^{-|\lambda|}}{1+\lambda^2}.$$

Now we will argue by contradiction. In other words, assume that there are  $x_0 \in [-B, B]$  and  $t_0 \in I$  such that  $u(t_0)(x_0) \neq 0$ . Then, from the Paley–Wiener Theorem we know that  $\widehat{u}(t)$  has an analytic extension in  $\mathbb{C}$  and there is  $\kappa_1 > 0$  such that for  $t \in I$ ,

$$|\widehat{u}(t)(\lambda + i\sigma)| \leq \kappa_1 e^{|\sigma|B}, \quad \lambda, \sigma \in \mathbb{R}. \quad (35)$$

As in the introduction, using the semigroup associated to the linear equation

$$u_t + \gamma u_{xxx} = 0,$$

we know that Duhamel’s principle implies for  $t_1 \in I$  that the solution of (34) can be expressed as

$$\begin{aligned} u(t)(x) &= \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbb{R}} e^{i(\lambda x + \gamma \lambda^3(t-t_1))} \widehat{u}(t_1)(\lambda) d\lambda \\ &+ \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbb{R}} \left( \int_{t_1}^t e^{i(\lambda x + \gamma \lambda^3(t-\tau))} \widehat{F}(\tau)(\lambda) d\tau \right) d\lambda. \end{aligned}$$

This for fixed  $t_1, t_2 \in I$  we have that

$$\begin{aligned} u(t_2)(x) &= \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbb{R}} e^{i(\lambda x + \gamma \lambda^3(t_2-t_1))} \widehat{u}(t_1)(\lambda) d\lambda \\ &+ \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbb{R}} \left( \int_{t_1}^{t_2} e^{i(\lambda x + \gamma \lambda^3(t_2-\tau))} \widehat{F}(\tau)(\lambda) d\tau \right) d\lambda. \end{aligned}$$

Moreover, in terms of the Fourier transform

$$\widehat{u}(t_2)(\lambda) = e^{i\gamma \lambda^3 \Delta t} \left[ \widehat{u}(t_1)(\lambda) + \int_0^{\Delta t} e^{-i\gamma \lambda^3 \tau} \widehat{F}(\tau + t_1)(\lambda) d\tau \right],$$

where  $\Delta t = t_2 - t_1$ . We also have that the analytic extension of  $\widehat{u}(t_2)(\lambda)$ , for  $\lambda, \sigma \in \mathbb{R}$ , satisfies that

$$\begin{aligned} \widehat{u}(t_2)(\lambda + i\sigma) &= e^{i\gamma(\lambda+i\sigma)^3 \Delta t} \left[ \widehat{u}(t_1)(\lambda + i\sigma) \right. \\ &\left. + \int_0^{\Delta t} e^{-i\gamma(\lambda+i\sigma)^3 \tau} \widehat{F}(\tau + t_1)(\lambda + i\sigma) d\tau \right], \end{aligned}$$

since we also have that  $\widehat{F}(t)$  admits an analytic extension in  $\mathbb{C}$  ( $F(t)$  has compact support). Using that

$$(\lambda + i\sigma)^3 = (\lambda^3 - 3\lambda\sigma^2) + (3\sigma\lambda^2 - \sigma^3)i,$$

for  $\lambda, \sigma \in \mathbb{R}$  and  $t_1, t_2 \in I$ , we conclude that

$$\begin{aligned} |\widehat{u}(t_2)(\lambda+i\sigma)| &= e^{\gamma(\sigma^3-3\sigma\lambda^2)\Delta t} \left| \widehat{u}(t_1)(\lambda+i\sigma) \right. \\ &\left. + \int_0^{\Delta t} e^{-i\gamma(\lambda+i\sigma)^3 \tau} \widehat{F}(\tau+t_1)(\lambda+i\sigma) d\tau \right| \\ &\geq e^{\gamma(\sigma^3-3\sigma\lambda^2)\Delta t} \left[ \left| \widehat{u}(t_1)(\lambda+i\sigma) \right| \right. \\ &\left. - \int_0^{\Delta t} e^{\gamma(3\sigma\lambda^2-\sigma^3)\tau} \left| \widehat{F}(\tau+t_1)(\lambda+i\sigma) \right| d\tau \right]. \end{aligned}$$

Suppose that  $\lambda \in \mathbb{R}$  and that  $\sigma$  is such that  $\gamma\sigma\Delta t < 0$  with  $|\sigma| < 1$  then

$$\gamma(\sigma^3 - 3\sigma\lambda^2)\Delta t = (3\lambda^2 - \sigma^2)|\sigma\gamma\Delta t|.$$

Using (35), we conclude for  $\kappa = \kappa_1 e^B$  that

$$\begin{aligned} \kappa > \kappa_1 e^{|\sigma|B} &\geq e^{-\sigma^2|\gamma\sigma\Delta t|} e^{3\lambda^2|\gamma\sigma\Delta t|} \left[ \left| \widehat{u}(t_1)(\lambda+i\sigma) \right| - \int_0^{\Delta t} e^{3\gamma\lambda^2\sigma\tau} e^{-\gamma\sigma^3\tau} \left| \widehat{F}(t_1+\tau)(\lambda+i\sigma) \right| d\tau \right] \\ &\geq e^{-\sigma^2|\gamma\sigma\Delta t|} e^{3\lambda^2|\gamma\sigma\Delta t|} \left[ \left| \widehat{u}(t_1)(\lambda+i\sigma) \right| - A \int_0^{\Delta t} e^{-\lambda^2|3\gamma\sigma\tau|} \left| \widehat{F}(t_1+\tau)(\lambda+i\sigma) \right| d\tau \right], \end{aligned}$$

where  $A = e^{2|\gamma|T}$ . Observe for  $\Delta t > 0$  that

$$\int_0^{\Delta t} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma\tau|} \left| \widehat{F}(t_1+\tau)(\lambda+i\sigma) \right| d\tau = \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma|\tau} \left| \widehat{F}(t_1+\tau)(\lambda+i\sigma) \right| d\tau, \quad (36)$$

and for  $\Delta t < 0$ ,

$$\int_0^{\Delta t} e^{-3\sigma^2|\gamma\sigma\tau|} \left| \widehat{F}(t_1+\tau)(\lambda+i\sigma) \right| d\tau = - \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma|\tau} \left| \widehat{F}(t_1-\tau)(\lambda+i\sigma) \right| d\tau. \quad (37)$$



Then without loss of generality we can use either (36) or (37). Thus for  $t_1, t_2 \in I$  and  $A = e^{2|\gamma|T}$ , we have that

$$\kappa e^{\sigma^2|\gamma\sigma\Delta t|} > e^{3\lambda^2|\gamma\sigma\Delta t|} \left[ |\widehat{u}(t_1)(\lambda + i\sigma)| - A \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma|\tau} |F(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda + i\sigma)| d\tau \right]. \quad (38)$$

But we know that

$$(\widehat{f\partial_x g})(\lambda) = i\lambda(\widehat{fg})(\lambda) - (\widehat{\partial_x fg})(\lambda), \quad \text{and} \quad (\widehat{f_1 \cdots f_k})(\lambda) = (\widehat{f_1} * \cdots * \widehat{f_k})(\lambda).$$

Then for any  $t \in I$ ,

$$\begin{aligned} \widehat{F}(t)(\lambda) &= -i\lambda(\widehat{r_1(t) * u(t)} * \cdots * \widehat{u(t)})(\lambda) + (\widehat{\partial_x r_1(t) * u(t)} * \cdots * \widehat{u(t)})(\lambda) \\ &\quad - i\lambda(\widehat{r_2(t) * u(t)})(\lambda) + (\widehat{\partial_x r_2(t) * u(t)})(\lambda) - (\widehat{r_3(t) * u(t)})(\lambda) \end{aligned}$$

Since  $|\sigma| < 1$ , then for  $|\lambda| > 1$  we have that  $|\lambda + i\sigma| < 2|\lambda|$ . Using this

$$\begin{aligned} |\widehat{F}(t)(\lambda + i\sigma)| &\leq |\lambda + i\sigma| \left| (\widehat{r_1(t) * u(t)} * \cdots * \widehat{u(t)})(\lambda + i\sigma) \right| + \\ &\quad \left| (\widehat{\partial_x r_1(t) * u(t)} * \cdots * \widehat{u(t)})(\lambda + i\sigma) \right| + |\lambda + i\sigma| \left| (\widehat{r_2(t) * u(t)})(\lambda + i\sigma) \right| + \\ &\quad \left| (\widehat{\partial_x r_2(t) * u(t)})(\lambda + i\sigma) \right| + \left| (\widehat{r_3(t) * u(t)})(\lambda + i\sigma) \right| \\ &< 2|\lambda| \widehat{G}(t)(\lambda + i\sigma), \end{aligned}$$

where  $G$  is defined by

$$\begin{aligned} \widehat{G}(t)(z) &= \left| (\widehat{r_1(t) * u(t)} * \cdots * \widehat{u(t)})(z) \right| + \left| (\widehat{\partial_x r_1(t) * u(t)} * \cdots * \widehat{u(t)})(z) \right| \\ &\quad + \left| (\widehat{r_2(t) * u(t)})(z) \right| + \left| (\widehat{\partial_x r_2(t) * u(t)})(z) \right| + \left| (\widehat{r_3(t) * u(t)})(z) \right|. \end{aligned}$$

For convenience we set  $\beta_1 = r_1$ ,  $\beta_2 = \partial_x r_1$ ,  $\beta_3 = r_2$ ,  $\beta_4 = \partial_x r_2$ , and  $\beta_5 = r_3$ . Then for  $t_1, t_2 \in I$ ,  $|\lambda| > 1$ ,  $|\sigma| < 1$  we have that

$$\kappa e^{\sigma^2|\gamma\sigma\Delta t|} > e^{3\lambda^2|\gamma\sigma\Delta t|} \left[ |\widehat{u}(t_1)(\lambda + i\sigma)| - 2A|\lambda| \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma|\tau} |G(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda + i\sigma)| d\tau \right]. \quad (39)$$

Note now that

$$\begin{aligned} |\widehat{u}(t_1)(\lambda + i\sigma)| - 2A|\lambda| \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma|\tau} |G(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda + i\sigma)| d\tau \\ \geq |\widehat{u}(t_1)(\lambda)| - 2A|\lambda| \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma|\tau} |G(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda)| d\tau \\ \quad - |\widehat{u}(t_1)(\lambda + i\sigma) - \widehat{u}(t_1)(\lambda)| \\ - 2A|\lambda| \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma|\tau} |G(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda + i\sigma) - G(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda)| d\tau. \end{aligned}$$

Then choosing  $c$ ,  $t_1$  and  $\lambda$  ( $|\lambda|$  large enough) as in Lemma 2.7, with  $Q > 0$ , which will be specified below, and  $\sigma = \sigma(\lambda)$  such that

$$1 - \frac{2A}{3c|\gamma\sigma\lambda|} > \frac{1}{2}, \quad (40)$$

we have that

$$\begin{aligned}
& |\widehat{u}(t_1)(\lambda)| - 2A|\lambda| \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma|\tau} |G(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda)| d\tau \\
&= a(\lambda) - 2A|\lambda| \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma|\tau} \left[ \left| \left( \beta_1(\widehat{t_1 + \tau}) * u(\widehat{t_1 + \tau}) * \cdots * u(\widehat{t_1 + \tau}) \right)(\lambda) \right| \right. \\
&\quad \left. + \left| \left( \beta_2(\widehat{t_1 + \tau}) * u(\widehat{t_1 + \tau}) * \cdots * u(\widehat{t_1 + \tau}) \right)(\lambda) \right| \right. \\
&\quad \left. + \left| \left( \beta_3(\widehat{t_1 + \tau}) * u(\widehat{t_1 + \tau}) \right)(\lambda) \right| + \left| \left( \beta_4(\widehat{t_1 + \tau}) * u(\widehat{t_1 + \tau}) \right)(\lambda) \right| \right. \\
&\quad \left. + \left| \left( \beta_5(\widehat{t_1 + \tau}) * u(\widehat{t_1 + \tau}) \right)(\lambda) \right| \right] d\tau \\
&\geq a(\lambda) - 2A|\lambda| \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma|\tau} \left[ (a_{\beta_1} * a * \cdots * a)(\lambda) + (a_{\beta_2} * a * \cdots * a)(\lambda) \right. \\
&\quad \left. + (a_{\beta_3} * a)(\lambda) + (a_{\beta_4} * a)(\lambda) + (a_{\beta_5} * a)(\lambda) \right] d\tau \\
&> a(\lambda) - 2Ac^{-1}|\lambda|a(\lambda) \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma|\tau} d\tau \\
&= a(\lambda) - \frac{2A|\lambda|}{3c|\gamma\sigma|\lambda^2} \left( 1 - e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma|\Delta t} \right) a(\lambda) > a(\lambda) - \frac{2A}{3c|\gamma\sigma\lambda|} a(\lambda) > \frac{1}{2}a(\lambda). \tag{41}
\end{aligned}$$

From the generalized Mean Value Theorem, there is  $\sigma_0 \in \mathbb{R}$ ,  $|\sigma_0| < |\sigma|$ , such that

$$\begin{aligned}
|\widehat{u}(t_1)(\lambda + i\sigma) - \widehat{u}(t_1)(\lambda)| &\leq |\sigma| |(u(t_1))'(\lambda + i\sigma_0)| \\
&\leq |\sigma| \sup_{|\xi| \geq |\lambda|} |(u(t_1))'(\xi + i\sigma_0)|
\end{aligned}$$

then if  $\mu$  and  $\rho$  are as in Theorem 1.3 and in Lemma 3.1 respectively, and  $\sigma$  is such that

$$\begin{aligned}
|\sigma| &< (8\mu\rho B)^{-1} (1 + |\log a(\lambda)|)^{-1} \\
&< (8\mu B)^{-1} (1 + |\log a(\lambda)|)^{-1} \\
&< B^{-1} (1 + |\log a(\lambda)|)^{-1} < 1,
\end{aligned}$$

we conclude (using Lemma 3.3, Theorem 1.3 and recalling that  $|\lambda|$  is large enough) that

$$\begin{aligned}
|\widehat{u}(t_1)(\lambda + i\sigma) - \widehat{u}(t_1)(\lambda)| &\leq \mu B |\sigma| \left( \sup_{|\xi| \geq |\lambda|} |\widehat{u}(t_1)(\xi)| \right) \times \\
&\quad \left[ 1 + \log \left( \sup_{|\xi| \geq |\lambda|} |\widehat{u}(t_1)(\xi)| \right) \right] \\
&= \mu B |\sigma| a(\lambda) [1 + |\log a(\lambda)|] < \frac{1}{8} a(\lambda). \tag{42}
\end{aligned}$$

We now claim that the conditions imposed to  $\lambda$  and  $\sigma(\lambda)$  are verifiable. If  $A_1 = \frac{2A}{3|\gamma|c}$ , then we will see that

$$1 - \frac{A_1}{|\sigma\lambda|} > \frac{1}{2}$$

which is equivalent to have

$$\frac{2A_1}{|\lambda|} < |\sigma|, \tag{43}$$

then we can choose  $\lambda$  such that  $\frac{2A_1}{|\lambda|} < 1$ . But we also must have that

$$|\sigma| < (8\mu\rho B)^{-1} (1 + |\log a(\lambda)|)^{-1} < 1,$$

meaning that  $\lambda$  must be such that

$$\frac{A_2}{|\lambda|} < \frac{1}{1 + |\log a(\lambda)|} \text{ and } \frac{1}{B(1 + |\log a(\lambda)|)} < 1, \tag{44}$$

where  $A_2 = 16A_1\mu\rho B$ . The second inequality is reached by choosing  $\lambda$  large enough, since  $\lim_{\lambda \rightarrow \infty} a(\lambda) = 0$ . For the first inequality, we must recall that given  $Q > 0$  we can take  $\lambda$  such that

$$a(\lambda) > e^{-\frac{|\lambda|}{Q}}.$$

As a consequence of this, if we take  $Q$  such that  $\frac{2}{Q} < \frac{1}{A_2}$  and  $|\lambda| > Q$  we conclude that

$$|\log a(\lambda)| < \frac{|\lambda|}{Q},$$

implying that

$$1 + |\log a(\lambda)| < \frac{2|\lambda|}{Q} < \frac{|\lambda|}{A_2},$$

and obtaining the desired condition. Now we will establish an estimate for the expression

$$2A|\lambda| \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma|\tau} |G(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda + i\sigma) - G(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda)| d\tau.$$

For  $t \in I$ , we have that

$$\begin{aligned} & \left| \left( \widehat{\beta_1}(t) * \widehat{u}(t) * \dots * \widehat{u}(t) \right) (\lambda + i\sigma) - \left( \widehat{\beta_1}(t) * \widehat{u}(t) * \dots * \widehat{u}(t) \right) (\lambda) \right| \\ &= \left| \int_{\mathbb{R}^k} \widehat{u}(t)(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k + i\sigma) \widehat{u}(t)(\lambda_1) \dots \widehat{u}(t)(\lambda_{k-1}) \widehat{\beta_1}(t)(\lambda_k) d\lambda_1 \dots d\lambda_k \right. \\ & \quad \left. - \int_{\mathbb{R}^k} \widehat{u}(t)(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) \widehat{u}(t)(\lambda_1) \dots \widehat{u}(t)(\lambda_{k-1}) \widehat{\beta_1}(t)(\lambda_k) d\lambda_1 \dots d\lambda_k \right| \\ &\leq \int_{\mathbb{R}^k} \left| \widehat{u}(t)(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k + i\sigma) - \widehat{u}(t)(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) \right| \left| \widehat{u}(t)(\lambda_1) \right| \\ & \quad \dots \left| \widehat{u}(t)(\lambda_{k-1}) \right| \left| \widehat{\beta_1}(t)(\lambda_k) \right| d\lambda_1 \dots d\lambda_k \\ &\leq \int_{\mathbb{R}^k} \left| \widehat{u}(t)(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k + i\sigma) - \widehat{u}(t)(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) \right| a(\lambda_1) \\ & \quad \dots a(\lambda_{k-1}) a_{\beta_1}(\lambda_k) d\lambda_1 \dots d\lambda_k. \end{aligned}$$

From the generalized Mean Value Theorem, there is  $\sigma_1 \in \mathbb{R}$  with  $|\sigma_1| < |\sigma|$  such that

$$\left| \widehat{u}(t)(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k + i\sigma) - \widehat{u}(t)(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) \right| \leq |\sigma| \left| (\widehat{u}(t))'(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k + i\sigma_0) \right|.$$

Now, taking  $\bar{\lambda} = \min\{|\lambda|, |\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k|\}$ , and using Theorem 1.3, we conclude that

$$\begin{aligned} & \left| \widehat{u}(t)(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k + i\sigma) - \widehat{u}(t)(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) \right| \leq |\sigma| \sup_{|\xi| \geq |\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k|} \left| (\widehat{u}(t))'(\xi + i\sigma_0) \right| \\ & \leq |\sigma| \sup_{|\xi| \geq \bar{\lambda}} \left| (\widehat{u}(t))'(\xi + i\sigma_0) \right| \leq \mu B |\sigma| \left( \sup_{|\xi| \geq \bar{\lambda}} |\widehat{u}(t)(\xi)| \right) \left[ 1 + \left| \log \left( \sup_{|\xi| \geq \bar{\lambda}} |\widehat{u}(t)(\xi)| \right) \right| \right] \\ & \leq \mu B |\sigma| \left( \sup_{|\xi| \geq \bar{\lambda}} \sup_{t \in I} |\widehat{u}(t)(\xi)| \right) \left[ 1 + \left| \log \left( \sup_{|\xi| \geq \bar{\lambda}} \sup_{t \in I} |\widehat{u}(t)(\xi)| \right) \right| \right] \\ & \leq \mu B |\sigma| a(\bar{\lambda}) (1 + |\log a(\bar{\lambda})|). \end{aligned}$$

Then using the estimate (31) in Lemma 3.1, we obtain that

$$\begin{aligned} & \left| \widehat{u}(t)(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k + i\sigma) - \widehat{u}(t)(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k) \right| \\ & \leq \mu \rho B |\sigma| (a(\lambda) + a(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k)) (1 + |\log a(\lambda)|) \\ & \leq a(\lambda) + a(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k). \end{aligned}$$

As a consequence of this, for  $t \in I$ ,

$$\begin{aligned} & \left| \left( \widehat{\beta_1(t)} * \widehat{u(t)} * \dots * \widehat{u(t)} \right) (\lambda + i\sigma) - \left( \widehat{\beta_1(t)} * \widehat{u(t)} * \dots * \widehat{u(t)} \right) (\lambda) \right| \\ & \leq \int_{\mathbb{R}^k} [a(\lambda) + a(\lambda - \lambda_1 - \dots - \lambda_k)] a(\lambda_1) \dots a(\lambda_{k-1}) a_{\beta_1}(\lambda_k) d\lambda_1 \dots d\lambda_k \\ & = C_1 a(\lambda) + (a_{\beta_1} * a * \dots * a)(\lambda), \end{aligned}$$

where the constant  $C_1$  is taken as

$$C_1 = \left( \int_{\mathbb{R}} a_{\beta_1}(\zeta) d\zeta \right) \left( \int_{\mathbb{R}} a(\zeta) d\zeta \right)^{k-1}.$$

In a similar fashion, it can be shown the existence of positive constants  $C_2, C_3, C_4$  and  $C_5$  such that for  $j = 3, 4, 5$

$$\begin{aligned} & \left| \left( \widehat{\beta_2(t)} * \widehat{u(t)} * \dots * \widehat{u(t)} \right) (\lambda + i\sigma) - \left( \widehat{\beta_2(t)} * \widehat{u(t)} * \dots * \widehat{u(t)} \right) (\lambda) \right| \leq C_2 a(\lambda) + (a_{\beta_2} * a * \dots * a)(\lambda), \\ & \left| \left( \widehat{\beta_j(t)} * \widehat{u(t)} \right) (\lambda + i\sigma) - \left( \widehat{\beta_j(t)} * \widehat{u(t)} \right) (\lambda) \right| \leq C_j a(\lambda) + (a_{\beta_j} * a)(\lambda). \end{aligned}$$

These facts imply that there is a positive constant  $C > 0$  such that

$$\begin{aligned} |G(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda + i\sigma) - G(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda)| & \leq C a(\lambda) + (a_{\beta_1} * a * \dots * a)(\lambda) \\ & \quad + (a_{\beta_2} * a * \dots * a)(\lambda) + (a_{\beta_3} * a)(\lambda) + (a_{\beta_4} * a)(\lambda) + (a_{\beta_5} * a)(\lambda). \end{aligned}$$

Again, from Lemma 2.7, we have that

$$\begin{aligned} 2A \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma|\tau} |G(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda + i\sigma) - G(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda)| d\tau & \leq 2A(C + c^{-1})a(\lambda) \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma|\tau} d\tau \\ & \leq \frac{2A(C + c^{-1})}{3|\gamma\sigma\lambda^2|} a(\lambda) < \frac{a(\lambda)}{8|\lambda|}, \end{aligned} \tag{45}$$

taking  $\lambda$  and  $\sigma$  such that

$$\frac{16A(C + c^{-1})}{3|\gamma\lambda|} < |\sigma| < 1.$$

Now, arguing as in (43) and (44), we can choose  $\lambda$  and  $\sigma(\lambda)$  with this condition satisfying

$$\frac{1}{3|\gamma\lambda|} < |\sigma|. \tag{46}$$

Thus, by choosing  $t_1, \lambda$  and  $\sigma(\lambda)$ , and also with (39), (41), (42) and (45), we have that for some positive constant  $\kappa$  that

$$\kappa e^{\sigma^2|\gamma\sigma\Delta t|} > e^{3\lambda^2|\gamma\sigma\Delta t|} \left[ \frac{1}{2}a(\lambda) - \frac{1}{8}a(\lambda) - \frac{1}{8}a(\lambda) \right].$$

In other words, we have shown that

$$a(\lambda) < 4\kappa e^{\sigma^2|\gamma\sigma\Delta t|} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma\Delta t|}.$$

Thus choosing  $t_2 \in I$  such that  $T \leq |\Delta t| \leq 2T$  and using Lemma 2.7 and condition (46) we conclude that

$$e^{-\frac{|\lambda|}{\sigma}} < a(\lambda) < 4\kappa e^{2|\gamma|T} e^{-\lambda T},$$

which is equivalent to have

$$e^{|\lambda|T} < A_3 e^{\frac{|\lambda|}{\sigma}},$$

with  $A_3 = 4\kappa e^{2|\gamma|T}$ . But this is a contradiction taking  $Q(T)$  large enough.

The first consequence of the proof of previous result is the extension of the unique continuation result due to **J. Bourgain** for equation (34) for variable coefficients depending only on  $t$ . The proof does not require imposing any decay condition on the coefficients.

**Theorem 3.2.** *Let  $r_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) be continuous functions in  $I$ . If  $u$  is a sufficiently smooth solution of the (KdV) equation with variable coefficients*

$$u_t + \gamma \partial_x^3 u + k r_1(t) u^{k-1} \partial_x u + r_2(t) \partial_x u + r_3(t) u = 0, \tag{47}$$

such that

$$\text{supp } u(t)(\cdot) \subseteq [-B, B], \quad \text{for } t \in I.$$

then  $u(x, t) = 0$  for  $(x, t) \in \mathbb{R} \times I$ .

*Proof.* Let  $F$  be defined as

$$\begin{aligned} F(t)(x) &= F(t)(x, r_1, r_2, r_3, u, \partial_x u) \\ &= -(kr_1(t)u^{k-1}\partial_x u + r_2(t)\partial_x u + r_3(t)u) \\ &= -(r_1(t)\partial_x(u^k) + r_2(t)\partial_x u + r_3(t)u). \end{aligned}$$

As in Theorem 3.1, there is  $\kappa > 0$  such that for  $t_1, t_2 \in I$ ,  $\Delta t = t_2 - t_1$ ,  $\gamma\sigma\Delta t < 0$  and  $|\sigma| < 1$ , we have that

$$\begin{aligned} \kappa e^{\sigma^2|\gamma\sigma\Delta t|} &> e^{3\lambda^2|\gamma\sigma\Delta t|} \left[ |u(t_1)(\lambda + i\sigma)| \right. \\ &\quad \left. - A \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\lambda^2|\gamma\sigma|\tau} |F(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda + i\sigma)| d\tau \right], \end{aligned}$$

Moreover, we also have that

$$\begin{aligned} |u(t_1)(\lambda + i\sigma)| - 2A|\lambda| \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\gamma\lambda^2|\sigma|\tau} |G(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda + i\sigma)| d\tau \\ \geq |u(t_1)(\lambda)| - 2A|\lambda| \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\gamma|\sigma|\lambda^2\tau} |G(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda)| d\tau \\ - |u(t_1)(\lambda + i\sigma) - u(t_1)(\lambda)| \\ - 2A|\lambda| \int_0^{|\Delta t|} e^{-3\gamma|\sigma|\lambda^2\tau} |G(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda + i\sigma) - G(\widehat{t_1 + \tau})(\lambda)| d\tau, \end{aligned}$$

then using Lemma 2.4 and proceeding as in the proof of Theorem 3.1 we obtain the result.  $\square$

As a consequence of the previous Theorem, we obtain a uniqueness result for the (KdV) equation.

**Corollary 3.1.** *Let  $u, v$  solutions of the (KdV) equation*

$$u_t + \partial_x^3 u + u\partial_x u = 0 \text{ en } \mathbb{R} \times \mathbb{R}, \quad (48)$$

*such that for  $\delta > 0$ ,  $u(t), v(t) \in H^{2+\delta}(\mathbb{R})$  and  $\partial_x u(t), \partial_x v(t) \in \mathcal{A}$  uniformly for  $t \in \mathbb{R}$ . If  $u(x, t) = v(x, t)$  for  $(x, t) \in \left([-B, B] \times I\right)^c$ , then  $u(x, t) = v(x, t)$ , for  $(x, t) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}$ .*

*Proof.* Clearly, the Hölder inequality implies that  $u(t), \partial_x u(t), \partial_x v(t) \in L^1(\mathbb{R})$  uniformly for  $t \in I$ . Thus we have that  $w = u - v$  is a solution of the (KdV) type equation with variable coefficients

$$w_t + \partial_x^3 w + u(x, t)\partial_x w + \partial_x v(x, t)w = 0,$$

such that

$$\text{supp } w(t)(\cdot) \subseteq [-B, B], \quad \text{for } t \in I.$$

with  $A = e^{2|\gamma|T}$ . Then,

$$\begin{aligned} \widehat{F}(t)(\lambda) &= - \left( \lambda r_1(t) \left[ \widehat{u}(t) * \dots * \widehat{u}(t) \right] (\lambda) \right. \\ &\quad \left. + \lambda r_2(t) \widehat{u}(t)(\lambda) + r_3(t) \widehat{u}(t)(\lambda) \right). \end{aligned}$$

For  $|\lambda| > 1$  large enough,

$$\begin{aligned} |\widehat{F}(t)(\lambda + i\sigma)| &< 2|\lambda| \left[ |r_1(t)| (|\widehat{u}(t)| * \dots * |\widehat{u}(t)|)(\lambda + i\sigma) \right. \\ &\quad \left. + |r_2(t)| |\widehat{u}(t)(\lambda + i\sigma)| + |r_3(t)| |\widehat{u}(t)(\lambda + i\sigma)| \right] \\ &< 2|\lambda| \left[ R_1 (|\widehat{u}(t)| * \dots * |\widehat{u}(t)|)(\lambda + i\sigma) \right. \\ &\quad \left. + (R_2 + R_3) |\widehat{u}(t)(\lambda + i\sigma)| \right] \leq 2|\lambda| \widehat{G}(t)(\lambda + i\sigma) \end{aligned}$$

where  $R_i = \sup_{t \in I} |r_i(t)|$ , and

$$\widehat{G}(t)(z) = R_1 (|\widehat{u}(t)| * \dots * |\widehat{u}(t)|)(z) + (R_2 + R_3) |\widehat{u}(t)(z)|.$$

Then from Theorem 3.1, we conclude that  $u(x, y) = v(x, y)$  for  $(x, t) \in [-B, B] \times I$ .  $\square$

**Acknowledgments:** This work was developed during JRQ sabbatical year (01/2009-01/2010), supported by Universidad del Valle (Colombia) (research project C. I. 791). AMMP thanks to Universidad del Cauca and Universidad del Valle for their support while being in the graduate program at Universidad del Valle.

## Bibliography

- [1] Bourgain, J. *On the compactness of the support of solutions of dispersive equations.* IMRN int. Math. Res. Notices **9** (1997), 437–447.
- [2] Grimshaw, R. *Evolution equations for long nonlinear internal waves in stratified shear flows.* Stud. Appl. Math. **65** (1981), 159–188.



- [3] **Johnson, R.** *On an asymptotic solution of the Korteweg-de Vries equation with slowly varying coefficients.* J. Fluid Mech., **60** (1973), 813-824.
- [4] **Kenig, C.; Ponce, G.; Vega, L.** *On the Support of Solutions to the Generalized KdV Equation.* Ann. I. H. Poincaré **19** (2) (2002), 191-208.
- [5] **Kenig, C.; Ponce, G.; Vega L.** *Higher-order nonlinear dispersive equations.* Proc. Amer. Math. Soc. **122** (1994), 157-166.
- [6] **Saut, J.; Scheurer, B.** *Unique Continuation for Some Evolution Equations.* Journal Of Differential Equations **66** (1987), 118-139.
- [7] **Zhang, B.** *Unique Continuation for the Korteweg-de Vries equation.* Siam J. Math. Anal. **23** (1) (1992), 55-71.

Recibido el 27 de agosto de 2009

Aceptado para su publicación el 15 de marzo de 2010

# ***PSEUDOPTEROGORGIA ELISABETHAE* DE SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA, UNA PLUMA DE MAR CON EXCELENTE POTENCIAL COMO FUENTE DE PRODUCTOS NATURALES CON APLICACIÓN INDUSTRIAL**

Por

Carmenza Duque<sup>1,2</sup>

## Resumen

**Duque, Carmenza:** *Pseudopterogorgia Elisabethae* de San Andrés y Providencia, una pluma de mar con excelente potencial como fuente de productos naturales con aplicación industrial. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (130): 89-103, 2010. ISSN 0370-3908.

*Pseudopterogorgia elisabethae* una interesante pluma de mar que crece en las islas de San Andrés y Providencia (Caribe Colombiano nor-occidental), ha sido sujeto de estudios bioprospectivos por nosotros durante los últimos 7 años. En la primera etapa de la investigación se recolectaron fragmentos de colonias individuales en varios sitios y a diferentes profundidades alrededor de las Islas de San Andrés y Providencia. Luego de preparar extractos con  $\text{CH}_2\text{Cl}_2/\text{MeOH}$  y de someterlos a Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia acoplada a Espectrometría de Masas se establecieron según la composición mostrada por el perfil cromatográfico dos quimiotipos diferentes para *Pseudopterogorgia elisabethae*, el quimiotipo 1 para especímenes provenientes de la Isla de Providencia y el quimiotipo 2 para colonias establecidas en la Isla de San Andrés. El quimiotipo 1 fué característico y exclusivo de los animales recolectados en Providencia, pero el quimiotipo 2 aunque muy abundante en los animales recolectados en San Andrés, ocasionalmente fue encontrado en animales de la Isla de Providencia.

Aplicando métodos cromatográficos, espectroscópicos y de transformaciones químicas a los dos conjuntos de extractos reunidos de cada quimiotipo, se logró establecer que el quimiotipo 1 presentó como constituyentes mayoritarios una mezcla compleja (4-16%) de aproximadamente trece compuestos tipo pseudopterosinas, *seco*-pseudopterosinas y amflectosinas. Estos compuestos se

1 Miembro Correspondiente Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Apartado 44763, Bogotá, D. C., Colombia. Correo Electrónico: [cduqueb@etb.net.co](mailto:cduqueb@etb.net.co)

2 Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Química, Bogotá, Colombia. Correo Electrónico: [cduqueb@unal.edu.co](mailto:cduqueb@unal.edu.co)

aislaron e identificaron como sigue: ocho con estructura no reportada anteriormente, las pseudopterosinas P-S, glicosidadas en el C-10 con L-fucosa libre y acetiladas en los C-4', C-3' y C-2' respectivamente, las pseudopterosinas T-V glicosidadas en el C-10 con D-arabinosa libre y acetiladas en los C-4' y C-3', respectivamente y la *seco*-pseudopterosina K, glicosidada en el C-7 con L-fucosa libre, y cinco de estructura conocida las pseudopterosinas G y K, la *seco*-pseudopterosina J y las amfilectosinas A y B.

El quimiotipo 2 se caracterizó por tener bajas concentraciones (2-4%) de las mismas pseudopterosinas y *seco*-pseudopterosinas mencionadas anteriormente, pero en contraste sus constituyentes mayoritarios fueron una mezcla en equilibrio de diterpenos no glicosidados (MEDNG) tipo amfilectano denominados 10-acetoxi-9-hidroxi—amfilecta-8,10,12,14 tetraeno y 9-acetoxi-10-hidroxi-amfilecta-8,10,12,14 tetraeno, junto con dos componentes minoritarios el elisabetatrienol y la amfilecta-8(13),11,14-trieno-9,10-diona.

Paso seguido los extractos crudos de los dos quimiotipos fueron sometidos a evaluación de sus propiedades antiinflamatorias en bioensayos *in vivo* usando el modelo clásico de inflamación aguda (edema en oreja de ratón) y la inhibición del mediador de inflamación MPO liberado en el edema formado. Los resultados mostraron para los extractos, bajos niveles de inhibición de la inflamación en el edema auricular comparados con el estándar de indometacina utilizado, en contraste los dos extractos mostraron una marcada inhibición del mediador de inflamación MPO, inclusive superior a la indometacina. Adicionalmente, en el ensayo de inhibición de MPO *in vitro*, los compuestos MEDNG, PsQ, PsS, PsT y PsU mostraron niveles mas altos de inhibición de la inflamación que los exhibidos por los estándares dexametasona e indometacina. En los ensayos de liberación de NO *in vitro*, los tratamientos mas potentes fueron los compuestos MEDNG, la PsP y la PsT. Por otro lado las PsQ, PsS y PsU fueron potentes agentes captadores de NO, y como las PsG, PsP y *seco*-PsK no tuvieron actividad captadora de NO, suponemos que ellos deben estar inhibiendo la sintasa de NO (iNOS) u otras rutas que influyen la producción de esta enzima.

En los estudios de citotoxicidad usando el ensayo de MTT con cinco líneas tumorales: HEp-2 (carcinoma de laringe), MKN-45 (carcinoma de estomago), HT-29 (adenocarcinoma de colon), MCF-7 (adenocarcinoma de mama) y HeLa (carcinoma de cervix) y dos cultivos de fibroblastos normales Fib 04 (epitelio bucal humano) y Fib 05 (tejido de cordón umbilical humano), los resultados mostraron que ambos extractos tanto el del quimiotipo 1 como el del quimiotipo 2, presentaron una actividad citotóxica promisoriosa sobre las líneas tumorales empleadas, observándose una reducción de la supervivencia en todas las líneas celulares usadas. Sin embargo, el extracto del quimiotipo 1 fue mas potente en citotoxicidad que el del quimiotipo 2.

En los ensayos de actividad antimicrobiana, los resultados demostraron que todas las pseudopterosinas, *seco*-pseudopterosinas y MEDGN aislados de *P. elisabethae*, tienen actividad selectiva contra bacterias marinas *gram* positivas y contra bacterias terrestres patógenas *gram* positivas (con valores de IC<sub>50</sub> entre 1.4 y 17 µg/ml), pero no tienen actividad contra el hongo evaluado.

Finalmente, en los ensayos antifouling realizados (usando organismos representantes del *microfouling* y del *macrofouling*) los resultados mostraron que el quimiotipo 1 (fracciones que contienen pseudopterosinas) y las PsQ y U (las demás pseudopterosinas y *seco*-pseudopterosinas aisladas de los ejemplares de Providencia y San Andrés, están aún en fase de valoración) tienen propiedades *antifouling* en concentraciones promedio de 1 mg/ml contra los organismos ensayados, lo que hace estos compuestos muy atractivos para posteriores valoraciones en campo como agentes ambientalmente amigables.

En conclusión los resultados aquí presentados demuestran que los compuestos aislados de esta pluma de mar *P. elisabethae* de San Andrés y Providencia son moléculas promisorias con un perfil de actividad antiinflamatoria, citotóxica, antibacteriana y antifouling muy interesante, lo cual hace de este recurso una fuente muy atractiva de compuestos que pueden ser utilizados industrialmente.

**Palabras clave:** biodiversidad marina, bioprospección, plumas de mar, *Pseudopterogorgia elisabethae*, pseudopterósinos, *seco*-pseudopterósinos, compuestos antiinflamatorios, compuestos citotóxicos, compuestos antimicrobianos, compuestos *antifouling*.

### Abstract

*Pseudopterogorgia elisabethae* an interesting sea feather found in the islands of San Andres and Providencia (SW Colombian Caribbean), has been the subject of our research studies for the last 7 years. In the first step of the studies here presented we collected fragments of individual colonies at various sites and depth ranges around the islands. Collected samples were extracted with  $\text{CH}_2\text{Cl}_2/\text{MeOH}$  and then subjected to HPLC-MS. Chromatographic profiles of the extracts, allowed us to recognize two different chemotypes for *P. elisabethae*. Chemotype 1 characterized samples from Providencia whereas chemotype 2 characterized samples from San Andres. Chemotype 1 was characteristic and exclusive of samples collected at Providencia. Chemotype 2 was characteristic but not exclusive to samples collected at San Andres, occasionally was found in samples from Providencia.

Each extract from the both chemotypes was fractionated by chromatographic means and the pure isolated compounds thus obtained were carefully identified by spectroscopic and chemical methods. A complex mixture (4-16%) of 13 compounds (pseudopterósinos, *seco*-pseudopterósinos and amphilectosins) characterized chemotype 1. Those were identified as follows: eight new compounds in nature, PsP, Q, R, and S glycosylated at C-10 with free and acetylated at C-4', C-3' and C-2' L-fucose, respectively, PsT, U and V glycosylated with D-arabinose free and acetylated at C-4' and C-3', respectively and the *seco*-PsK, glycosylated at C-7 with free L-fucose and five known compounds, PsG, K, *seco*-PsJ and amphilectosins A and B.

Chemotype 2 contained lesser amounts (2-4%) of the compounds mentioned above. In contrast it showed as major constituents an interconverting 1:1 mixture of non glycosylated amphilectane type diterpenes (IMNGD) (10-acetoxi-9-hydroxy-amphilecta-8,10,12,14 tetraene and 9-acetoxi-10-hydroxy-amphilecta-8,10,12,14 tetraene) and minor amounts of elisabethatrienol and amphilecta-8(13),11,14-triene-9,10-dione.

7

Subsequently, the evaluation of the anti-inflammatory properties *in vivo* of extracts (chemotype 1 and chemotype 2) was carried out by using the TPA-induced ear oedema model, classical experiment of acute inflammation and by inhibiting the MPA mediator released to the oedema tissues. The results showed relatively low levels of inflammation inhibition, when compared to the activity showed by the anti-inflammatory commercial drug indomethacin. In contrast, we found marked inhibition of MPO levels by both extracts, even superior to the inhibition shown by indomethacin. Additionally, in the *in vitro* MPO assay IMNGD, PsQ, PsS, PsT and PsU exhibited higher levels of inhibition compared with indomethacin and dexamethasone. In the NO release *in vitro*, IMNGD, PsP and PsT were the most potent treatments. On the other hand, PsQ, PsS and PsU did show NO scavenger activity but PsG, PsP and *seco*-PsK did not exhibit any scavenger activity. The latter compounds should inhibit the inducible Nitric Oxide Synthase (iNOS) or other routes that influence this enzyme.

The cytotoxicity activity of the compounds isolated from *P. elisabethae* was studied by the MTT assay, using the following cell lines: HEp-2 (carcinoma of the larynx), MKN-45 (stomach cancer), HT-29 (adenocarcinoma of the colon), MCF-7 (breast cancer) y HeLa (cervix cancer) and two fibroblast culture of normal cells. The results showed that both the chemotype 1 as the chemotype 2 presented promising activity against all cancer cell lines used. However, the extract of chemotype 1 was more potent than that of the chemotype 2.

In the antimicrobial assays all pseudopterósinos, *seco*-pseudopterósinos and the IMNGD isolated from *P. elisabethae* exhibited selective activity against marine and pathogenic terrestrial *gram* positive bacteria ( $\text{IC}_{50}$  values between 1.4-17  $\mu\text{g/ml}$ ) but they did not show any activity against *Candida albicans*.

Finally, in regard to the marine antifouling laboratory bioassays used to evaluate the antifouling properties of the compounds isolated during this work from the chemotype 1 of *P. elisabethae*, against marine organisms representative of micro- and macrofouling, the results showed that the crude extract, fractions containing pseudopectosins, *seco*-pseudopectosins and amphilectosins, and PsQ and PsU had promising antifouling power in concentrations about 1 µg/ml. The research in this direction still continues in our laboratory.

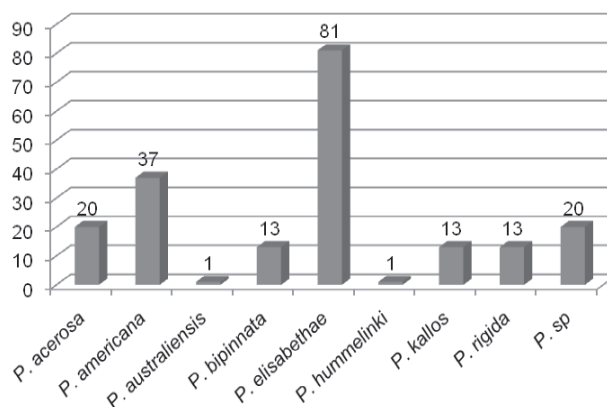
In conclusion, all results presented here contribute to demonstrate that the compounds isolated from the sea *P. elisabethae* are promising molecules having an interesting anti-inflammatory, cytotoxic, antibacterial and antifouling activity profile. This fact makes this marine organism an attractive source of compounds which could be used in the industry.

**Key words:** marine biodiversity, bioprospection, sea feathers, *Pseudopterogorgia elisabethae*, pseudopectosins, *seco*-pseudopectosins, anti-inflammatory compounds, cytotoxic compounds, antimicrobial compounds, antifouling compounds.

## Introducción

Los productos naturales marinos han venido jugando desde hace unos 40 años un papel muy importante en el descubrimiento de sustancias con estructuras químicas la mayoría de las veces sin contraparte terrestre, las cuales se han venido convirtiendo en prototipos para el desarrollo de nuevas drogas o son sustancias importantes para otros fines industriales (Faulkner, 2002; Blunt *et al.*, 2009). Por esta razón es sin duda ninguna muy importante identificar los organismos que producen estos compuestos novedosos y determinar su actividad biológica aprovechable por el hombre.

En este sentido los octocorales (gorgónidos) también llamados plumas, abanicos y látigos de mar, cuyas poblaciones ocupan el segundo lugar en abundancia en los arrecifes coralinos del IndoPacífico y del Caribe, han mostrado desde el año 1990 que son una fuente extraordinaria de compuestos químicos, principalmente de diterpenos. En años recientes las especies de octocorales pertenecientes al género *Pseudopterogorgia* (plumas de mar), hasta ahora documentadas 15 especies en total, han sido el centro de atención de muchos científicos porque se ha descubierto que ellas contienen una gran cantidad de metabolitos secundarios con un perfil farmacológico promisorio (Heckrodt & Mulzer, 2005). Durante el período comprendido entre 1970 hasta el 2008, se han venido publicando numerosos trabajos científicos (199 en total) sobre la química y farmacología de este género. La Figura 1 provee una descripción gráfica del número de publicaciones de las especies del género *Pseudopterogorgia* estudiadas. Es evidente de la gráfica mostrada que *Pseudopterogorgia elisabethae* es la especie más estudiada, seguida por *P. americana*, *P. sp*, *P. acerosa* y otras especies.



**Figura 1.** Número de publicaciones (1970- 2008, fuente Chemical Abstract Search) sobre la química y farmacología de especies de octocorales del género *Pseudopterogorgia*.

La especie *P. elisabethae* (Bayer, 1961) (Figura 2) vive en las aguas tropicales del Mar Caribe (Florida, Bahamas, Bermuda, Cuba, Jamaica, Honduras, Belice, México y San Andrés y Providencia, Colombia) (Heckrodt & Mulzer, 2005). Se distribuye moderadamente en los arrecifes coralinos entre 40-70 m bajo el nivel del mar, sin embargo, ocasionalmente puede encontrarse en aguas someras por ejemplo entre los 5-35 m (Gutiérrez-Rodríguez *et al.*, 2009).

El interés de la comunidad científica en *P. elisabethae* parece deberse a su relativa abundancia en el Mar Caribe, al gran número de metabolitos encontrados en esta especie y a la actividad biológica encontrada para muchos de ellos por ej. anticáncer, antiinflamatoria, antiplasmódica, antimicrobiana, antiviral, antimalárica y antioxidante (Heckrodt & Mulzer, 2005). También se ha reportado para





**Figura 2.** *Pseudopterogorgia elisabethae*, pluma de mar.

los compuestos aislados de *P. elisabethae* actividad anti-alimentaria en peces (Thornton & Kerr, 2002).

La diversidad estructural de muchos de los compuestos aislados de esta especie es asombrosa, la mayoría de ellos diterpenos pertenecientes a 17 clases de las 40 existentes hoy en día (Berrue & Kerr, 2009). Se han encontrado compuestos diterpenos con esqueletos pseudopterano, elisabetano, nor-elisabetano, dinor-elisabetano, elisabano, amfilactano, serrulatano, sanandresano, colombiasano, elisapterano, trinor-amfilactano, tetrinor-amfilactano, cumbiano, *seco*-cumbiano, ileabetano, nor-amfilactano y caribenano (Berrue & Kerr, 2009).

Entre los compuestos diterpenos aislados de *P. elisabethae* se destacan las pseudopterinas y las *seco*-pseudopterinas, no solo por el novedoso tipo de esqueleto que poseen sino también por su excelente actividad biológica.

Las pseudopterinas, son diterpenos con esqueleto de tipo amfilactano glicosidados, las cuales se diferencian entre ellas principalmente en la posición de la glicosidación (C-9 ó C-10), el azúcar (generalmente con D-xilosa, D-arabinosa y L-fucosa), en la posición del sustituyente acetilo en el azúcar, cuando este existe, así como también en la estereoquímica de la aglicona (Figura 3). Las PsA-D fueron las primeras en ser identificadas hace aproximadamente 20 años en ejemplares recolectados en las Islas Bahamas (Look *et al.*, 1986; Fenical, 1987). Unos años más tarde las PsE-J fueron identificadas en ejemplares recolectados en la Isla Bermuda, y las PsK-L, en muestras provenientes de las Islas Bahamas (Roussis *et al.*, 1990). Recientemente, las PsM-O

se aislaron de especímenes de cayos de la Florida (Ata *et al.*, 2003), y las PsX-Y aisladas de especímenes recolectados en Bahamas (Ata *et al.*, 2004) (Figura 3).

Las *seco*-pseudopterinas, compuestos estructuralmente relacionados con las pseudopterinas, son diterpenos con esqueleto tipo serrulatano glicosidado, las cuales se diferencian entre ellas principalmente en la posición de la glicosidación (C-7 ó C-8), en el azúcar (arabinosa y fucosa) y en la posición del sustituyente acetilo en el azúcar cuando existe acetilación. Las *seco*-PsA-D fueron encontradas por primera vez en ejemplares de *Pseudopterogorgia kallos*, recolectados en los cayos de la Florida (Look & Fenical, 1987). En ejemplares de *P. elisabethae* del mismo sitio se identificaron las *seco*-PsE-G (Ata *et al.*, 2003) y la *seco*-PsJ (Ferns & Kerr, 2005) (Figura 3).

Las pseudopterinas y las *seco*-pseudopterinas aisladas de especímenes del norte del Mar Caribe, no solo son interesantes por su estructura novedosa, sino también (por lo menos las que han sido ensayadas farmacológicamente hasta el momento) porque presentan potentes propiedades antiinflamatorias y analgésicas en pruebas *in vitro* e *in vivo* convirtiéndolas en sustancias promisorias para el tratamiento de la inflamación crónica.

Las primeras pseudopterinas que fueron estudiadas desde el punto de vista de su actividad biológica, fueron las PsA-D, a las cuales se les determinó la actividad antimicrobiana sobre platos de agar y la citotoxicidad con el ensayo sobre huevos de erizo de mar; sin embargo, estas actividades fueron cuantitativamente menos importantes, con relación a la actividad antiinflamatoria y analgésica encontrada en pruebas *in vivo*, en las cuales se evaluó el bloqueo de la inflamación y la actividad analgésica en ratones (Look *et al.*, 1986). Los resultados mostraron que la PsA, fue 40 y 12 veces más potente que la Indometacina con respecto a la actividad antiinflamatoria y analgésica, respectivamente. Estas pseudopterinas, también fueron evaluadas en ensayos antiinflamatorios *in vitro*, evaluando la inhibición de la fosfolipasa A2 (PLA<sub>2</sub>) pancreática, y la liberación de prostaglandina E<sub>2</sub> y leucotrieno B<sub>4</sub>, encontrándose que la PsA inhibió la enzima PLA<sub>2</sub>, enzima que juega un papel importante en el inicio de la cascada del ácido araquidónico; además mostró capacidad de inhibir la producción de prostaglandina E<sub>2</sub> y leucotrieno B<sub>4</sub>, mediadores químicos de la inflamación producidos por la vía de ciclooxigenasa (COX) y lipooxigenasa (LPO), respectivamente (Look *et al.*, 1986).

Otra pseudopterina ampliamente estudiada ha sido la pseudopterina E, la cual mostró, en ensayos *in vitro* sobre neutrófilos humanos, capacidad de inhibir la

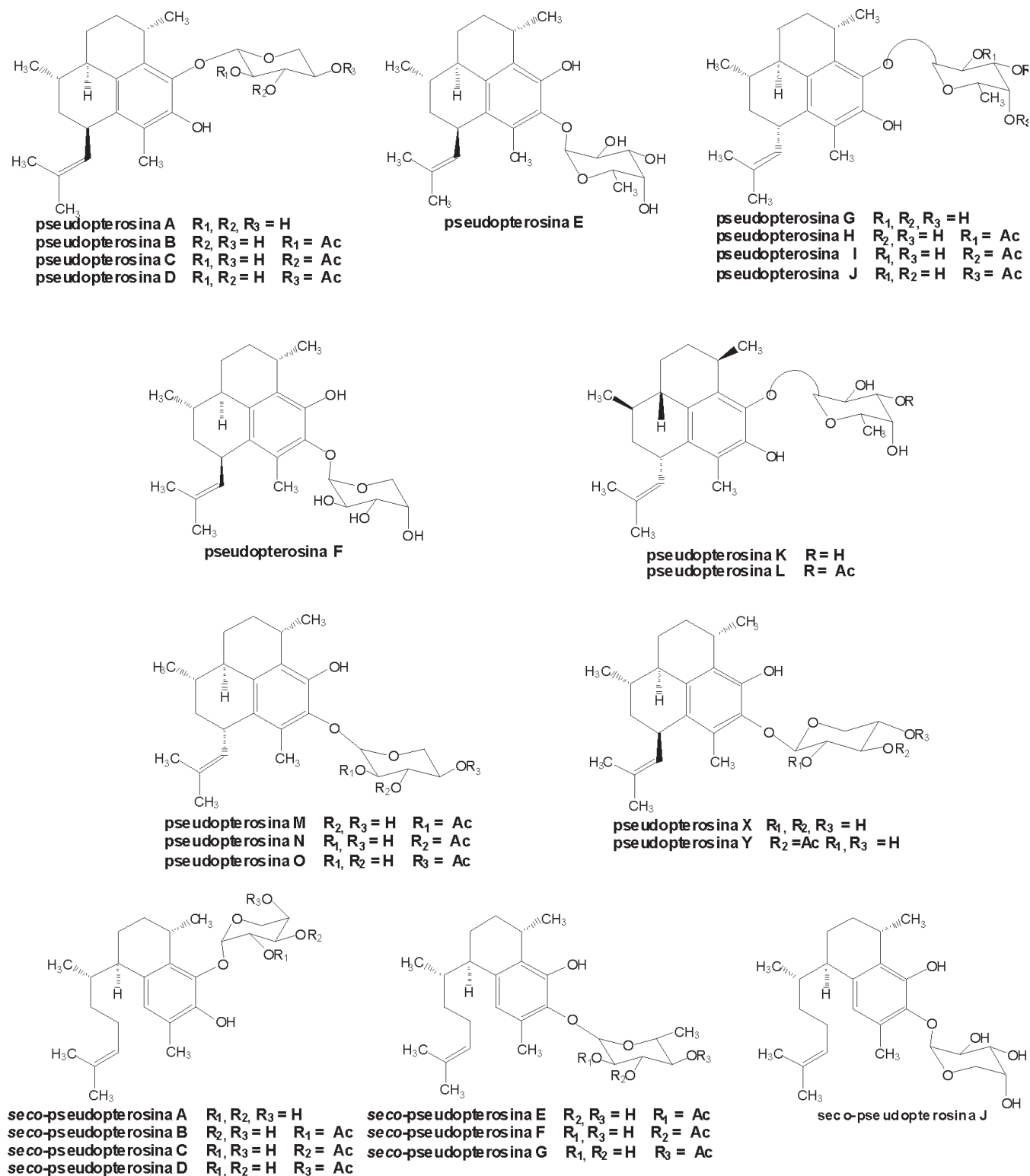


Figura 3. Pseudopterosinas y *seco*-pseudopterosinas aisladas a partir de especímenes de *P. elisabethae* recolectados en el norte del Mar Caribe.

desgranulación de estos, inhibiendo enzimas como PLA<sub>2</sub>, además, de inhibir la producción de leucotrienos, lo cual indica que actúa como un antagonista de la cascada del ácido araquidónico, inhibiendo la vía de LPO, exhibiendo además como una ventaja frente a su análoga la pseudopterosina A, la baja toxicidad que presenta (Potts & Faulkner, 1992; Mayer *et al.*, 1998; Johansson *et al.*, 2002).

Las últimas pseudopterosinas y *seco*-pseudopterosinas evaluadas en pruebas *in vivo* de actividad antiinflamatoria (edema auricular en ratón), fueron las PsM-O y las *seco*-PsE-G, las cuales mostraron porcentajes de inhibición de la inflamación superiores al 65%, siendo la PsN y la *seco*-PsE, las que mayor actividad antiinflamatoria presentaron (porcentaje de inhibición del 88%), (Ata *et al.*, 2003).

Por ello extractos semipurificados, ricos en estos compuestos, son usados como un aditivo para prevenir la irritación causada por la exposición al sol, en cosméticos para el rostro de la firma Estée Lauder en un producto llamado Resilience<sup>®</sup>, el cual tiene gran éxito comercial gracias a su alta eficacia (Kijoa & Sawanwong, 2004; Haefner, 2003; Faulkner, 2000). Este hecho ha generado una gran demanda del organismo, la cual se estima del orden de 30 a 45 toneladas anuales, por parte de la industria cosmética. Sin embargo, en la actualidad la oferta de material animal sólo proviene de las Islas Bahamas, país que ejerce un control especial en la recolección de colonias con el fin de mantener la viabilidad del recurso. Actualmente el precio de la crema a base de extracto semipurificado de coral (50 ml) oscila entre US\$ 80-100 (Precios 2009).

Las pseudopterosinas A-D, han sido licenciadas a una pequeña firma, OsteoArthritis Sciences Inc., para uso medicinal como potencial droga antiinflamatoria, la cual ha completado la fase II de los ensayos clínicos de un derivado de la pseudopterosina A, llamado methopterosin (OAS1000), un potente compuesto antiinflamatorio, inhibidor de la síntesis de leucotrieno B<sub>4</sub>, el cual fue incluido como una Nueva Droga Investigacional (Investigational New Drug IND), aplicado con la U.S. Food and Drug Administration (FDA), y hoy día se encuentra en fase de experimentación en humanos para dermatitis irritante de contacto (Gross & König, 2006; Kijoa & Sawanwong, 2004; Haefner, 2003; Faulkner, 2000).

Adicionalmente, la *P. elisabethae* recolectada en Bahamas, ha sido evaluada en ensayos de actividad antimicrobiana, en donde, el extracto crudo mostró una potente actividad antibacteriana contra bacterias *Gram*-positivas. Este mismo estudio mostró que las pseudopterosinas A-E, K, X y Y, aisladas a partir de este coral son las responsables de la actividad antibacteriana contra *Streptococcus*

*pyogenes*, *Staphylococcus aureus* y *Enterococcus faecalis*, mientras que no presentaron actividad contra las bacterias *Gram*-negativas *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa* (Ata *et al.*, 2004).

En Colombia el grupo de investigación “Estudio y aprovechamiento de productos naturales marinos y frutas de Colombia” de la Universidad Nacional de Colombia, ha sido el pionero en la investigación química y de actividad biológica de la especie de pluma de mar antes mencionada, *Pseudoptero-gorgia elisabethae*, que crece en el archipiélago de San Andrés y Providencia. En el presente trabajo se describirán los resultados de las investigaciones que hemos venido realizando durante los últimos 7 años en compuestos aislados de esta interesante pluma de mar y se resaltarán algunas de las enormes perspectivas que este tema de investigación ofrece.

## Estudios en *Pseudoptero-gorgia elisabethae* recolectada en el archipiélago de San Andrés y Providencia

### 1. Estudios químicos (Duque *et al.*, 2004; Puyana *et al.*, 2004; Duque *et al.*, 2006; Correa, 2007)

Como se desprende de lo anteriormente mencionado, la composición y el porcentaje de pseudopterosinas presentes en las poblaciones naturales de *P. elisabethae*, varía considerablemente dependiendo de la procedencia del animal. Por esta razón y sabiendo de la existencia de poblaciones de *P. elisabethae* en el archipiélago de San Andrés y Providencia procedimos a realizar estudios del recurso, de su contenido de sustancias químicas y de la actividad biológica de extractos y de los compuestos aislados e identificados.

### Material animal

Fragmentos de especímenes de colonias de *P. elisabethae* fueron recolectados por SCUBA en 13 sitios de la isla de Providencia y en 4 sitios de la isla de San Andrés (se tomaron alrededor de 10 réplicas en cada sitio de recolección). Los tejidos animales de cada muestra fueron sucesivamente secados al aire, extraídos con una mezcla de MeOH/CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> (1:1) y sometidos a CLAE-EM (cromatografía líquida de alta eficiencia acoplada a espectrometría de masas). Los perfiles cromatográficos obtenidos demostraron la presencia de dos quimiotipos (Figura 4) a los que denominamos quimiotipo 1 para los extractos de los animales de la isla de Providencia y quimiotipo 2 para aquellos provenientes de los animales de la isla de San Andrés. Aunque el quimiotipo 1 fue encontrado exclusivamente en las muestras de Providencia, algunas veces se encontró también el quimiotipo 2 en Providencia.

### Aislamiento e identificación de compuestos en los dos quimiotipos

Los extractos de las muestras correspondientes a cada uno de los dos quimiotipos fueron juntados hasta obtener aproximadamente 2 g de extracto total para cada quimiotipo. Estos extractos fueron luego sometidos a fraccionamiento sobre sílica gel y posteriormente a purificación final por CLAE en fase reversa. Los compuestos puros aislados fueron identificados por métodos espectroscópicos (UV, EM de ionización suave, RMN mono- y bidimensional) y de transformación química.

El quimiotipo 1 se caracterizó por presentar como constituyentes mayoritarios una mezcla compleja (4-16%) de aproximadamente trece compuestos tipo pseudopterosinas, *seco*-pseudopterosinas y amfilectosinas (Figuras 4 y 5), de los cuales se logró el aislamiento de ocho compuestos las PsP-S, glicosidadas en el C-10 con L-fucosa libre y acetilada en los C-4', C-3' y C-2' respectivamente, las PsT-V glicosidadas en el C-10 con D-arabinosa libre y acetilada en los C-4' y C-3', respectivamente (Duque *et al.*, 2004) y la *seco*-PsK, glicosidada en el C-7 con L-fucosa libre (Duque *et al.*, 2006) junto con cinco compuestos conocidos las PsG, PsK, la *seco*-PsJ y las amfilectosinas A y B.

El quimiotipo 2 se caracterizó por tener bajas concentraciones (2-4%) de las mismas pseudopterosinas y *seco*-pseudopterosinas mencionadas, en contraste sus

constituyentes mayoritarios fueron una mezcla de diterpenos tipo amfilectano (Figuras 4 y 5). De esta fracción se logró aislar e identificar como componente mayoritario a una mezcla en equilibrio de dos diterpenos monoacetilados con esqueleto amfilectano (MEDNG) denominados 10-acetoxi-9-hidroxi—amfilecta-8,10,12,14 tetraeno y 9-acetoxi-10-hidroxi-amfilecta-8,10,12,14 tetraeno, junto con dos componentes minoritarios el elisabetatrienol y la amfilecta-8(13),11,14-trieno-9,10-diona (Duque *et al.*, 2006).

En la Figura 5, se muestran las estructuras químicas de los compuestos tipo pseudopterosina y *seco*-pseudopterosina y otros de estructura relacionada encontrados por nosotros en *P. elisabethae* de San Andrés y Providencia (Duque *et al.*, 2004, Puyana *et al.*, 2004, Duque *et al.*, 2006, Correa, 2007). De ellos las PsP, PsQ, PsR, PsS, PsT, PsU, PsV, *seco*-PsK y los 4 diterpenos (10-acetoxi-9-hidroxi—amfilecta-8,10,12,14 tetraeno y 9-acetoxi-10-hidroxi-amfilecta-8,10,12,14 tetraeno, elisabetatrienol y amfilecta-8(13), 11,14-trieno-9,10-diona) fueron compuestos encontrados por primera vez en la naturaleza. Es importante anotar de estos resultados que **la composición y el porcentaje de pseudopterosinas y *seco*-pseudopterosinas de *P. elisabethae* del Caribe colombiano (sur occidente del Mar Caribe) es muy diferente a la composición en esta clase de importantes compuestos encontrada en ejemplares del norte del Mar Caribe.** También es importante mencionar que la identidad

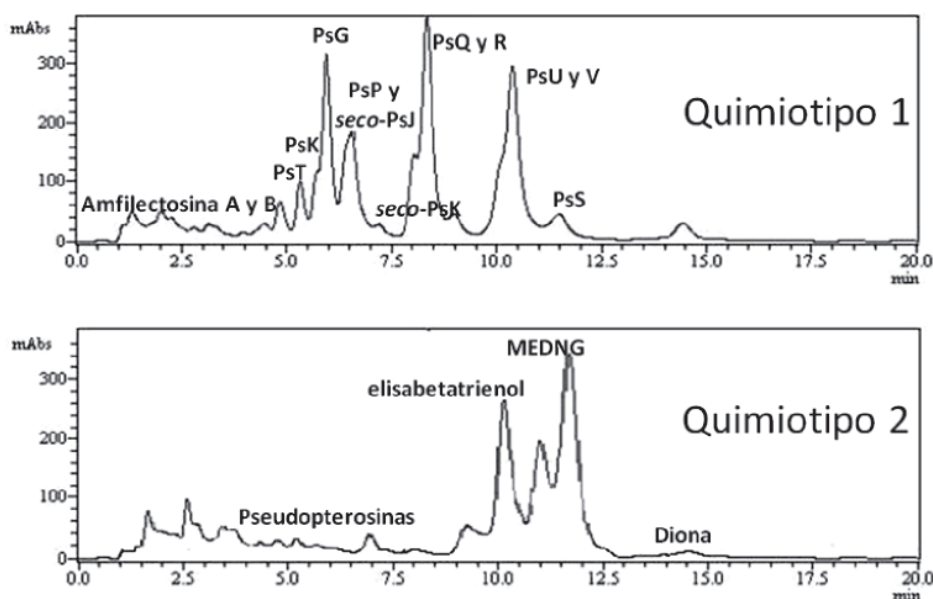
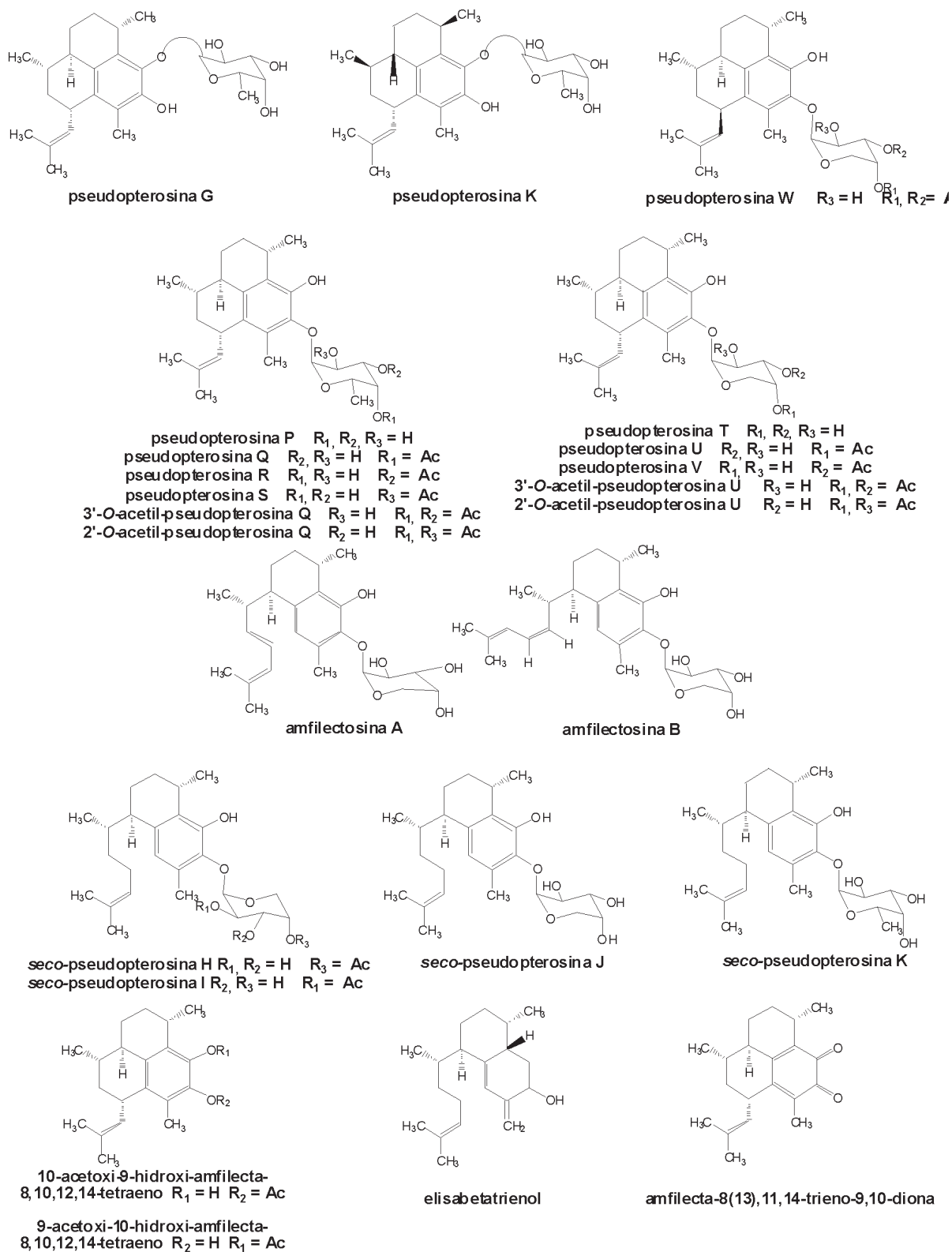


Figura 4. Perfiles por CLAE-EM de los dos quimiotipos encontrados en las muestras de *P. elisabethae* recolectada en las islas de Providencia y San Andrés. Columna Thermo HyperKeystone C-18, con un sistema isocrático ACN/H<sub>2</sub>O (7:3), a 0.2 ml/min.



**Figura 5.** Compuestos aislados de *P. elisabethae* recolectada en las Islas de San Andrés y Providencia (sur occidente del Mar Caribe).



**Tabla 1.** Actividad antiinflamatoria *in vitro* de los compuestos aislados de *P. elisabethae*

Compuesto	Concentración $\mu\text{M}$	% inhibición de MPO	% inhibición de NO	% actividad captadora de NO
PsG	10	34	31	NA
	5			NA
	1			NA
PsK	10	NA	29	10
	5			10
	1			5
PsP	10	NA	58	NA
	5			NA
	1			NA
PsQ	10	59	37	42
	5			21
	1			22
PsS	10	49	36	31
	5			17
	1			6
PsT	10	52	52	25
	5			18
	1			14
PsU	10	52	32	38
	5			26
	1			28
<i>seco</i> -PsK	10	23	18	NA
	5			NA
	1			NA
MEDNG	50*	92	1	30
	25*			23
	5*			16
Dexametasona	10	35	100	NE
Indometacina	10	57	NE	NE
L-NIO	10	NE	82	NE
Curcumina	14	NE	NE	30

\*  $\mu\text{g/ml}$  ; NA: No activo; NE: No evaluado.

de las colonias estudiadas fue claramente confirmada como *P. elisabethae* por su morfología y análisis de escleritos. Adicionalmente, se observó que no hubo diferencias significativas en las dimensiones de los escleritos entre las colonias que conformaron los dos quimiotipos.

Además del trabajo realizado por nosotros, investigadores de la universidad de Puerto Rico reportaron simultáneamente algunas de las pseudopterosinas encontradas en nuestro trabajo (PsP, PsR, PsQ, PsU y PsV), y otras cinco nuevas pseudopterosinas aisladas a partir de especímenes de *P. elisabethae* recolectada en Providencia, de las cuales cuatro correspondieron a pseudopterosinas diacetiladas 3'-O-acetil-PsQ, 2'-O-acetil-PsQ, 3'-O-acetil-PsU y 2'-O-acetil-PsU y la PsW, la cual difiere de las demás pseudopterosinas en la estereoquímica del C-1, (Rodríguez *et al.*, 2004), además reportaron las *seco*-PsH- I, glicosidadas en el C-7 con  $\alpha$ -arabinosa acetilada en

los C-2' y C-4', respectivamente, aisladas a partir de especímenes de *P. elisabethae* recolectados en la Isla de San Andrés, resultados también mostrados en la Figura 5 (Rodríguez *et al.*, 2004).

## 2. Estudios de actividad biológica de los compuestos aislados de *P. elisabethae* de las islas de San Andrés y Providencia

*Propiedades antiinflamatorias* (Correa, 2007; Correa *et al.*, 2009)

También como parte de nuestra investigación se determinaron las propiedades antiinflamatorias de extractos crudos de la pluma de mar *P. elisabethae* de San Andrés y de Providencia, en experimentos *in vivo*, usando el modelo clásico de inflamación aguda (edema en oreja de ratón, De Young *et al.*, 1989) y la inhibición del mediador de inhibición MPO (mieloperoxidasa) liberado en el edema formado

(Bradley *et al.*, 1982). En la Figura 6 se muestra que los dos extractos crudos presentaron valores de inhibición moderados de inflamación comparados con el estándar de indometacina utilizado. En contraste, en el ensayo de inhibición de la liberación de MPO en los homogeneizados de las orejas usadas, se encontró que los extractos crudos mostraron valores de inhibición iguales o ligeramente superiores al estándar de indometacina (Figura 6), potente antiinflamatorio comercial, lo cual sugiere la presencia en los extractos de sustancias con una potente actividad en la inhibición de la desgranulación leucocitaria.

De otro lado, como la inflamación es un proceso complejo caracterizado por la contribución de muchos mediadores al proceso, las pseudopterosinas y *seco*-pseudopterosinas aisladas y los compuestos MEDNG fueron evaluados en ensayos *in vitro* determinando su efecto en la liberación de dos de esos mediadores, la enzima MPO en neutrófilos humanos (PMN) (Bradley *et al.*, 1982) y el radical óxido nítrico (NO) en macrófagos J774 (CYTED, 2002). Adicionalmente, se evaluó para los compuestos la actividad captadora del radical NO (Marcocci *et al.*, 1994). En la Tabla 1, se muestra como los compuestos MEDNG, PsQ, PsS, PsT y PsU exhibieron niveles de inhibición de la liberación de MPO superiores a los mostrados por los controles, dexametasona e indometacina, de igual manera puede observarse como MEDNG, PsP y PsT fueron los tratamientos más potentes en la inhibición de la liberación de NO *in vitro*. Por último es importante mencionar que las PsQ, PsS y PsU presentaron una considerable actividad captadora

de NO (Tabla 1), mientras que las PsG, PsP y la *seco*-PsK no la tienen. Este último resultado parece indicar que la actividad captadora del radical NO moderada de estos últimos compuestos, se podría deber a la directa o indirecta inhibición de la sintasa del óxido nítrico inducible (iNOS).

Los resultados anteriores son evidencia sustancial que contribuye a demostrar que los compuestos aislados durante este trabajo, son sustancias promisorias con un interesante perfil de actividad antiinflamatoria.

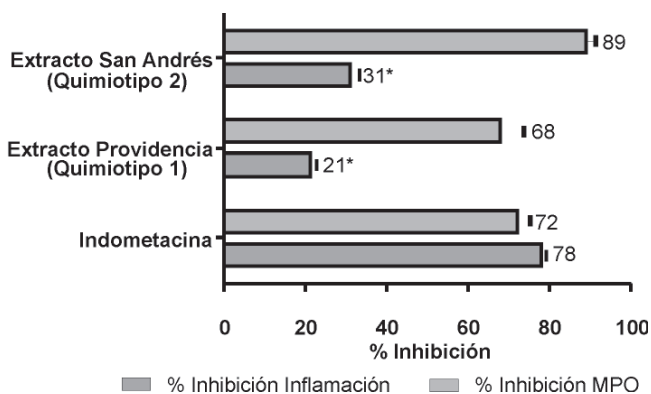
#### Propiedades citotóxicas (Correa, 2007)

Adicionalmente, se determinó la actividad citotóxica de los extractos de *P. elisabethae* correspondientes al quimiotipo 1 y al quimiotipo 2 contra cinco líneas tumorales: HEP-2 (carcinoma de laringe), MKN-45 (carcinoma de estomago), HT-29 (adenocarcinoma de colon), MCF-7 (adenocarcinoma de mama) y HeLa (carcinoma de cervix) y dos cultivos de fibroblastos normales Fib 04 (epitelio bucal humano) y Fib 05 (tejido de cordón umbilical humano), con el fin de buscar la posible aplicación de *P. elisabethae* como fuente de compuestos con actividad anticáncer.

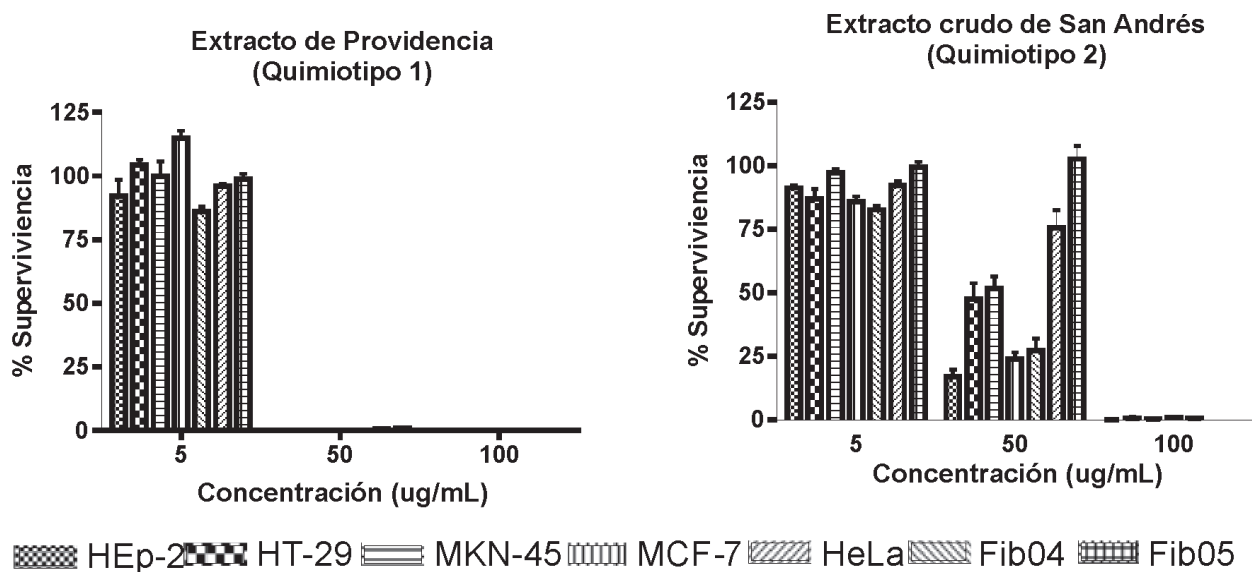
Para la determinación de la supervivencia celular se usó el método indirecto de reducción del MTT (Mosmann, 1983; Cordero & Aristizábal, 2002). Como control positivo de actividad se utilizó Doxorubicina HCl y como vehículo se empleó dimetil sulfoxido (DMSO, concentración final máxima 0,2% v/v). Se calcularon los porcentajes de supervivencia celular en los pozos tratados, relativos a los pozos de control de crecimiento celular y finalmente se construyeron curvas concentración vs. porcentaje de supervivencia.

Los resultados mostraron que los dos extractos presentaron una actividad citotóxica promisoriosa sobre las cinco líneas tumorales empleadas (Figura 7), observando una reducción de la supervivencia en todas las líneas usadas. Así, a las concentraciones de 50 y 100  $\mu\text{g/ml}$  (Figura 7) ambos extractos presentaron un efecto citotóxico importante (Se considera que un extracto o una fracción presenta actividad citotóxica promisoriosa si es activo en concentraciones inferiores a 50  $\mu\text{g/ml}$  (Mans *et al.*, 2000), mientras que a 5  $\mu\text{g/ml}$  ninguno de los extractos tuvo un efecto citotóxico sobre las líneas tumorales utilizadas. Al comparar los resultados de la actividad de los dos extractos se observa que el extracto de Providencia (quimiotipo 1) es más activo que el extracto de San Andrés (quimiotipo 2).

En cuanto a la citotoxicidad mostrada por el extracto crudo de Providencia sobre los dos cultivos de fibroblastos (Figura 6) los resultados muestran que éste indujo una reducción casi total de la supervivencia a las



**Figura 6.** Porcentaje de inhibición de inflamación de los extractos de *P. elisabethae* en el ensayo de edema auricular inducido por TPA y porcentaje de inhibición de los niveles de MPO de los extractos de *P. elisabethae* evaluados en los homogeneizados de las secciones de orejas del ensayo de edema auricular inducido por TPA. Resultados expresados como el promedio del porcentaje de inhibición frente el vehículo (acetona)  $\pm$  D.E. (ANOVA y post-test Tukey \* $P < 0.001$  significativo con respecto al patrón de referencia (indometacina).



**Figura 7.** Porcentajes de supervivencia de las cinco líneas tumorales y dos cultivos de fibroblastos tratados con los extractos de *P. elisabethae* de Providencia (quimiotipo 1) y de San Andrés (quimiotipo 2). Resultados expresados como el promedio de porcentaje de supervivencia  $\pm$  D.E n= 6.

máximas concentraciones evaluadas (100  $\mu\text{g/ml}$  y 50  $\mu\text{g/ml}$ ), mientras que a 5  $\mu\text{g/ml}$  no se observó ningún efecto citotóxico. En cuanto al extracto crudo de San Andrés, éste no presentó actividad citotóxica significativa a ninguna de las concentraciones evaluadas (0.5, 5 y 50  $\mu\text{g/ml}$ ). Este resultado es interesante ya que podría estar indicando una menor intensidad del efecto citotóxico del extracto de San Andrés sobre los cultivos de fibroblastos normales en comparación al efecto de éste sobre las líneas tumorales, sugiriendo una posible selectividad hacia las células tumorales.

De los resultados mostrados es claro que mucha más investigación es necesaria para determinar si las pseudopterosinas y *seco*-pseudopterosinas y otros compuestos de estructura relacionada aislados de *P. elisabethae* de San Andrés y Providencia son responsables de la actividad citotóxica mostrada por los extractos crudos. Experimentos en este sentido se están llevando a cabo en nuestro laboratorio usando los compuestos puros y más líneas tumorales cancerosas.

#### Otras actividades biológicas

Recientemente, con el fin de ampliar el potencial de aplicación de estas interesantes sustancias, hemos venido realizando valoraciones complementarias que nos han permitido demostrar que las pseudopterosinas y *seco*-pseudopterosinas, tienen también una excelente actividad antibacteriana y *antifouling*.

En cuanto a la primera de las actividades mencionada y haciendo uso de dos metodologías diferentes (densidad óptica y ensayo de sensibilización, **Mora-Cristancho** et al. artículo en preparación), se evaluaron las actividades de las PsG, PsP, PsQ, PsS, PsT, PsU, de la 3-*O*-Ac-PsU, de las *seco*-PsJ y *seco*-PsK, y de los compuestos MEDNG contra seis cepas bacterianas de origen marino *Oceanobacillus iheyensis*, *Ochrobactrum pseudogringonense*, *Vibrio harveyi*, *Kokurea rosea*, *Ochrobactrum* sp y *Alteromonas macleodii*, contra tres cepas bacterianas patógenas de origen terrestre *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa* y contra el hongo patógeno *Candida albicans*. Los resultados demostraron que las pseudopterosinas, *seco*-pseudopterosinas y la mezcla en equilibrio de diterpenos aislados de *P. elisabethae* (Quimiotipos 1 y 2), tienen actividad selectiva contra bacterias gram positivas tanto marinas como terrestres con valores de  $\text{IC}_{50}$  entre 1.4 y 17  $\mu\text{g}/\mu\text{l}$ , contra los microorganismos terrestres patógenos, mientras que no tienen actividad contra el hongo evaluado *Candida albicans* (**Correa et al.**, artículo en preparación).

Aunque en general hay un acuerdo dentro de la comunidad científica de que no existe un solo bioensayo que pueda arrojar resultados definitivos sobre las propiedades *antifouling* de las sustancias a valorar, debido principalmente a la diversidad de organismos implicados en el *fouling* marino, se trata la mayoría de las veces de usar un conjunto de bioensayos que utilicen como objetivo

diferentes organismos colonizadores involucrados tanto en el *microfouling* (bacterias o microalgas) como en el *macrofouling* (cirripedios y mejillones) (Briand, 2009). Con esto en mente se ensayaron extractos crudos de los dos quimiotipos de *P. elisabethae*, algunas mezclas de pseudopterosinas y seco-pseudopterosinas y algunas pseudopterosinas puras para valorar sus propiedades *antifouling* contra las microalgas *Cylindrotheca closterium*, *Chlorarachnion globosum*, *Pleurochrysis roscoffensis*, *Rodhella cyanea* y *Scenedesmus armatus*, contra las macroalgas *Ulva intestinales*, *Sargassum multicum* y *Polysiphonia lanosa*, y contra el mejillón *Mytilus edulis*. Los resultados mostraron que el quimiotipo 1 (fracciones que contienen pseudopterosinas) y las PsQ y U (las demás pseudopterosinas y seco-pseudopterosinas aisladas de los ejemplares de Providencia y San Andrés, están aún en fase de valoración) tienen propiedades *antifouling* en concentraciones promedio de 1 µg/ml contra los organismos ensayados (Ramos *et al.*, artículo en preparación).

### Perspectivas

Los resultados anteriormente descritos constituyen una pieza importante dentro del proceso de bioprospección de esta especie, así, una vez terminada la fase de la determinación de su potencial de aplicación, los siguientes pasos para su explotación sustentable tienen que ver con la consecución de cantidades apreciables de estos metabolitos activos que aseguren la continuación de los estudios de mejoramiento de su potencial biológico (estudios de estructura vs. bioactividad), y que permitan establecer los procesos de la fabricación de productos para que en última instancia se asegure la continuidad en su comercialización.

En el caso de esta especie su extracción directa del medio donde vive no es posible debido a la baja densidad poblacional que ésta presenta (Puyana *et al.*, 2004), por lo cual se hace necesario buscar alternativas para el suministro sustentable de esta importante materia prima (extractos crudos de pseudopterosinas y seco-pseudopterosinas). Otros métodos que podrían ser ensayados comprenden síntesis químicas estereoselectivas, sin embargo, estos métodos son difíciles de llevar a cabo debido a la complejidad estructural de estos compuestos (presentan por lo menos cuatro centros quirales en la aglicona, sin considerar los del azúcar) y en muchos casos el proceso es inviable debido a su alto costo.

Lo considerado anteriormente exige una solución que para su implementación se necesita de la producción de conocimiento científico y tecnológico que sirva de soporte a la solu-

ción del problema del suministro para *P. elisabethae*. Investigaciones recientes (Mydlarz *et al.*, 2003) han venido demostrando que las pseudopterosinas y seco-pseudopterosinas en *P. elisabethae* del Caribe norte, son producidas por los simbiontes de este octocoral. Este descubrimiento explicaría el por qué existe tanta variabilidad de producción de estos compuestos entre individuos y localidades inclusive en sitios tan cercanos como en las islas de San Andrés y Providencia, donde hemos encontrado un quimiotipo distinto para las poblaciones que viven en cada una de estas islas, como lo mencionamos en la primera parte de este trabajo.

Así, uno de los caminos que creemos será de gran ayuda es la caracterización de los simbiontes de los especímenes de *P. elisabethae* que viven en Providencia, tendientes al establecimiento de cuál de ellos (dinoflagelados, bacterias, etc.) es el responsable de la producción de estos compuestos. Por supuesto cultivar un microorganismo es un proceso muchísimo más fácil que cultivar el macroorganismo entero o que utilizar procedimientos de síntesis complejos y costosos. Estudios en esta dirección se llevarán a cabo en los próximos años en nuestro laboratorio.

### Agradecimientos

Carmenza Duque agradece a la Universidad Nacional de Colombia, a Colciencias y a la Fundación para la Ciencia y la Tecnología del Banco de la República por la financiación de las investigaciones presentadas, así como a la corporación Coralina por el permiso para la recolección del coral blando *Pseudoptero-gorgia elisabethae* y al Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial por el permiso de investigación y recolección de muestras para los trabajos en *antifouling*. Así mismo es importante mencionar que los anteriores resultados fueron el fruto de un trabajo conjunto del grupo de investigación que dirige C.D. “Estudio y aprovechamiento de productos naturales y frutas de Colombia” y en el cual intervinieron de manera importante los coinvestigadores: Mónica Puyana, Leonardo Castellanos, Oscar Osorno, Luis Fernando Ospina, Fabio Ancizar Aristizábal, Catalina Arévalo-Ferro, y Freddy Alejandro Ramos; y los estudiantes de posgrado: Hebelin Correa, Edisson Tello, Alba Lucía Valenzuela, Claudia Cordero, Jennyfer Mora-Cristancho, y las estudiantes de pregrado: Ginna Narváez y Andrea Arias. Por último es importante expresar nuestro profundo agradecimiento a la Dra. Claire Hellio de la School of Biological Sciences, University of Portsmouth, United Kingdom, por su ayuda en algunos de los ensayos *antifouling* mencionados.



**Bibliografía**

- Ata A, Kerr RG, Moya CE, Jacobs RS.** 2003. Identification of anti-inflammatory diterpenes from the marine gorgonian *Pseudopterogorgia elisabethae*. *Tetrahedron* 59:4215-4222.
- , **Win HY, Holt D, Holloway P, Segstro EP, Jayatilake GS.** 2004. New antibacterial diterpenes from *Pseudopterogorgia elisabethae*. *Helv Chim Acta* 87:1090-1098.
- Bayer FM.** 1961. The shallow-water octocorallia of the west Indian Region. *Martinus Nijhoff, The Hague* 373 p.
- Berrue F, Kerr RG.** 2009. Diterpenes from gorgonian corals. *Nat. Prod. Rep.* 26: 681-710.
- Blunt JW, Copp BR, Hu W-P, Munro HM, Northcote PT, Prinsep MR.** 2009. Marine natural products. *Nat. Prod. Rep.* 26, 170-244 y todas las revisiones anteriores de los mismos autores citadas en esta referencia (2003-2008).
- Briand JF.** 2009. Marine antifouling laboratory bioassays: an overview of their diversity. *Biofouling* 25: 297-311.
- Bradley PP, Priebat DA, Christensen RD, Rothstein G.** 1982. Measurement of cutaneous inflammation: estimation of neutrophils content with an enzyme marker. *J Invest Derm* 78:206-209.
- Cordero C, Aristizábal F.** 2002. Evaluación preeliminar *in vitro* de citotoxicidad de extractos vegetales, empleando métodos colorimétricos. *Revista Colombiana de Biotecnología* 4: 100-106.
- Correa H.** 2007. Bioprospección del coral blando *Pseudopterogorgia elisabethae* como fuente de sustancias antiinflamatorias, analgésicas y citotóxicas. Universidad Nacional de Colombia-Bogotá.
- , **Valenzuela AL, Ospina LO, Duque C.** 2009. Anti-inflammatory effects of the gorgonian *Pseudopterogorgia elisabethae* collected at the Islands of Providencia and San Andrés (SW Caribbean). *J Inflamm* 6:5:1-10.
- , **Duque C, Kerr R.** 2009. Antimicrobial and cytotoxic activity of pseudopterოსins and structurally related compounds isolated from the gorgonian octocoral *Pseudopterogorgia elisabethae* collected in San Andrés and Providencia island (SW Caribbean). Artículo en preparación.
- CYTED.** 2002. Técnicas *in vitro* para el estudio de fármacos antiinflamatorios. Subprograma X. Proyecto X.6. In Búsqueda y evaluación de nuevos agentes naturales con actividad antiinflamatoria y antiartrítica Collado Oliver, España.
- De Young LM, Kheifets JB, Ballaron SJ, Young JM.** 1989. Edema and cell infiltration in the phorbol ester-treated mouse ear are temporally separate and can be differentially modulated by pharmacologic agents. *Agents Actions* 26:335-341.
- Duque C, Puyana M, Castellanos L, Arias A, Correa H, Osorno O, Asai T, Hara N, Fujimoto Y.** 2006. Further studies on the constituents of gorgonian octocoral *Pseudopterogorgia elisabethae* collected in San Andrés and Providencia Islands, Colombian Caribbean: isolation of a putative biosynthetic intermediate leading to erogorgiane. *Tetrahedron* 62:4205-4213.
- , **Narvaez G, Paz A, Osorno O, Hara N, Fujimoto Y.** 2004. Pseudopterოსins P-V, new compounds from the gorgonian octocoral *Pseudopterogorgia elisabethae* from Providencia Island, Colombian Caribbean. *Tetrahedron* 60:10627-10635.
- Faulkner DJ.** 2000. Marine pharmacology. *Antonie van Leeuwenhoek* 77, 135-145.
- . 2002. Marine natural products. *Nat. Prod. Rep.* 19, 1-48 y todas las revisiones anteriores del mismo autor citadas en esta referencia (1977, 1984, 1986-2001).
- Fenical W.** 1987. Marine soft corals of the genus *Pseudopterogorgia*: a resource for novel anti-inflammatory diterpenoids. *J Nat Prod* 50:1001-1008.
- Ferns TA, Kerr RG.** 2005 Identification of amphilectosins as key intermediates in pseudopterოსin biosynthesis. *J Org Chem* 70:6152-6152.
- Gross H, König GM.** 2006. Terpenoids from marine organisms: unique structures and their pharmacological potential. *Phytochem Rev* 5:115-141.
- Gutierrez-Rodriguez C, Barbeitos MS, Sánchez JA, Lasker HR.** 2009. Phylogeography and morphological variation of the branching octocoral *Pseudopterogorgia elisabethae*. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 50:1-15.
- Haefner B.** 2003. Drugs from the deep: marine natural products as drug candidates. *DDT* 8:536-544.
- Heckrodt TJ, Mulzer J.** 2005. Marine Natural Products from *Pseudopterogorgia elisabethae*: Structures, Biosynthesis, Pharmacology, and Total Synthesis. In *Natural Products Synthesis II. Volume 244*. 1st edition. Edited by Mulzer J. New York: Springer Berlin Heidelberg 1-41.
- Johansson S, Göransson U, Luijendijk T, Backlund A, Claesson P, Bohlin L.** 2002. A neutrophil multitarget functional bioassay to detect anti-inflammatory natural products. *J Nat Prod* 65:32-41.
- Kijoa A, Sawanwong P.** 2004. Drugs and cosmetics from the sea. *Mar Drugs*, 2:72-82.
- Look SA, Fenical W, Jacobs RS, Clardy J.** 1986. The pseudopterოსins: anti-inflammatory and analgesic natural products from the sea whip *Pseudopterogorgia elisabethae*. *Proc Natl Acad Sci USA* 83:6238-6240.
- , **Fenical W.** 1987. The *seco*-pseudopterოსins: new anti-inflammatory diterpene-glycosides from a Caribbean gorgonian octocoral of the genus *Pseudopterogorgia*. *Tetrahedron* 43: 3363-3370.
- Mans D, Da Rocha A, Schwartzmann G.** 2000. Anti-cancer drug discovery and development in Brazil: targeted plant collection as a rational strategy to acquire candidate anti-cancer compounds. *Oncologist* 5:185-198.
- Marcocci L, Maguire JJ, Droy-Lefaux MT, Packer L.** 1994. The nitric oxide-scavenger properties of Ginkgo biloba extract EGB 761. *Biochem Biophys Res Commun* 15: 462-475.
- Mayer AMS, Jacobson PB, Fenical W, Jacobs RS, Glase, KB.** 1998. Pharmacological characterization of the pseudopterოსins: novel anti-inflammatory natural products isolated from the



- Caribbean soft coral, *Pseudopterogorgia elisabethae*. Life Sciences 62:PL401-407.
- Mora-Cristancho JA, Arévalo-Ferro C, Ramos FA, Tello E, Duque C.** Antifouling activities against marine surface colonizer bacteria of extracts of marine invertebrates collected in the Colombian Caribbean Sea. To be Submitted.
- Mosmann T.** 1983. Rapid Colorimetric Assay for cellular growth and survival: application to proliferation and cytotoxicity assay. J Immunol Meth 65, 55-63.
- Mydlarz L, Jacobs RS, Boehnlein J, Kerr RG.** 2003. Pseudopterosin Biosynthesis in *Symbiodinium* sp., the Dinoflagellate Symbiont of *Pseudopterogorgia*. Chem & Biol 10: 1051-1056.
- Potts BC, Faulkner DJ.** 1992. Phospholipase A2 inhibitors from marine organisms. J Nat Prod 55:1707-1717.
- Puyana M, Narvaez G, Paz A, Osorno O, Duque C.** 2004. Pseudopterosin content variability of the purple sea whip *Pseudopterogorgia elisabethae* at the Islands of San Andrés and Providencia (SW Caribbean). J Chem Ecol 30:1183-1201.
- Ramos FA, Tello E, Correa H, Duque C, Hellio C.** Artículo en preparación.
- Rodríguez II, Shi Y-P, García OJ, Rodríguez AD, Mayer AMS, Sánchez JA, Ortega E, González J.** 2004. New pseudopterosin and *seco*-pseudopterosin diterpene glycosides from two Colombian isolates of *Pseudopterogorgia elisabethae* and their diverse biological activities. J Nat Prod 67:1672-1680.
- Roussis V, Wu Z, Fenical W, Strobel SA, Van Duyn D, Clardy J.** 1990. New anti-inflammatory pseudopterosins from the marine octocoral *Pseudopterogorgia elisabethae*. J Org Chem 55:4916-4922.
- Thornton RS, Kerr RG.** 2002. Induction of pseudopterosin biosynthesis in the gorgonian *Pseudopterogorgia elisabethae*. J Chem Ecol 28:2083-2090.

Recibido: septiembre 21 de 2009.

Aceptado para su publicación: diciembre 18 de 2009.

# MOLUSCOS DEL MIOCENO Y DEL PLEISTOCENO DE LA ISLA DE SAN ANDRÉS (MAR CARIBE, COLOMBIA) Y CONSIDERACIONES PALEOBIOGEOGRÁFICAS

Por

Juan Manuel Díaz M.<sup>1</sup> & César Fernando García-Llano<sup>2</sup>

## Resumen

**Díaz, J.M. & C.F. García-Llano:** Moluscos del Mioceno y del Pleistoceno de la isla de San Andrés (Mar Caribe, Colombia) y consideraciones paleobiogeográficas. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **34** (130): 105-116, 2010. ISSN 0370-3908.

La isla de San Andrés es la mayor extensión emergida del archipiélago oceánico de San Andrés y Providencia, Mar Caribe suroccidental, y tuvo su origen en un atolón coralino en el Mioceno. La parte central y más elevada de la isla consiste en una cresta calcárea, formada por depósitos lagunares y arrecifales del Neógeno, que corresponde a la formación San Andrés. La cresta está rodeada por una amplia terraza de calizas arrecifales pleistocénicas (formación San Luis), las cuales están emergidas solamente en una franja que bordea la isla, mientras que su mayor extensión está sumergida y recubierta por un complejo arrecifal Reciente. Material fósil de moluscos de ambas formaciones fue colectado en varias localidades de la isla e identificado taxonómicamente. En los cuatro sitios muestreados en la formación San Andrés se obtuvo material de 19 especies de gasterópodos y a 37 de bivalvos, la mayoría de ellos relativamente bien representados en otras formaciones geológicas del Caribe ubicadas estratigráficamente entre el Mioceno tardío y el Plioceno medio. Algunos elementos presentes en esta formación, como *Ostrea haitiensis*, *Meretrix dariena* y *Siphocypraea henekeni*, eran de amplia distribución en la provincia caribeña del Mioceno. En la formación San Luis se colectó material perteneciente a 18 especies de gasterópodos y a 11 de bivalvos, la gran mayoría de ellas también presentes en la malacofauna Reciente de la región. La edad estimada de esta formación corresponde al Sangamoniano, coincidiendo cronológicamente con formaciones similares en Gran Cayman, Jamaica, Hispaniola, las Antillas Holandesas y otras islas caribeñas, con cuyas malacofaunas muestra igualmente gran similitud.

1 Corporación para Investigaciones Biológicas - CIB, Unidad de Biodiversidad, Carrera 72 A N° 78 B – 141, Medellín, Colombia. Correo electrónico: [jdiaz@cib.org.co](mailto:jdiaz@cib.org.co)

2 Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia, Dirección Territorial Caribe, Santa Marta, Colombia. Correo electrónico: [cesargarciallano@gmail.com](mailto:cesargarciallano@gmail.com)

**Palabras clave:** Mar Caribe, moluscos, mioceno, pleistoceno, paleogeografía, isla San Andrés, Colombia.

### Abstract

San Andres Island is the largest emerged portion of the oceanic archipelago of San Andres and Providencia, southwestern Caribbean Sea; it originated as a coralline atoll during Miocene times. The central and highest part of the island consists of a calcareous crest, the San Andrés Formation, formed by Neogene lagoonal and reefal deposits. This crest is surrounded by a calcareous platform of Pleistocene age (San Luis Formation) which emerges only along the island coast, whereas its most part is submerged and covered by a Recent reef complex. Fossil material of molluscs from these two formations was collected in various sites throughout the island and taxonomically identified. In the four sites sampled in the San Andres Formation, material belonging to 19 gastropod and 37 bivalve species was obtained, most of them relatively well represented in other geologic formations of the Caribbean region that are stratigraphically situated between the upper Miocene and the middle Pliocene. Some elements occurring in this formation, such as *Ostrea haitiensis*, *Meretrix dariena* and *Siphocypraea henekeni*, were widely distributed in the Caribbean Miocene Province. In the San Luis Formation, material belonging to 18 gastropod and 11 bivalve species was obtained, most of them also represented in the Recent molluscan fauna of the region. The estimated age of this formation is Sangamonian, hence corresponding to similar formations occurring in Grand Cayman, Jamaica, Hispaniola, the Netherlands Antilles and other Caribbean islands, with which it also shows a great similarity in the composition of the molluscan fauna.

**Key words:** Caribbean Sea, mollusks, miocene, pleistocene, paleogeography, San Andres Island, Colombia.

### Introducción

Las malacofaunas marinas del Neógeno y del Cuaternario de Mesoamérica, del mar Caribe y del norte de Sudamérica han sido relativamente bien documentadas. Formaciones del Mioceno ricas en fósiles de moluscos se encuentran en el sur de México (Perrilliat 1960, 1978; 1992), Guatemala (Perrilliat, 1978), Costa Rica (Olsson, 1922, 1942), Panamá (Woodring, 1957, 1959a,b, 1964), Colombia (Anderson, 1929; Weisbord, 1929; Olsson, 1956), Venezuela (Hodson, *et al.* 1927; Jung, 1965), Trinidad (Maury, 1925; Rutsch, 1934; Jung, 1969), Ecuador (Marks, 1951; Olsson 1964), República Dominicana (Pflug, 1961), Puerto Rico (Maury, 1920) y Jamaica (Jung, 1972). La distribución de malacofaunas de edad pliocénica es mucho más restringida, pero son bien conocidas por su excepcional diversidad de moluscos las formaciones del Plioceno de La Florida (Olsson & Harbison, 1953), Jamaica (Woodring, 1925, 1928), Venezuela (Weisbord, 1962) y Trinidad (Jung, 1969). Por su parte, el Pleistoceno está bien representado en terrazas y arrecifes emergidos en muchas áreas, particularmente en las Antillas y otras islas caribeñas. Entre las malacofaunas mejor documentadas del Pleistoceno del Caribe, especialmente del último interglacial, se encuentran las de Cuba (Richards, 1935, Hoskins, 1964), Jamaica (Donovan & Littlewood, 1993) y Gran Cayman (Rehder, 1962, Brunt *et al.* 1973; Cerridwen & Jones, 1991).

El archipiélago de San Andrés y Providencia consiste en una serie de islas oceánicas, atolones y bancos coralinos localizados afuera de la plataforma continental del Caribe de Nicaragua. Su origen se remonta al Mioceno medio, en relación con el tecto-vulcanismo asociado a la formación del istmo centroamericano (Geister, 1992, Geister & Díaz, 1997). San Andrés se originó en un atolón coralino que a partir de Plio-Pleistoceno ha sufrido un basculamiento hacia el este, elevándose hoy hasta 100 m por encima del nivel marino actual (Geister, 1975, Geister & Díaz, 1997, 2008). La parte central de la isla consiste en una cresta calcárea (La Loma), formada por depósitos lagunares y arrecifales del Neógeno (Fig. 1) y caracterizada por facies litológicas relativamente blandas y poco cohesivas que corresponden a la formación San Andrés, denominadas localmente “caliche” (Bürgl, 1961). Actualmente, esta formación está rodeada por una amplia terraza de calizas arrecifales pleistocénicas (formación San Luis), las cuales están emergidas solamente en una franja que bordea la cresta, mientras que la periferia está sumergida y recubierta por un complejo arrecifal Reciente resultante de la transgresión marina del Holoceno. Los depósitos del Terciario documentan la situación antigua del atolón que perduró hasta el límite Plio/Pleistoceno (Geister, 1975, Geister & Díaz, 1997, 2008). La geología de la isla es bien conocida, como también la historia del desarrollo y la estructura del complejo arrecifal que la rodea (Bürgl, 1961, Geister, 1972,

1973a, 1975, **Díaz et al.** 1995, 2000, **Geister & Díaz**, 1997, 2008).

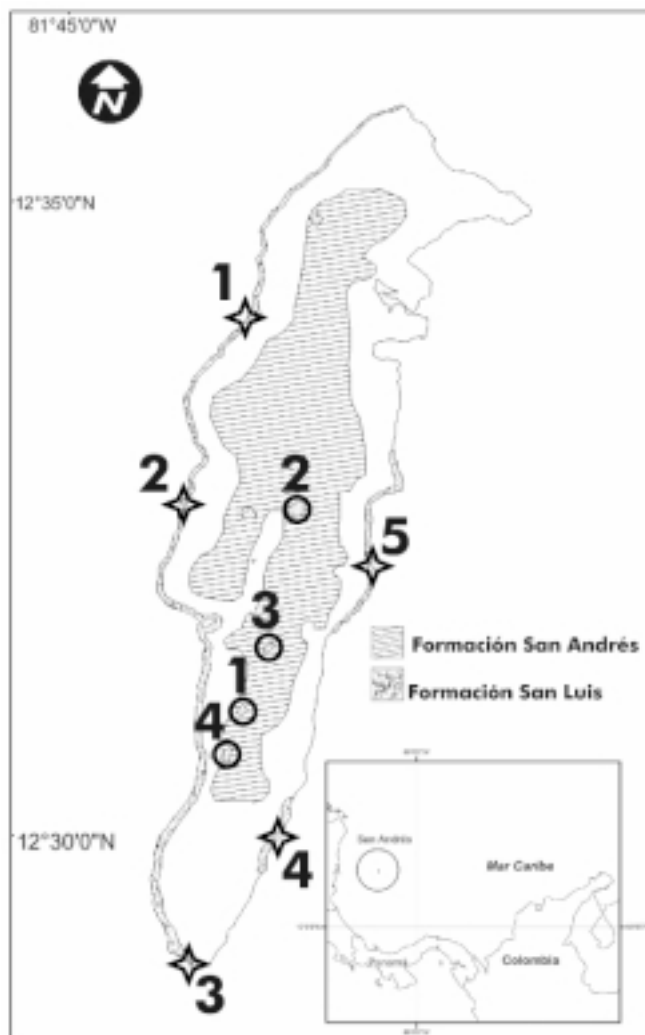
**Bürgl** (1961) mencionó la presencia de material fósil de cinco especies de moluscos en la formación San Andrés y de 41 en la formación San Luis, en tanto que **Geister** (1975) dio cuenta de 30 taxones supraespecíficos de moluscos en la primera y **Geister** (1973b) de 37 especies en la segunda, incluyendo un intento de interpretación paleoecológica.

El propósito principal del presente estudio fue revisar taxonómicamente y complementar los anteriores inventarios con base en nuevas colectas, así como comparar la composición de la malacofauna del Neógeno y del Pleistoceno de San Andrés con la de otras áreas en el contexto paleobiogeográfico de la región del Caribe. Por su localización estratégica entre las Antillas y el istmo mesoamericano, así como por la existencia de depósitos del Terciario y del Cuaternario con abundante material fósil de moluscos en relativo buen estado de preservación, la isla de San Andrés ofrece un escenario muy adecuado para este estudio.

### Materiales y métodos

El trabajo de campo se realizó entre noviembre de 1995 y febrero de 1996. Teniendo en cuenta la distribución geográfica de las formaciones geológicas y sus facies sedimentológicas (cf. **Geister**, 1975), así como la facilidad de acceso a distintos lugares en la isla, se seleccionaron cuatro sitios para realizar el muestreo en la formación San Andrés (Figura 1): 1. Cantera de “caliche”, en inmediaciones del colegio La Sagrada Familia; 2. Cantera San Andrés en Duppy Gully Road; 3. Un corte de la carretera en Polly Hill y 4. Un corte en la Tom Hooker Road cerca de Pepper Hill. En la formación San Luis se escogieron cinco sitios, dos sobre la zona litoral de barlovento de la isla (costado oriental) y tres en la terraza litoral de sotavento (costado occidental) (Figura 1): 1. Schooner Bight; 2. Body Rock (Villa Helen); 3. Blowing Hole (Hoyo Soplador); 4. Bowiebay y 5. Jim Pond (poblado de San Luis). Algunas de las localidades en las que **Bürgl** (1961) y **Geister** (1973, 1975) colectaron fósiles no pudieron ser visitadas debido a que actualmente se encuentran en predios particulares de difícil acceso o a que han sido urbanizadas.

En la formación San Andrés el área y el tiempo de muestreo fueron variables según las características y amplitud de la roca expuesta, procurando extraer material incrustado o empotrado de los estratos altos, medios y bajos de las secciones con la ayuda de un martillo y cinceles. También se obtuvo material *ex-situ* de rocas derrumbadas de estratos altos. La utilidad de coleccionar moluscos en estratos discretos de depósitos arrecifales



**Figura 1.** La isla de San Andrés en el Caribe suroccidental y localización de los sitios de muestreo de material fósil. Formación San Andrés (círculos): 1. Cantera de “caliche”, 2. cantera San Andrés, 3. carretera en Polly Hill, 4. Tom Hooker Road; Formación San Luis (estrellas): 1. Schooner Bight, 2. Body Rock (Villa Helen), 3. Blowing Hole (Hoyo Soplador), 4. Bowiebay, 5. Jim Pond (San Luis).

es cuestionable, ya que el material puede incluir simultáneamente taxones de la infauna y la epifauna (**Donovan & Littlewood**, 1993). El área muestreada en la formación San Luis correspondió a la de un recorrido en zigzag dentro de un rectángulo de aproximadamente 100 x 5 m, dispuesto paralelamente a la línea de costa, durante el cual se marcaron con cinta reflectiva las rocas que superficialmente mostraban la presencia de moluscos fósiles. Posteriormente se reubicaron las rocas marcadas y se extrajo el material con ayuda de martillo y cincel. Con una lupa de campo se inspeccionó la roca para detectar la presencia de fósiles de pequeña talla. La extracción del material

en la firmemente cementada roca exigió por lo general de varias jornadas de trabajo en cada sitio. El material fue colocado en bolsas de tela rotuladas y transportado al laboratorio para su análisis detallado e identificación.

En el laboratorio, las rocas fueron fragmentadas e inspeccionadas con una lupa, y el material fósil fue extraído cuidadosamente con ayuda de una mini taladradora provista de brocas, fresas y ruedas abrasivas. Para la identificación del material se recurrió a los trabajos paleontológicos pertinentes para la región y a literatura estándar de referencia (p.ej. **Abbott**, 1972, **Díaz & Puyana**, 1994). El material fue depositado en el Museo de Historia Natural Marino de Colombia del INVEMAR, Santa Marta, Colombia.

## Resultados

En los cuatro sitios muestreados en la formación San Andrés se obtuvo material correspondiente a 19 especies de gasterópodos y a 37 de bivalvos (Tabla 1), lográndose la identificación de 38 taxones a nivel de especie y de 18 a nivel de género. Debido a los procesos diagenéticos ocurridos en el material calcáreo original, la mayoría del material examinado estuvo representado en huellas y moldes internos de conchas. Ello dificultó en muchos casos la identificación taxonómica y es la causa principal del evidente sesgo en la representatividad del muestreo hacia especies con conchas de tamaño grande.

El sitio 1 (cantera de “caliche”, Figura 2) fue el más destacado por la abundancia y diversidad de especies (13 gasterópodos y 29 bivalvos), seguido de lejos por los sitios 4 (dos gasterópodos y ocho bivalvos) y 2 (cinco gasterópodos y tres bivalvos). En el sitio 3 se encontraron solamente dos moldes del gasterópodo natícido



**Figura 2.** Cantera de “caliche” (sitio 1) en la formación San Andrés.

*Globularia fischeri* (**Dall**, 1915). La mayor diversidad de especies en el sitio 1 se debió probablemente a la variedad de estratos sedimentarios y arrecifales presentes en la sección excavada de la cantera. La composición de la fauna malacológica en este sitio sugiere la existencia de paleoambientes lagunares de alta energía en aguas de poca profundidad, con combinación de sustratos rocoso-coralinos (sugeridos por la presencia de *Calliostoma* spp., *Astraea* sp. *Turbo* cf. *castanea*, *Trivia* sp., bivalvos ostreidos, *Lima* cf. *floridana*, *Chama congregata* y *Spondylus bostrychites*, entre otros) y sedimentarios posiblemente vegetados por pastos marinos (indicados por la presencia de *Strombus gatunensis*, *Turritella* cf. *adela* y bivalvos lucínidos). El sitio 2 parece corresponder a un paleoambiente más profundo de la laguna del antiguo atolón, con predominancia de fondos sedimentarios no vegetados por pastos marinos (ausencia de bivalvos lucínidos). La escasez de material en el sitio 3 no permite hacer ninguna conjetura al respecto. Dada la predominancia de bivalvos infaunales en el sitio 4, las condiciones allí parecen haber correspondido a la zona profunda de la laguna del atolón, con predominancia de sedimentos finos.

En la formación San Luis se colectó material perteneciente a 18 especies de gasterópodos y a 11 de bivalvos, de los cuales 20 lograron identificarse a nivel de especie y nueve a nivel de género (Tabla 2). La mayoría del material consistió en fragmentos incompletos o severamente meteorizados y muy cementados, haciéndose muy difícil o imposible la identificación taxonómica de gran parte del mismo. Es innegable que en este caso hay también un sesgo hacia las especies con conchas de tamaño grande en la representatividad del muestreo. El sitio 3, con seis especies de gasterópodos y ocho de bivalvos, fue el que mayor información aportó, mientras que la obtenida de los otros tres sitios no puede considerarse en ningún caso como representativa. La heterogeneidad en la composición de la malacofauna entre los sitios, que prácticamente no comparten ningún elemento, refuerza tal circunstancia. Por lo tanto, no es posible hacer conjeturas acerca de la tanatocenosis ni de los paleoambientes en los respectivos sitios; así, la información aportada posee apenas valor como inventario parcial de la malacofauna pleistocénica del área.

## Discusión

A pesar de que no se dispone de información estratigráfica detallada ni de dataciones precisas de las formaciones geológicas de la isla de San Andrés, las características litológicas y la composición de la malacofauna



**Tabla 1.** Especies de moluscos fósiles hallados en la formación San Andrés (“caliche”).

Taxón	Sitio				Taxón	Sitio			
	1	2	3	4		1	2	3	4
<b>Gastropoda</b>					Ostreidae				
Trochidae					<i>Ostrea</i> sp.	*			
<i>Calliostoma</i> sp.1	*	*			<i>Ostrea haitiensis</i> Sowerby, 1850	*			
<i>Calliostoma</i> sp.2	*				<i>Lopha folioides</i> (Woodring, 1925)	*			
<i>Solariella</i> sp.	*				Gryphaeidae				
<i>Astraea</i> sp.	*				<i>Pycnodonte</i> sp.	*			
Turbinidae					Pectinidae				
<i>Turbo</i> cf. <i>castanea</i> Gmelin, 1791	*				<i>Chlamys</i> sp.	*			
Vitrinellidae					<i>Argopecten</i> sp.1	*			
<i>Cyclostremiscus</i> sp.	*				<i>Argopecten</i> sp.2	*			
Turritellidae					<i>Caribachlamys sentis</i> (Reeve, 1853)	*			
<i>Turritella</i> cf. <i>adela</i> (Woodring, 1957)	*				<i>Aequipecten</i> sp.	*			
<i>Turritella altilira</i> Conrad, 1857		*			<i>Nodipecten</i> sp.		*		
Strombidae					Propeamusidae				
<i>Strombus gatunensis</i> Toula, 1909	*				<i>Amusium</i> sp.	*			
Crepidulidae					Spondylidae				
<i>Crucibulum gatunensis</i> (Toula, 1909)		*			<i>Spondylus bostrychites</i> Guppy, 1867	*			
Hipponicidae					Lucinidae				
<i>Hipponix</i> cf. <i>ceras</i> Woodring, 1928	*				<i>Lucinoma chiripanica</i> Olsson, 1942	*			
Cypraeidae					<i>Lucina</i> cf. <i>pensylvanica</i> (Linné, 1758)	*			
<i>Cypraea bowdenensis</i> Pilsbry, 1922		*			<i>Codakia vendryesi</i> Dall, 1903				*
<i>Siphocypraea henekeni</i> Guppy, 1867	*				<i>Myrtea</i> cf. <i>pertenera</i> Dall, 1903				*
Triviidae					Carditidae				
<i>Trivia</i> sp.	*				<i>Venericardia juncaensis</i> Maury, 1920				*
Naticidae					Chamidae				
<i>Globularia fischeri</i> (Dall, 1915 )	*		*		<i>Chama congregata</i> Conrad, 1833	*			
<i>Polinices hepaticus subclausus</i> (Sowerby, 1859)	*				Cardiidae				
Marginellidae					<i>Cardium</i> cf. <i>sancti-davidis</i> Maury, 1925		*		
<i>Prunum coniforme</i> (Sowerby, 1850)				*	<i>Trachycardium lingualeonis</i> Guppy, 1866	*			*
Cancellariidae					<i>T. dominicense</i> Gabb, 1873	*			*
<i>Cancellaria scalatella</i> Guppy, 1873				*	Mactridae				
Rissoinidae					<i>Mactra estrellana</i> Olsson, 1922	*			
<i>Melanopsis cepula</i> (Guppy, 1866)		*			Tellinidae				
<b>Bivalvia</b>					<i>Eurytellina aequicincta</i> (Spengler, 1900)	*			
Arcidae					Veneridae				
<i>Arca transversa</i> Linné, 1758				*	<i>Chione hendersoni</i> Dall, 1903		*		
<i>Anadara modesta</i> (Grzybowski, 1899)				*	<i>Ventricolaria</i> sp.	*			
<i>Arca</i> cf. <i>hindsii</i> Olsson, 1922	*				<i>Pitar planivetus</i> (Guppy, 1866)	*			
<i>Scapharca</i> sp.	*				<i>Pitar</i> sp.	*			
Mytilidae					<i>Callista</i> sp.	*			
<i>Modiolus waringi</i> Maury, 1925	*				<i>Meretrix dariena</i> Conrad, 1856				*
Limidae					<i>Cyclinella</i> cf. <i>venezuelana</i> Hodson, 1927	*			
<i>Lima</i> cf. <i>floridana</i> Olsson, 1953	*				Corbulidae				
					<i>Corbula viminea</i> Guppy, 1866	*			
					<i>Corbula</i> sp.	*			

Tabla 2. Especies de moluscos fósiles hallados en la formación San Luis.

Taxón	1	2	3	4	5	Taxón	1	2	3	4	5
<b>Gastropoda</b>						<b>Columbellidae</b>					
Cocculinidae						<i>Columbella mercatoria</i> Linné, 1758				*	
<i>Tegula</i> sp.				*		<b>Vasidae</b>					
<b>Turbinidae</b>						<i>Vasum muricatum</i> (Born, 1778)		*			
<i>Astraea caelata</i> Gmelin, 1791		*				<b>Olividae</b>					
<b>Cerithidae</b>						<i>Olivella</i> sp.1			*		
<i>Cerithium eburneum</i> Bruguière, 1792			*			<i>Olivella</i> sp.2			*		
<i>C. litteratum</i> Born, 1778			*			<b>Bivalvia</b>					
<b>Rissoinidae</b>						<b>Mytilidae</b>					
<i>Rissoina</i> sp.			*			<i>Lithophaga antillarum</i> Orbigny, 1822			*		
<b>Caecidae</b>						<b>Limidae</b>					
<i>Caecum</i> sp.			*			<i>Lima scabra</i> Born, 1778			*		
<b>Vitrinellidae</b>						<b>Ungulinidae</b>					
<i>Macromphalina</i> sp.			*			<i>Diplodonta</i> sp.				*	
<b>Turritellidae</b>						<b>Lucinidae</b>					
<i>Turritella variegata</i> Linné, 1758				*		<i>Lucina pensylvanica</i> Linné, 1758	*				*
<b>Strombidae</b>						<i>Divaricella quadrisulcata</i> Orbigny, 1842			*		
<i>Strombus gigas</i> Linné, 1758		*			*	<b>Chamidae</b>					
<b>Cypraeidae</b>						<i>Chama macerophylla</i> Gmelin, 1791		*			
<i>Cypraea</i> cf. <i>zebra</i> Linné, 1758		*				<b>Cardiidae</b>					
<b>Epitoniidae</b>						<i>Americardia media</i>			*		
<i>Epitonium</i> sp.				*		<i>Laevicardium</i> cf. <i>pictum</i> (Ravenel, 1861)				*	
<b>Muricidae</b>						<b>Tellinidae</b>					
<i>Phyllonotus</i> sp.		*				<i>Tellina vespuciana</i> Orbigny, 1842			*		
<b>Buccinidae</b>						<b>Veneridae</b>					
<i>Pisania auritula</i> (Link, 1807)			*			<i>Periglypta listeri</i> Gray, 1838		*			

fósil confirman la existencia de dos unidades estratigráficas emergidas, además de los depósitos litorales recientes y subrecientes. Estas tres unidades habían sido ya identificadas por **Hubach** (1956), las que **Bürgl** (1961) posteriormente ubicó cronológicamente en el Reciente, el Pleistoceno y el Mioceno respectivamente.

### Formación San Andrés

La mayoría de los moluscos hallados en la formación San Andrés pudieron ser identificados taxonómicamente con base en trabajos paleontológicos previos en formaciones cronológicamente ubicadas entre el Mioceno medio a tardío y el Plioceno medio de la región mesoamericana (p.ej. **Olsson**, 1942; **Perrilliat**, 1992; **Woodring**, 1957, 1959, 1964), norte de Sudamérica (p.ej. **Hodson et al.** 1927; **Maury**, 1925, **Olsson**, 1922) y las Antillas (p.ej. **Pflug**, 1961, **Weisbord**, 1962, **Woodring**, 1928). Por lo tanto, es permisible

atribuir a la formación San Andrés una edad comprendida entre 8 y 4 millones de años, en el Mioceno tardío, cercana a la transición hacia el Plioceno, corroborando las estimaciones anteriores de **Bürgl** (1961) y **Geister** (1975) en relación con la edad de las calizas del "caliche". Cabe anotar que la época comprendida entre el Mioceno medio y el Plioceno medio en esta región se caracterizó por la relativa estabilidad ambiental y la elevada diversidad biológica que antecedieron a los drásticos procesos de extinción ocurridos en el Plio-Pleistoceno a raíz del surgimiento definitivo del istmo y la inestabilidad climática (cf. **Petuch**, 1988, **Allmon et al.** 1993; **Jackson, et al.** 1993). La formación San Andrés es entonces cronológicamente posterior a la formación Providencia, en la vecina isla del mismo nombre, a cuya fauna de corales se atribuye una edad entre 22 y 15 millones de años, en el Mioceno temprano-medio (**Geister**, 1992, **Budd, et al.** 1996).

Ninguna de las cuatro especies de moluscos mencionadas por **Bürgl** (1961) del "caliche" de San Andrés, provenientes de material obtenido de la cantera del sitio 1 en el presente trabajo y de una localidad situada en inmediaciones de Cove Hill (no muestreada en este estudio), coincide con las registradas por nosotros. Ello se debe probablemente a inconsistencias en la identificación taxonómica del material por dicho autor. *Pecten ventricosus* Sowerby, registrada por **Bürgl** (1961), es un sinónimo de *Argopecten circularis* (Sowerby), una especie reciente del Pacífico americano (**Keen**, 1971), gemela del complejo de especies de *A. gibbus* (Born) del Atlántico occidental (**Abbott**, 1974); por lo tanto, el material referido por **Bürgl** (1961) corresponde muy seguramente a una de las dos especies no identificadas de *Argopecten* reseñadas en el presente trabajo. En el caso de *Dosinia acetabulum* Conrad, una forma descrita del Terciario de California y registrada por **Bürgl** (1961) a partir de un molde interno, no se conoce hasta ahora de otras formaciones del Neógeno de la región caribeña, por lo que consideramos que puede tratarse de otro lucínido, posiblemente *Codakia vendryesi* Dall, de forma y tamaño similares. *Lucina floridana* Conrad (= *Pseudomitha floridana*) es una especie reciente del Golfo de México (**Abbott & Morris** 1995), por lo que el material reseñado por **Bürgl** (1961) debe corresponder más bien a *Lucina pensylvanica* (Linné) (Fig. 3a) o a *L. chiripanica* Olsson (Fig. 3b), ambas abundantemente representadas en la formación San Andrés. En el caso de *Venericardia dominica* Weisbord, se trata probablemente de *V. juncalensis* Maury, la única pero comúnmente hallada especie del género en los depósitos de "caliche" en el presente estudio (Fig. 3c). Igualmente, *Chione spenceri* Cooke, de la cual **Bürgl** (1961) menciona la presencia de numerosos moldes, es probablemente *C. hendersoni* Dall, presente en San Andrés y en otras formaciones miocénicas del Caribe (cf. **Woodring**, 1925, **Pflug**, 1961). Finalmente, el gasterópodo reseñado por **Bürgl** (1961) como *Turritella gilbertharrisi* Hodson, descrita del Mioceno medio de Venezuela, es muy similar en tamaño y ornamentación de la concha a *T. altilira* Conrad (Fig. 3d) y a la cual se ajusta mejor el material hallado en el presente estudio. *T. altilira* fue un elemento ampliamente distribuido en la provincia caribeña del Neogeno (*sensu* **Woodring**, 1974), muy frecuente en formaciones del Neógeno de Jamaica, Venezuela, Panamá y Perú (cf. **Petuch**, 1982).

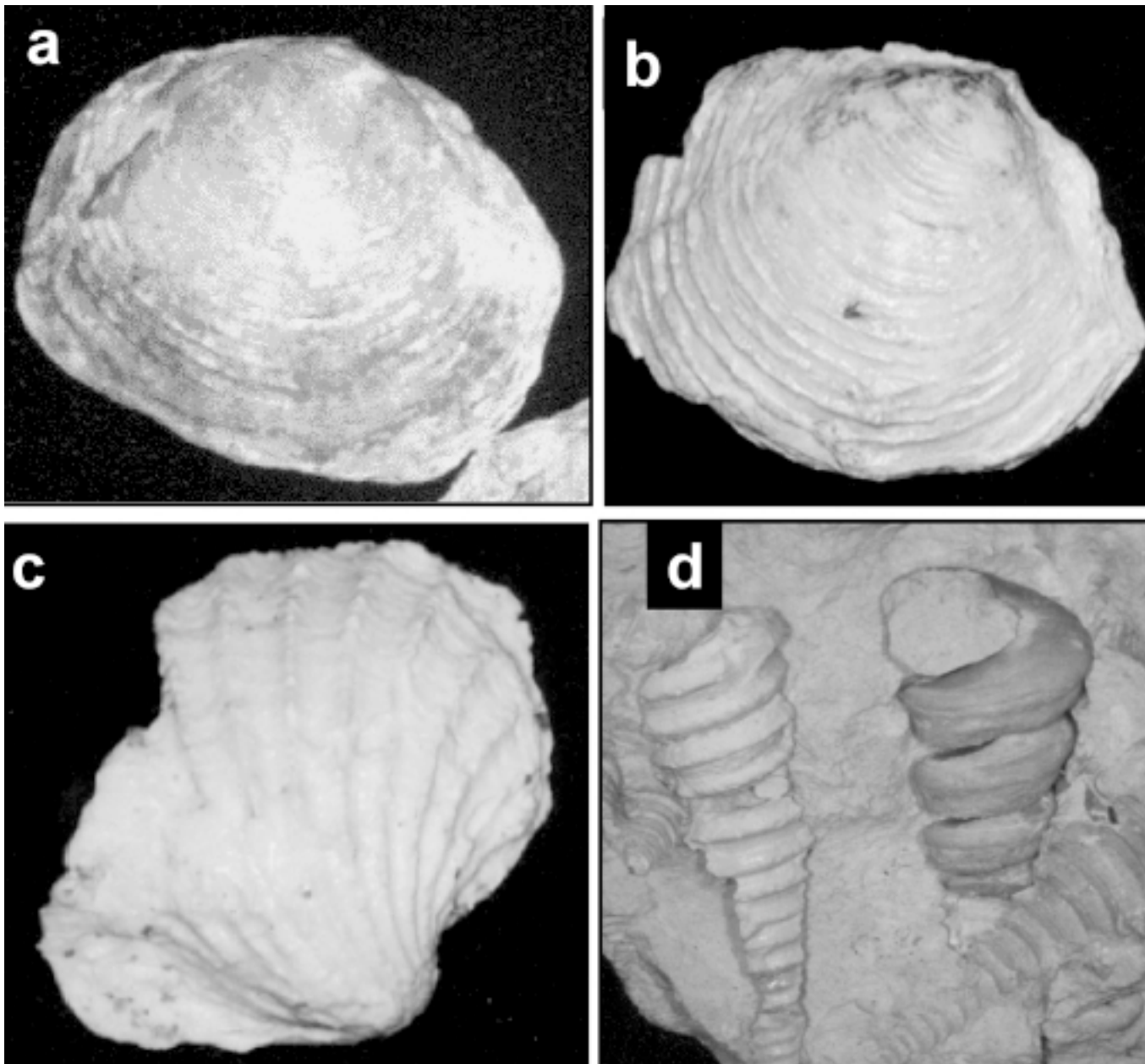
De otra parte, **Geister** (1975) listó un total de 30 taxones de moluscos a nivel de género y familia de la formación San Andrés, de los cuales 15 no fueron identificados entre el material hallado en el presente trabajo (entre ellos *Xenophora* sp., *Semicassis* sp., *Fasciolaria* sp., *Oliva* sp., *Conus* sp., *Lithophaga* sp., *Ungulinidae*, *Solen* sp. y

*Pholadomya* sp.). La mayor parte del material referido por dicho autor fue colectado a lo largo de varios meses de observaciones exhaustivas en muchos lugares de la isla que no pudieron visitados en el presente estudio. Por ejemplo, el material correspondiente a *Hyotissa* sp., *Solen* sp., *Conus* sp., *Lithophaga* sp. y *Pholadomya* sp. provenía de zanjas abiertas en aquel entonces para el tendido de la red de acueducto o de lugares en predios actualmente inaccesibles. Por lo tanto, los taxones listados por **Geister** (1975) complementan el presente inventario de la malacofauna del Mioceno de San Andrés, que consta hasta ahora de 73 taxones (48 Bivalvia y 25 Gastropoda), aunque solamente 56 de ellos han podido identificarse hasta especie.

A pesar de que el inventario es a todas luces incompleto, representa una muestra suficiente de la malacofauna del Neógeno de San Andrés para establecer relaciones faunísticas generales en el contexto paleobiogeográfico de la Provincia Faunística Terciaria del Caribe. Dicha provincia abarcaba el mar Caribe actual, parte del golfo de México, las costas nororientales de Sudamérica hasta Brasil y las costas del Pacífico americano comprendidas entre Nicaragua y el norte del Perú (**Woodring**, 1966, 1974). El actual istmo centroamericano era inexistente entre Colombia y Nicaragua, dejando una brecha relativamente profunda con fondos sedimentarios principalmente litoclásticos (cf. **Duque-Caro**, 1993; **Collins**, 1996). En la tabla 3 se presenta el listado de especies de moluscos de la formación San Andrés y su presencia en otras formaciones del Neógeno americano.

La mayor afinidad malaco-faunística de la formación San Andrés es aparentemente con la formación Bowden de Jamaica (cf. **Woodring**, 1925, 1928), a pesar que esta última es aparentemente más joven (Plioceno medio, cf. **Budd et al.**, 1996). Nueve gasterópodos e igual número de bivalvos de la malacofauna conocida de la formación San Andrés están también presentes en dicha formación, es decir, comparten el 32% de los elementos. A pesar de la diferencia cronoestratigráfica entre ambas formaciones, que podría ser de unos 3-4 millones de años, la afinidad faunística es entendible considerando que se trata en ambos casos de paleoambientes oceánicos con predominancia de estructuras arrecifales coralinas. Con otras formaciones terciarias de las Antillas la afinidad es menor, así: Río Mao-Gurabo-Cercado (República Dominicana, cf. **Pflug**, 1961), 20%; Antigua-Anguila-Río Collazo-San Sebastián (Puerto Rico, cf. **Maury**, 1920), 7%.

Con respecto a la malacofauna del Neógeno del istmo centroamericano, la afinidad con la formación San Andrés, a pesar de su cercanía relativa, es comparativamente baja. Doce taxa de esta última (21%) están representadas en la



**Figura 3.** Conchas y moldes de algunos moluscos representativos de la formación San Andrés: **a.** *Lucina pensylvanica* (L.), **b.** *Lucina chiripanica* Olsson, **c.** *Venericardia juncaensis* Maury **d.** *Turritella altilira* Conrad. No a escala.

formación Gatún (Panamá, cf. **Toula**, 1909; **Woodring**, 1957, 1959, 1964) y apenas nueve (16%) en la formación Limón (Costa Rica, cf. **Olsson**, 1922), lo cual se explica principalmente por las diferencias físico-ambientales entre las dos áreas en tiempos mio-pliocénicos (cf. **Collins**, 1996). Aún más reducida es la afinidad con el Mio-Plioceno de la costa septentrional de Sudamérica: 14.3% con la formación Springvale (Trinidad, cf. **Maury**, 1925; **Jung**, 1969) y

9% con las formaciones de Paraguaná (Venezuela, cf. **Hodson et al.**, 1927; **Jung** 1965). Finalmente, con las formaciones más meridionales de la provincia del Terciario (Esmeraldas, Punta Gorda y Angostura, Ecuador, cf. **Olsson**, 1964, y Zorritos, norte del Perú, **Olsson**, 1932) las afinidades son bastante reducidas, 12.5% y 1.8% respectivamente, pero suficientes para mostrar la relación entre las regiones central y marginal-meridional de la provincia.

**Tabla 3.** Moluscos de la formación San Andrés registrados en otras formaciones de la provincia del Neógeno del Caribe. 1. Cumaná, Venezuela (**Hodson et al.** 1927, **Jung** 1965); 2. Springvale, Trinidad (**Maury** 1925, **Rutsch** 1934, **Jung** 1969); 3. Gatún y Culebra, Panamá (**Woodring** 1957, 1959a,b, 1964); 4. Zorritos, Peru (**Olsson** 1964); 5. Bowden y Falmouth, Jamaica (**Woodring** 1925, 1928, **Jung** 1972) 6. Río Mao y Gurabo, Rep. Dominicana (**Pflug** 1961); 7. Anguilla, Antigua y Sebastián, Puerto Rico (**Maury** 1920); 8. Limón, Costa Rica (**Olsson** 1922, 1942); 9. Punta Gorda, Angostura y Esmeraldas, Ecuador (**Marks** 1951, **Olsson** 1964).

Taxón	Formaciones								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Turbo castanea</i>			*		*				
<i>Turritella adela</i>			*						
<i>Turritella altilira</i>			*	*	*				
<i>Strombus gatunensis</i>			*					*	
<i>Crucibulum gatunensis</i>		*	*	*					
<i>Hipponix ceras</i>	*		*		*				
<i>Cypraea raymondrobertsi</i>					*				
<i>Siphocypraea henekeni</i>	*	*	*		*	*			
<i>Globularia fischeri</i>			*						
<i>Polinices hepaticus</i>			*			*		*	
<i>Prunum coniforme</i>				*	*				
<i>Cancellaria scalatella</i>					*				
<i>Melanopsis cepula</i>	*								
<i>Arca transversa</i>		*							
<i>Arca hindsi</i>			*						
<i>Anadara modesta</i>		*			*	*		*	
<i>Modiolus waringi</i>		*							
<i>Ostrea haitiensis</i>		*	*				*	*	

Taxón	Formaciones								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Lopha folioides</i>					*	*			
<i>Spondylus chiriquiensis</i>								*	
<i>Spondylus bostrychites</i>					*	*	*		
<i>Lucinoma chiripanica</i>									*
<i>Codakia vendryesi</i>					*	*			
<i>Myrtea pertenera</i>					*				
<i>Venericardia juncalensis</i>							*		
<i>Chama congregata</i>								*	
<i>Cardium sancti-davidis</i>		*							
<i>Trachycardium lingualeonis</i>					*				
<i>Trachycardium dominicense</i>						*		*	+
<i>Macra estrellana</i>								*	
<i>Eurytellina aequicineta</i>	*			*					*
<i>Chione hendersoni</i>				*	*	*			
<i>Pitar planivetus</i>					*	*			
<i>Meretrix dariena</i>							*	*	
<i>Cyclinella venezuelana</i>	*								
<i>Corbula viminea</i>		*			*	*			

De los moluscos de la formación San Andrés, los bivalvos *Ostrea haitiensis*, *Trachycardium dominicense* y *Meretrix dariena*, así como el gasterópodo *Siphocypraea henekeni*, son los elementos más ampliamente distribuidos. La primera se encontraba prácticamente en todo el ámbito de la provincia, desde La Florida hasta el Ecuador, incluyendo las costas mesoamericanas y suramericanas y parte de las Antillas. Otro ostreido, *Lopha folioides*, tenía una distribución aparentemente restringida en la región oceánica e insular central de la provincia en torno a las actuales Antillas y San Andrés. *Spondylus bostrychites* tenía su ámbito aparentemente restringido a las Antillas y *S. chiriquiensis* a la región del istmo centroamericano; sin embargo, ambas especies co-ocurren en San Andrés, localizada equidistantemente entre ambas regiones. *Turritella altilira*, *Siphocypraea henekeni* y *Strombus gatunensis* eran elementos característicos de la mitad meridional de la provincia caribeña del Terciario (cf. **Petuch**, 1982), incluyendo a San Andrés.

### Formación San Luis

Con base en dataciones radiométricas en esqueletos coralinos, **Geister** (1972) situó la edad absoluta de las ca-

lizas superficiales del Pleistoceno de San Andrés entre 26.000 y 33.000 años, aunque sospechó una mayor edad por causa del intercambio isotópico con la atmósfera debido al alto grado de meteorización de la roca. Posteriormente, teniendo en cuenta dicha variable y el posible efecto de disolución por ácidos húmicos, **Geister** (1975) estimó una edad de alrededor de 100,000 años para la plataforma litoral emergida, es decir, en el interglacial del Sangamoniano. Con ello, la formación San Luis correspondería cronológicamente con la formación Ironshore de Gran Cayman (**Cerridwen & Jones**, 1991), la formación Falmouth de Jamaica (**Donovan & Littlewood**, 1993), la formación Boca Chica de República Dominicana (**Geister**, 1982) y las plataformas litorales emergidas de Aruba, Bonaire y Curacao (**Schubert & Szabo**, 1978).

Es un hecho reconocido que la malacofauna del Caribe ha experimentado aparentemente pocos cambios en su composición desde el último interglacial (**Petuch**, 1988; **Allmon et al.**, 1993), por lo que, si las condiciones batimétricas y los hábitats circuminsulares predominantes actuales no son muy distintos a los existentes durante el Sangamoniano, como lo sugiere **Geister** (1975, 1983) para San Andrés, es de esperar



**Tabla 4.** Moluscos de la formación San Luis registrados en formaciones del Pleistoceno en otras áreas del Atlántico occidental tropical. 1. Belmont, Devonshire y Spencer, Bermuda (**Richards et al.** 1969); 2. Matanzas y Pinar del Río, Cuba (según **Richards**, 1935); 3. Falmouth, Jamaica (según **Donovan & Littlewood** 1993); 4. Ironshore, Jamaica (según **Cerridwen & Jones** 1991)].

Taxón	Formaciones				Taxón	Formaciones			
	1	2	3	4		1	2	3	4
<i>Diodora cayenensis</i>	*		*		<i>Oliva reticularis</i>	*			*
<i>Cittarium pica</i>	*				<i>Bulla striata</i>	*	*	*	*
<i>Astraea tecta</i>	*		*		<i>Lithophaga antillarum</i>				*
<i>Astraea caelata</i>			*		<i>Lithophaga nigra</i>	*		*	*
<i>Cerithium eburneum</i>	*	*	*	*	<i>Lima scabra</i>		*	*	*
<i>Cerithium litteratum</i>	*	*	*	*	<i>Lucina pensylvanica</i>	*			*
<i>Rissoina bryerea</i>	*				<i>Divaricella quadrisulcata</i>	*			*
<i>Caecum floridanum</i>			*		<i>Anodontia alba</i>	*			*
<i>Strombus gigas</i>		*	*	*	<i>Codakia orbicularis</i>	*		*	*
<i>Strombus pugilis</i>	*	*			<i>Codakia costata</i>				*
<i>Hipponix antiquatus</i>	*	*	*	*	<i>Chama macerophylla</i>	*		*	
<i>Cypraea zebra</i>	*		*		<i>Laevicardium laevigatum</i>	*		*	*
<i>Polinices lacteus</i>	*	*	*		<i>Tellina listeri</i>			*	*
<i>Natica canrena</i>	*	*	*	*	<i>Arcopagia fausta</i>			*	
<i>Pisania auritula</i>				*	<i>Apolymetis intastriata</i>			*	
<i>Columbella mercatoria</i>	*	*	*	*	<i>Periglypta listeri</i>			*	*
<i>Latirus angulatus</i>	*				<i>Chione cancellata</i>	*	*	*	*

una similitud grande entre la malacofauna fósil del Sangamoniano y la actual. En efecto, con excepción de dos especies de bivalvos (*Lithophaga nigra* y *Tellina vespucciana*) y siete de gasterópodos (*Parviturboides interruptus*, *Strombus pugilis*, *Latirus angulatus* y cuatro especies de *Odostomia*.), que conjuntamente representan el 17.3% de los moluscos conocidos de la formación San Luis a nivel de especie, las demás hacen parte de la malacofauna que se encuentra actualmente alrededor de la isla y que consta por lo menos de 73 especies de bivalvos y 122 de gasterópodos (**Díaz & Puyana**, 1994). Puesto que colectas más recientes (**Díaz**, datos sin publicar) demuestran que el inventario de la malacofauna actual de esta área aún dista de ser completo, es muy probable que algunas de las especies arriba mencionadas efectivamente también estén presentes en la actualidad, aumentando aún más la similitud.

A pesar de las limitaciones que imponen las deficiencias del inventario malacológico de la formación San Luis, ello no es obstáculo para compararlo con el de otras formaciones estratigráficamente similares (Tabla 4). En la geográfica y cronológicamente cercana formación Falmouth de Jamaica, que consiste en facies coralinas y sedimentarias del Sangamoniano (cf. **Donovan & Littlewood**, 1993), están representadas 25 (48%) de las especies de la formación San

Luis. Igual similitud se evidencia con la formación Ironshore de Gran Cayman, también con facies semejantes (cf. **Cerridwen & Jones**, 1991). Paradójicamente, la similitud con las remotas formaciones pleistocénicas de Bermuda (Belmont, Devonshire y Spencer) es en conjunto aún mayor, pues en ellas están representadas 15 especies de bivalvos y 11 de gasterópodos de la formación San Luis (cf. **Richards, et al.** 1969). La menor similitud con la formación Matanzas de Cuba (3 bivalvos y 9 gasterópodos, 23%) (cf. **Richards**, 1935) se explica por la edad significativamente mayor de esta formación, estimada en el Pleistoceno temprano (cf. **Budd et al.**, 1996).

La formación San Luis representa una muestra mezclada de una serie de comunidades efímeras (características de varios hábitats arrecifales, sedimentarios, de praderas de pastos marinos y quizás de manglares), por lo que no tiene sentido efectuar comparaciones con comunidades actualmente existentes en ambientes similares, más aún cuando no existe información publicada sobre las comunidades de moluscos de hábitats particulares en el área.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a John M. Pandolfi (Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá) por su apoyo y compañía

durante el trabajo de campo, a Jörn Geister (Geologisches Institut, Universidad de Berna, Suiza) por compartir su exhaustivo conocimiento sobre la geología de San Andrés. Al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR, por el apoyo financiero y logístico.

## Bibliografía

- Abbot, R.T.** 1974. *American Seashells*. 2a edición, Van Nostrand Reinhold, New York, 663 p.
- . & **P.A. Morris**. 1995. *A field guide to shells of the Atlantic and Gulf coasts and the West Indies*. 4a. Edición, Houghton Mifflin, Boston, 350 p.
- Allmon, W.D., G. Rosenberg, R.W. Portell & K.S. Schindler**. 1993. Diversity of Atlantic plain mollusks since Pliocene. *Science*, **26**: 1626-1629.
- Anderson, F.M.** 1929. Marine Miocene and related deposits of north Colombia. *Proc. Calif. Acad. Sci.*, **18**(4): 73-212.
- Brunt, M.A., M.E.C. Giglioli, J.D. Mather, D.J.W. Piper & H.G. Richards**. 1973. The Pleistocene rocks of the Cayman Islands. *Geol. Mag.*, **110**: 209-221.
- Budd, A.F., K.G. Johnson & T.A. Stemann**. 1996. Plio-Pleistocene turnover and extinctions in the Caribbean reef-coral fauna. Pp. 168-204 en J.B.C. Jackson, A.F. Budd y A.G. Coates (Eds.) *Evolution and environment in tropical America*. Univ. Chicago Press, Chicago, USA.
- Bürgl, H.** 1961. Contribución a la estratigrafía y litogénesis de la isla de San Andrés. *Bol. Geol.*, **7**(1-3): 5-25.
- Cerridwen, S.A. & B. Jones**. 1991. Distribution of gastropods and bivalves in the Pleistocene Ironshore Formation, Grand Cayman, B.W.I. *Carib. J. Sci.*, **27**: 97-116.
- Collins, L.S.** 1996. Environmental changes in Caribbean shallow waters relative to the closing tropical America seaway. Pp. 130-167 en J.B.C. Jackson, A.F. Budd y A.G. Coates (Eds.) *Evolution and environment in tropical America*. Univ. Chicago Press, Chicago, USA.
- Díaz, J.M. & M. Puyana**. 1994. Moluscos marinos del Caribe colombiano, un catálogo ilustrado. *Colciencias – Invemar - Fundación Natura*, Bogotá, 291 p.
- , **J. Garzón-Ferreira & S. Zea**. 1995. Los arrecifes coralinos de la isla de San Andrés, Colombia: estado actual y perspectivas para su conservación. *Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Col. Jorge Álvarez Lleras, **7**: 1-150.
- , **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. *Publ. Esp. INVEMAR*, **5**, Santa Marta, 176 p.
- Donovan, S.K. & D.T.J. Littlewood**. 1993. The benthic mollusk faunas of two contrasting reef paleosubenvironments: Falmouth Formation (late Pleistocene, last interglacial). *The Nautilus*, **107**(1): 33-42.
- Duque-Caro, H.** 1993. Los foraminíferos de la cuenca del Atrato y la evolución del istmo de Panamá. Pp. 96-109 en P. Leyva (Ed.) *Colombia Pacífico*, vol. 1, Proyecto Biopacífico, Inderena-DNP-GEF.
- Geister, J.** 1972. Nota sobre la edad de las calizas del Pleistoceno marino en las islas de San Andrés y Providencia (mar Caribe occidental, Colombia). *Mitt. Inst. Colombo-Alemán Invest. Cient.*, **6**: 135-140
- . 1973a. Los arrecifes de la isla de San Andrés (mar Caribe, Colombia). *Mitt. Inst. Colombo-Alemán Invest. Cient.*, **7**: 211-228.
- . 1973b. Pleistozäne und Rezente Mollusken von San Andres (karibisches Meer, Kolumbien) mit Bemerkungen zur geologischen Entwicklung der Insel. *Mitt. Inst. Colombo-Alemán Invest. Cient.*, **7**: 229-251.
- . 1975. Riffbau und geologische Entwicklungsgeschichte der Insel San Andres (westliches karibisches Meer, Kolumbien). *Stuttgart. Beitr. Naturk., Ser. B*, **15**: 1-203.
- . 1982. Pleistocene reef terraces and coral environments at Santo Domingo und near Boca Chica, southern coast of the Dominican Republic. *Trans. 9th Carib. Geol. Conf.*, **2**: 289-703.
- . 1983. Holozäne westindische Korallenriffe: Geomorphologie, Ökologie und Fazies. *Facies*, **9**: 173-284.
- . 1992. Modern reef development and Cenozoic evolution of an oceanic island/reef complex: Isla de Providencia (western Caribbean Sea). *Facies*, **27**: 1-70.
- & **J.M. Díaz**. 1997. A field guide to the atolls and reefs of San Andrés and Providencia (Colombia). *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.*, Panamá, **1**: 235-262.
- . 2008. A field guide to the atolls and reefs of San Andrés and Providencia (Colombia). *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.*, Panamá, **1**: 235-262.
- Hodson, F., H. Hodson & G.D. Harris**. 1927. Some Venezuelan and Caribbean mollusks. *Bull. Amer. Paleont.*, **13**(49): 1-80.
- Hoskins, C.W.** 1964. Molluscan biofacies in calcareous sediments, Gulf of Batabano, Cuba. *Amer. Assoc. Petr. Geol. Bull.*, **48**: 1680-1704.
- Hubach, E.** 1956. Aspectos geográficos y geológicos y recursos de las islas de San Andrés y Providencia. *Cuad. Geogr. Colombia*, **1**: 1-32.
- Jackson, J.B.C., P. Jung, A.G. Coates & L.S. Collins**. 1993. Diversity and extinction of tropical American mollusks and emergence of the Isthmus of Panama. *Science*, **26**: 1624-1626.
- Jung, P.** 1965. Miocene Mollusca from the Paraguaná Peninsula, Venezuela. *Bull. Amer. Paleont.*, **49** (223): 389-637.
- . 1969. Miocene and Pliocene mollusks from Trinidad. *Bull. Amer. Paleont.*, **55**(247): 293-573.
- . 1972. Mollusks from the White Limestone Group of Jamaica. *Mem. VI Conf. Geol. Caribe*, Caracas: 465-468.
- Marks, J.** 1951. Miocene stratigraphy and paleontology of southwestern Ecuador. *Bull. Amer. Paleont.*, **33**(139): 271-432.

- Maurry, C.J.** 1920. Scientific survey of Porto Rico and the Virgin Islands. N. York Acad. Sci., **3**(1): 1-77.
- Olsson, A.A.** 1925. A further contribution to the paleontology of Trinidad (Miocene horizons). Bull. Amer. Paleont., **10**(42): 1-25.
- . 1922. The Miocene of northern Costa Rica with notes on its general stratigraphic relations, part I. Bull. Amer. Paleont., **6**: 42-55.
- . 1932. Contributions to the Tertiary paleontology of northern Peru, part 5, the Peruvian Miocene. Bull. Amer. Paleont., **19**(68): 1-272.
- . 1942. Tertiary and Quaternary fossils from the Burica Peninsula of Panama and Costa Rica. Bull. Amer. Paleont., **27**(106): 1-106.
- . 1956. Colombia. Bull. Geol. Soc. Amer., Mem. **65**: 293-326.
- . 1964. Neogene mollusks from northwestern Ecuador. Paleont. Res. Inst., Ithaca, N. York, 256 p.
- & **A. Harbison.** 1953. Pliocene Mollusca of southern Florida. Acad. Nat. Sci. Philad., Monogr. **8**: 26-447.
- Perilliat, M.C.** 1960. Moluscos del Mioceno de la cuenca salina del istmo de Tehuantepec, México. Bol. Inst. Geol. Paleont. Univ. Autón. México, **8**: 1-31
- . 1978. Distribución de faunas malacológicas cenozoicas en el sur de México y norte de América Central. Bol. Inst. Geol. Paleont. Univ. Auton. México, 101:
- . 1992. Bivalvos y gasterópodos de la formación Ferrotepec (Mioceno medio) de Michoacán. Bol. Inst. Geol. Paleont. Univ. Autón. México,
- Petuch, E.J.** 1982. Geographical heterochrony: contemporaneous existence of Neogene and recent molluscan faunas in the Americas. Paleogr. Paleoclimatol. Paleoecol., **37**: 277-312.
- . 1988. Neogene history of tropical American mollusks. Coastal Education & Research Foundation, Charlottesville, Virginia, 217 p.
- Pflug, H.** 1961. Mollusken aus dem Tertiar von St. Domingo. Acta Humboldtiana, Ser. Geol. Paleont., **1**: 1-107.
- Pilsbry, H.A. & A.P. Brown.** 1917. Oligocene fossils from the neighborhood of Cartagena, Colombia, with notes on some Haitian species. Proc. Acad. Nat. Sci. Philad., **69**: 32-41.
- Rehder, H.A.** 1962. The Pleistocene mollusks of Grand Cayman Island, with notes on the geology of the island. J. Paleont., **36**(3): 583-585.
- Richards, H.G.** 1935. Pleistocene mollusks from western Cuba. J. Paleont., **9**(3): 253-258.
- , **R.T. Abbott & T. Skymer.** 1969. The marine Pleistocene mollusks of Bermuda. Notula Naturae, **425**: 1-10.
- Rutsch, R.** 1934. Die Gastropoden aus dem Neogen der Punta Gavilán in Nord-Venezuela. Mem. Soc. Paleont. Suisse, **54-55**: 1-169.
- Schubert, C. & B.J. Szabo.** 1978. Uranium-series ages of Pleistocene marine deposits of the islands of Curacao and La Blanquilla, Caribbean Sea. Geol. Mijnbouw., **57**: 325-332.
- Weisbord, N.E.** 1929. Miocene Mollusca of northern Colombia. Bull. Amer. Paleont., **14**(54): 1-57.
1962. Late Cenozoic gastropods from northern Venezuela. Bull. Amer. Paleont., **42**(193): 1-486.
- Woodring, W.P.** 1925. Miocene mollusks from Bowden, Jamaica: pelecypods and scaphopods. Carnegie Inst. Washington, Publ. **366**, Washington, 222 p.
- . 1928. Miocene mollusks from Bowden, Jamaica, part II, gastropods and discussion of results. Carnegie Inst. Washington, Publ. **385**, Washington, 564 p.
- . 1957. Geology and paleontology of canal zone and adjoining parts of Panama. Geology and description of Tertiary mollusks (Gastropods: Trochidae to Turritellidae). Geol. Surv. Prof. Pap., **306-A**: 1-137
- . 1959a. Geology and paleontology of Canal Zone and adjoining parts of Panama. Description of Tertiary mollusks (Gastropods: Vermetidae to Thaididae). Geol. Surv. Prof. Pap., **306-B**: 1-229.
- . 1959b. Geology and paleontology of Canal Zone and adjoining parts of Panama. Description of Tertiary mollusks (Pelecypods: Propeamussidae to Cuspidariidae; additions to families covered in paper 306-E; additions to gastropods; cephalopods). Geol. Surv. Prof. Pap., **306-F**: 1-745.
- . 1964. Geology and paleontology of Canal Zone and adjoining parts of Panama. Geology and description of Tertiary mollusks (Gastropoda: Columbelloidea to Volutidae). Geol. Surv. Prof. Pap., **306-C**: 1-293.
- . 1966. The Panama land bridge as a sea barrier. Proc. Amer. Phil. Soc., **110**: 425-433.
- . 1974. The Miocene Caribbean faunal province and its subprovinces. Verh. Naturforsch. Ges. Basel., **84**: 209-213.

Recibido: abril 27 de 2009.

Aceptado para su publicación: diciembre 28 de 2009.

# IDENTIFICACIÓN DE NEMATODOS FITOPARÁSITOS EN GUAYABO (*PSIDIUM GUAJAVA* L.), EN EL MUNICIPIO DE MANIZALES (CALDAS), COLOMBIA

Por

Oscar Adrián Guzmán Piedrahita, M. Sc.<sup>1</sup>, Jairo Castaño Zapata, Ph.D.<sup>2</sup>

## Resumen

**Guzmán Piedrahita, O. A., & J. Castaño Zapata:** Identificación de nematodos fitoparásitos en guayabo (*Psidium guajava* L.), en el municipio de Manizales (Caldas), Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 34 (130): 117-125, 2010. ISSN 0370-3908.

El futuro de la agricultura colombiana está en cultivos permanentes como los frutales tropicales, como el guayabo. Este estudio tuvo como objetivo identificar los nematodos fitoparásitos del guayabo. La investigación se realizó en la vereda La Cabaña, municipio de Manizales, a 1.100 msnm, con temperatura promedio anual de 24°C y precipitación anual de 2.100 mm. Se muestreó un cultivo de guayabo Pera de 3 años de edad. Aleatoriamente se muestreó 10 árboles y de cada uno se obtuvo una muestra de 100 g de raíces y 500 g de suelo. Para la extracción de nematodos se utilizó el método de centrifugación y flotación en azúcar. Se identificó a *Meloidogyne*, *Helicotylenchus* y *Pratylenchus*. Las mayores poblaciones correspondieron a *Meloidogyne* spp., hallándose en el 50% de las muestras analizadas, resaltando la importancia del nematodo del Nudo radical.

**Palabras clave:** fruta, guayabo, nematodos, *Meloidogyne*, *Helicotylenchus*, *Pratylenchus*.

## Abstract

The future of the colombian fruticulture is in permanent crops, such as tropical fruits, amongst them guava. This research had as objective to identify the parasitic nematodes of this crop. The study was conducted at the region of La Cabaña, municipality of Manizales, Caldas, located at 1.100 mosl, average annual temperature of 24°C and annual precipitation of 2.100 mm. The sampling was carried out in a plantation of guava Pera of 3 years old. At random were sampled 10 trees, and from each one was obtained samples of 100 g of roots and 500 g of soil. The extraction of nematodes was done by following the method of centrifugation and sugar flotation. It was identified: *Meloidogyne*, *Helicotylenchus* and *Pratylenchus*, being the most important the root-knob nematode *Meloidogyne* spp.

**Key words:** fruit, guava, nematodes, *Meloidogyne*, *Helicotylenchus*, *Pratylenchus*.

1 Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Departamento de Fitotecnia. Correo electrónico: oscar.guzman@ucaldas.edu.co

2 Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Departamento de Fitotecnia. Correo electrónico: jairo.castanoz@ucaldas.edu.co

## Introducción

En Colombia, la fruticultura se ha desarrollado lentamente, a pesar del reconocimiento permanente de todos los mercados nacionales, internacionales y los consumidores, quienes consideran que el futuro de la agricultura está en los cultivos permanentes como los frutales tropicales, dentro de ellos el guayabo. La guayaba tiene gran futuro debido a que es el primero con área de producción, el de mayor industrialización y el que tiene la mayor diversidad de productos procesados (Mosquera *et al.*, 1997; Villota & Varón, 1997; Lozano *et al.*, 2002; AGRONET, 2009).

La producción de guayaba era limitada hasta hace 10 años cuando sólo existían unos pocos huertos comerciales con extensiones menores de 2 ha. Un porcentaje alto provenía de bosques naturales, potreros y barrancos (sin tecnología en el 96% de los casos) que se cosechaban cada vez que la producción cíclica aparecía. Debido al incremento en la demanda para su industrialización y consumo fresco, la especie se empezó a cultivar comercialmente a escala mayor y consecuentemente, su producción se ha incrementado. Desafortunadamente, el conocimiento limitado de técnicas apropiadas para lograr producciones económicamente rentables, no ha permitido el desarrollo del cultivo a nivel que la demanda exige (Lozano *et al.*, 2002).

La mayor producción de guayaba en Colombia, se encuentra en el departamento de Santander, con 48.000 ton (38%) de 128.000 ton a nivel nacional, seguido por Boyacá (27%), y Tolima (10%). Aunque Santander es el mayor productor, ya que cuenta con la mayor área en producción, Boyacá tiene una mayor productividad, con una producción similar en menos de la mitad del área del primero.

Los productores a nivel regional son una población rural en un 99% de economía campesina, con un promedio de 3 ha y un sistema de explotación agropastoril. La producción se sitúa principalmente en Santander, en los municipios de Puente Nacional, Guabatá, Vélez, Jesús María y Barbosa. Este cultivo demanda más de 750.000 jornales por año, utilizados en labores de recolección y empaque, siendo el 72% en mano de obra familiar, principalmente femenina. La guayaba provee la materia prima para el funcionamiento de 200 fábricas de bocadillo que generan 3.000 empleos directos y 4.000 indirectos.

([http://www.frutasyhortalizas.com.co/portal/Business/product\\_view.php](http://www.frutasyhortalizas.com.co/portal/Business/product_view.php)).

El cultivo del guayabo es afectado por varios problemas fitosanitarios, destacándose dentro de las plagas a las Moscas de la fruta (*Anastrepha* spp., y *Ceratitis*

*capitata*), las cuales pueden arrasarse con producciones enteras. Dentro de las enfermedades se destacan la Antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz.), conocida como Mancha chocolate, la Costra o Roña del fruto (*Pestalotia vesicolor* Speg.), la Roya (*Puccinia psidii* Wint.), la cual es muy importante en viveros de guayabo y en plantaciones establecidas con materiales susceptibles, y los nematodos fitoparásitos, especialmente del género *Meloidogyne* spp. (Lozano *et al.*, 2002; Bolaños *et al.*, 2007), los cuales son muy importantes en cultivos como frutales, pastos, hortalizas y numerosas arvenses (Mitkowski & Abawi, 2003; Luc, Sikora & Bridge, 2005; Agrios, 2005), donde causan pudrición del sistema radical de las plantas.

En cultivos comerciales y silvestres de guayabo, se han encontrado *Meloidogyne* spp., *Rotylechulus* spp., *Pratylenchulus* spp., *Hoplolaimus* spp., *Tylenchorynchus* spp., y *Helicotylenchus* spp. De estos nematodos, el género más importante por su incidencia y población es *Meloidogyne*, conocido como nematodo del Nudo radical (Villota & Varón, 1997; Perry & Moens, 2006; Perry, Moens & Starr, 2009).

Los nematodos del Nudo radical (*Meloidogyne* spp.) y nematodos Filiformes (*Helicotylenchus* spp., y *Pratylenchus* spp.), provocan deformaciones en las raíces, debilitando los árboles, ocasionándoles clorosis y muerte descendente. Los nematodos fitoparásitos causan heridas en el sistema radical que posteriormente ocasionan pudrición de las mismas y además, favorecen la penetración de otros patógenos habitantes naturales del suelo (Mosquera *et al.*, 1994; Mosquera *et al.*, 1997; Villota & Varón, 1997; Lozano *et al.*, 2002; Bolaños *et al.*, 2007).

Existen aproximadamente 70 especies de *Meloidogyne*, afectando muchos cultivos, donde se incluyen frutales, pastos, hortalizas y muchas arvenses. Se considera que estos nematodos fitoparásitos causan pérdidas del 14% en las plantas a nivel mundial, las cuales equivalen a aproximadamente 100 billones de dólares anuales. Por tal motivo, se considera como el nematodo más común y destructivo de plantas cultivadas (Mitkowski & Abawi, 2003; Luc, Sikora & Bridge, 2005).

Debido al conocimiento limitado de técnicas apropiadas para lograr producciones económicamente rentables, no se ha permitido el desarrollo del cultivo a nivel que la demanda exige, en éste aspecto, los nematodos fitoparásitos han sido poco estudiados. Por esta razón, se planteó como objetivo de esta investigación identificar los géneros de nematodos fitoparásitos afectando al guayabo en el municipio de Manizales, Caldas.



## Materiales y métodos

La investigación fue realizada en la hacienda La Rambla, ubicada en la vereda La Cabaña, municipio de Manizales, departamento de Caldas, a una altitud de 1100 m, con temperatura promedio y precipitación anual de 24°C y 2100 mm, respectivamente.

En el campo, las plantas de Guayabo tenían 3 años de edad, sembradas a una distancia de 6 X 6 m, para una densidad de 278 árboles ha<sup>-1</sup>. Antes de la siembra de los árboles, se incorporó al hueco 100g de cal dolomita, 10 kg de lombri-compuesto y 100 g de Micorrizas.

Fueron seleccionados aleatoriamente 10 árboles de guayabo Pera, del plato de cada árbol (unidad de muestreo) en los cuatro puntos cardinales (oriente, occidente, norte y sur) se tomó una muestra de 100g de raíces y 500g de suelo, siendo depositadas en bolsas plásticas. Las muestras se extrajeron con un palín de hoja rectangular (13 x 50 cm de ancho y largo, respectivamente) a una distancia de 25 cm de la base de las plantas y una profundidad de 30 cm, en un hoyo de 13 cm de largo y ancho y 30 cm de profundidad (Araya *et al.*, 1995; Cabrales, 1995; Bolaños *et al.*, 2007).

La extracción de nematodos de raíces y suelo se realizó en el Laboratorio de Micorrizas de Cenicafe, Chinchiná, basados en el principio de flotación de los nematodos en azúcar realizado por Meredith (1973) y Araya *et al.* (1995). El procedimiento se realizó de la siguiente manera: las raíces se lavaron con agua de la llave, después de dejarlas secar a temperatura ambiente, se pesaron 20 g de ellas en una balanza Analytical Plus, marca Ohaus, modelo No. AP210S, y con la ayuda de tijeras se cortaron transversalmente trozos de raíces de 1 cm, que luego se homogenizaron (Araya *et al.*, 1995). Estos trozos se colocaron dentro del vaso de una licuadora Osterizer, modelo 565-15, con 500 mL de agua y luego se licuaron a alta velocidad por 30 seg. La solución del licuado fue depositada en un tamiz de 250 mm el cual estaba colocado sobre un tamiz de 106 mm, y éste sobre otro de 25mm. La muestra se lavó con agua a presión para que hubiera desprendimiento de los nematodos, y del material que quedó en el tamiz de 25 mm, se depositó todo su contenido, aproximadamente 25 mL, en tubos de centrifugación de polipropileno de 50 mL de capacidad.

Posteriormente, se agregó a cada tubo 25 mL de sacarosa al 50% (solución de azúcar) y se centrifugó a 3800 g durante 3 min. Como consecuencia de la centrifugación hubo una sedimentación de las partículas pesadas en el fondo del tubo. Los nematodos se ubicaron en una capa intermedia (gradiente de sacarosa) y aquellos localizados

en la inter-fase se extrajeron de cada tubo usando una jeringa conectada a una manguera para facilitar su extracción. La extracción de nematodos de suelo se realizó de igual manera, omitiendo el procedimiento de licuado.

Después que los nematodos fueron extraídos, se depositaron en el tamiz de 25 mm y se lavaron con abundante agua para evitar que el azúcar afectara los nematodos. Finalmente se recogieron 20 mL en una caja de Petri y se realizaron 3 conteos de nematodos (Nº nematodos / 100 g de raíces).

En cada planta se registró el número de nematodos en 100 g de raíces y suelo, se identificaron los nematodos fitoparásitos siguiendo las claves taxonómicas de Luc *et al.* (1990), Thorne (1961), Taylor (1968), Román (1978); Mai *et al.* (1996), Castaño Zapata & Salazar (1998), Siddiqi (2001), Agrios (2005), Perry & Moens (2006), Castillo & Vovlas 2008 y Perry, Moens & Starr (2009) y, se estimó la población de cada género de nematodo.

## Resultados y discusión

Los géneros de nematodos fitoparásitos encontrados fueron: *Meloidogyne*, *Helicotylenchus*, y *Pratylenchus*, los cuales se encuentran clasificados en el orden Tylenchida, familias Heteroderidae, Hoplolaimidae y Pratylenchidae, respectivamente.

Estos géneros han sido registrados en el departamento del Valle del Cauca, en cultivos comerciales y silvestres de guayabo, afectando el sistema radical (Mosquera *et al.*, 1997; Villota & Varón, 1997). Mosquera *et al.* (1994), en un reconocimiento de nematodos en un cultivo de guayabo en el Valle del Cauca, identificaron a *Meloidogyne* spp., como el nematodo más importante el cual estaba afectando las variedades comerciales Palmira-ICA-2 y Manzana. Además fueron encontrados los géneros *Helicotylenchus*, *Pratylenchus*, *Tylenchorhynchus*, *Rotylenchulus*, entre otros.

En las muestras analizadas se encontró que los valores mayores de nematodos fitoparásitos correspondieron a *Meloidogyne* spp., con una población que varió desde muy baja con 165 nematodos, hasta muy alta con 4.891 nematodos/ 100 g de raíces (Tabla 1). *Meloidogyne* spp., se encontró formando agallas en raíces primarias y secundarias, y debido al ataque tan severo, el tejido viejo se rompía originando chancros de apariencia corchosa que posteriormente se necrosaban y morían impidiendo la formación de raíces y por ende, impedían la absorción y traslocación de agua y nutrientes. En la parte aérea, se observó poco desarrollo de las plantas, acompañado de enanismo, poco desarrollo foliar, clorosis de hojas

y producción baja. Resultados similares fueron encontrados por **Mosquera et al.** (1997); **Villota & Varón** (1997), **Lozano et al.** (2002) y **Bolaños et al.** (2007).

En las muestras de suelo, *Meloidogyne* spp., obtuvo el menor número de nematodos, cuyos valores fueron menores a 60 nematodos/100 g de suelo (Tabla 1). Esto se atribuye a que éste nematodo es un parásito obligado, que necesita parasitar raíces para poder sobrevivir (**Thorne**, 1968; **Román**, 1978; **Siddiqi**, 2001; **Perry & Moens**, 2006; **Perry, Moens & Starr**, 2009).

Los nematodos que presentaron las poblaciones menores fueron *Helicotylenchus* spp., oscilando entre 5 y 662 y *Pratylenchus* spp., entre 5 y 642 nematodos/100 g de suelo y raíces, respectivamente (Tabla 1). Estos nematodos han sido registrado en otros estudios afectando el sistema radical del cultivo de guayabo, pero no son tan agresivos como *Meloidogyne* spp. (**Mosquera et al.**, 1997; **Villota & Varón**, 1997).

En las Figuras 1 a 4, se ilustran los principales géneros de nematodos fitoparásitos identificados en este estudio.

*Meloidogyne* y *Helicotylenchus*, fueron los géneros que se presentaron con mayor frecuencia (porcentaje) en las muestras analizadas con un 50% (Tabla 2). *Pratylenchus*, presentó menor presencia en las muestras con un 40% (Tabla 3). Estos resultados son consistentes con los encontrados en otros estudios realizados en Colombia (**Mosquera et al.**, 1994; **Mosquera et al.**, 1997; **Villota & Varón**, 1997; **Lozano et al.** 2002), en los cuales se han caracterizado los principales nematodos fitoparásitos del guayabo, encontrando a *Meloidogyne*, con la mayor incidencia y población, y *Helicotylenchus* y *Pratylenchus*, con las menores.

### Conclusiones

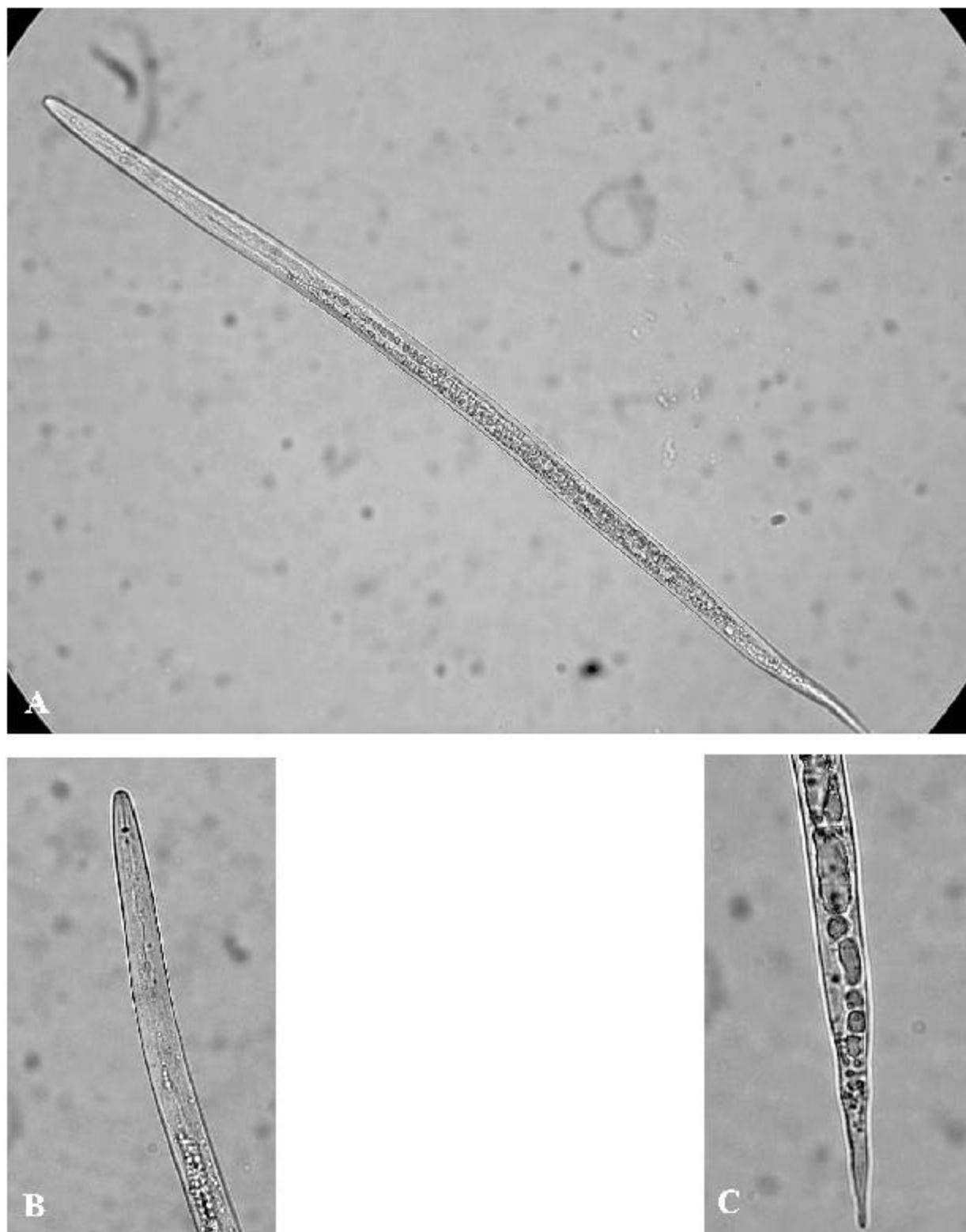
Los principales géneros de fitonematodos encontrados afectando los materiales de guayabo pera en la hacienda La Rambla, vereda la Cabaña, fueron *Meloidogyne*, *Helicotylenchus* y *Pratylenchus*, los cuales son de importancia económica debido a los daños que ocasionan en el sistema radical de las plantas.

Las densidades poblacionales fueron variables en las unidades de muestreo, por sector y por género de

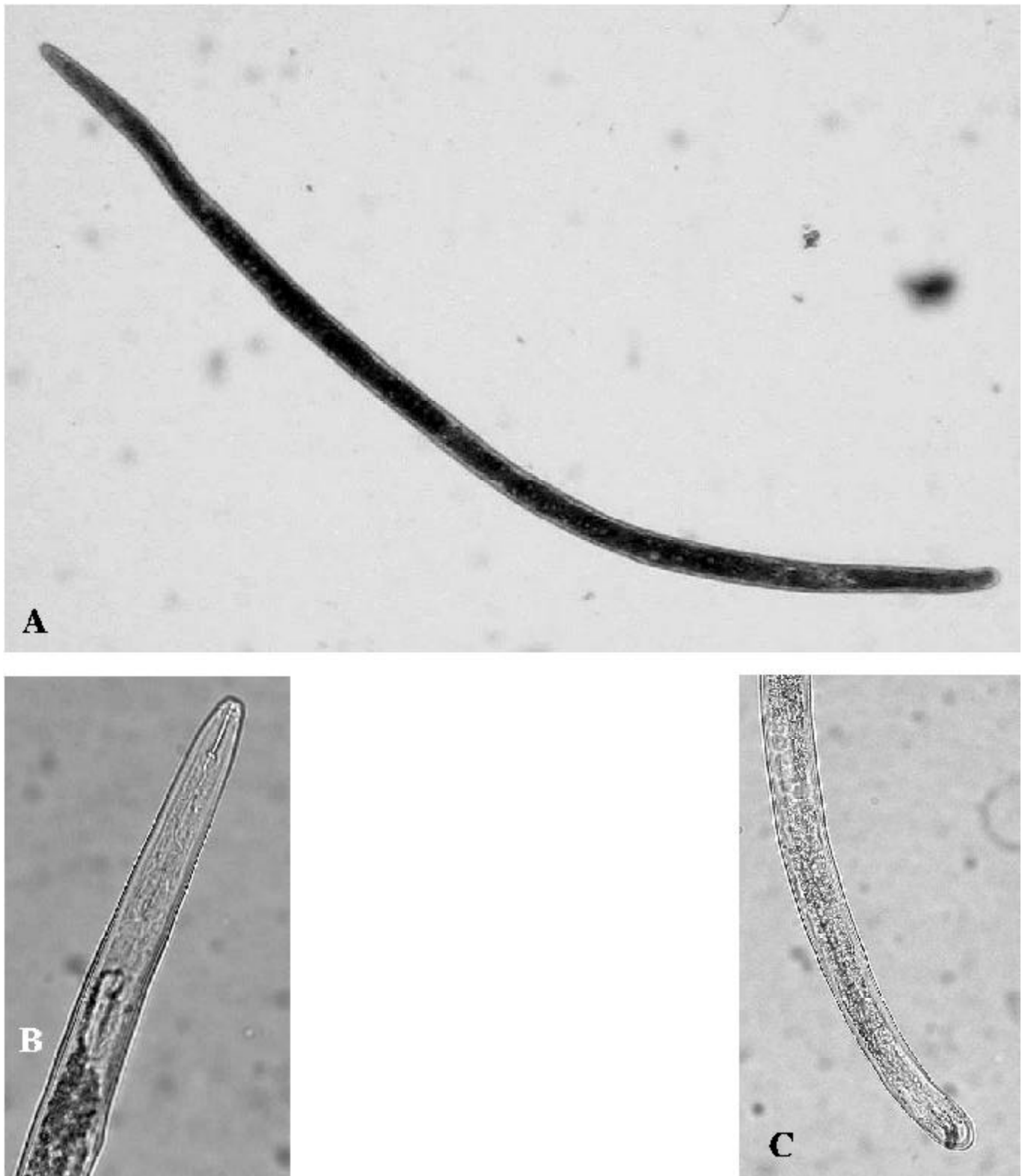
**Tabla 1.** Población y géneros de nematodos fitoparásitos identificados en suelo y raíces de guayabo pera, hacienda La Rambla, vereda La Cabaña, municipio de Manizales (Caldas), Colombia

Planta	Muestra	Número de nematodos (100g)	Género		
			<i>Meloidogyne</i>	<i>Helicotylenchus</i>	<i>Pratylenchus</i>
1	Raíces	154	0	154 (100)*	0
	Suelo	20	0	20 (100)	0
2	Raíces	99	0	99 (100)	0
	Suelo	120	0	120 (100)	0
3	Raíces	827	165	662 (80)	0
	Suelo	100	25 (25)	75 (75)	0
4	Raíces	1972	1972 (100)	0	0
	Suelo	50	50 (100)	0	0
5	Raíces	4891	4891 (100)	0	0
	Suelo	60	60 (100)	0	0
6	Raíces	357	357 (100)	0	0
	Suelo	60	60 (100)	0	0
7	Raíces	1605	963 (60)	0	642 (40)
	Suelo	60	30 (50)	0	30 (50)
8	Raíces	282	0	141 (50)	141 (50)
	Suelo	10	0	5 (50)	5 (50)
9	Raíces	464	0	0	462 (100)
	Suelo	60	0	0	60 (100)
10	Raíces	120	0	60 (50)	60 (50)
	Suelo	40	0	20 (50)	20 (50)

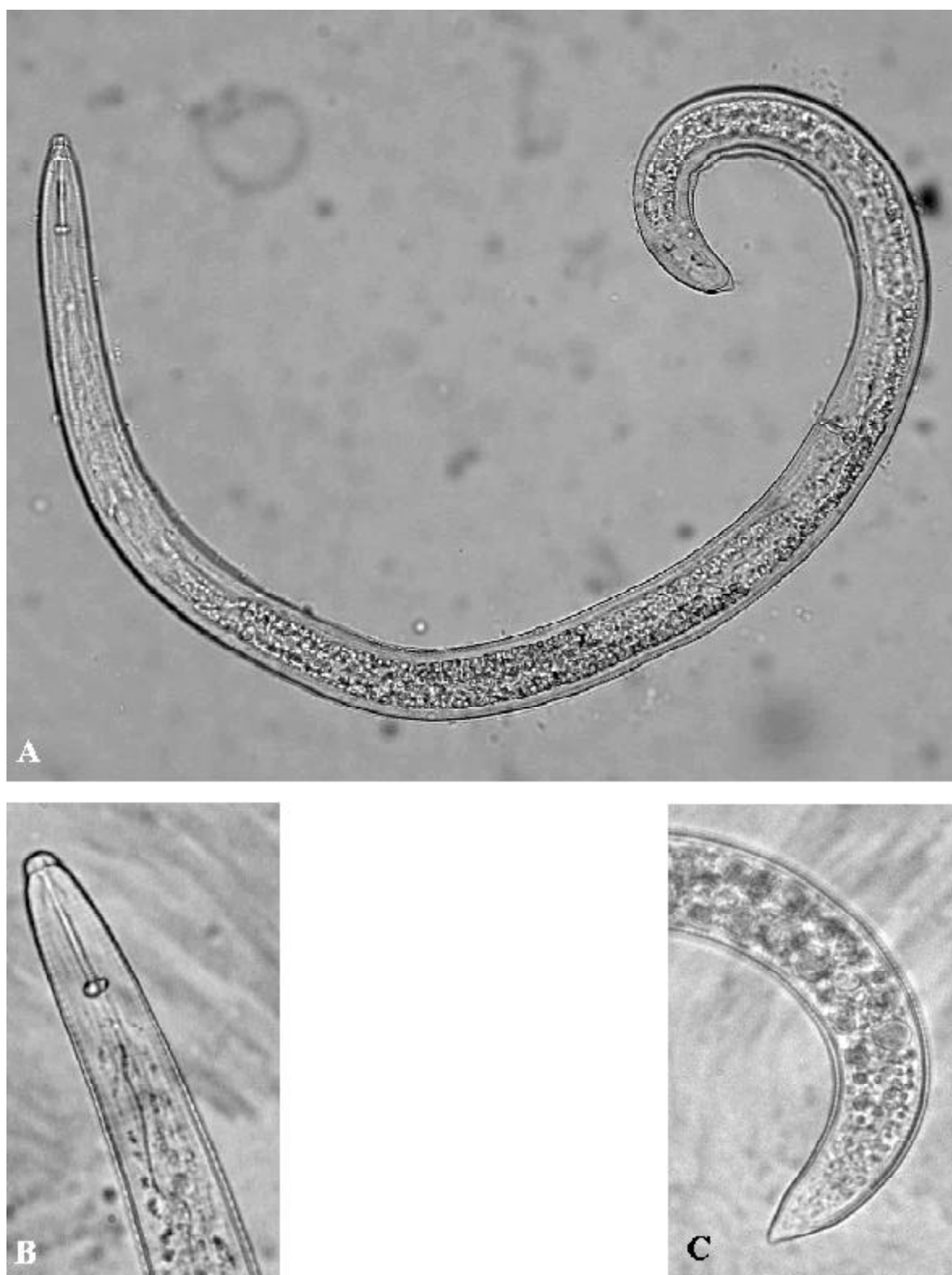
\* El número entre paréntesis significa el porcentaje del género de nematodo sobre la muestra.



**Figura 1.** Nematodo nodulador de la raíz (*Meloidogyne* spp.). A. Estado juvenil (J2) completo. B y C. Región de la cabeza y cola de J2, respectivamente.



**Figura 2.** Nematodo nodulador de la raíz (*Meloidogyne* spp.). A. Macho adulto completo. B y C. Región de la cabeza y cola de macho, respectivamente.



**Figura 3.** Nematodo espiral (*Helicotylenchus* spp.). A. Hembra adulta completa. B y C. Región de la cabeza y cola de hembra, respectivamente.





**Figura 4.** Nematodo lesionador (*Pratylenchus* spp.). **A.** Hembra adulta completa.  
**B y C.** Región de la cabeza y cola de hembra, respectivamente.

**Tabla 2.** Presencia y porcentaje de cada género de nematodo encontrado en las muestras analizadas.

Planta	Género		
	<i>Meloidogyne</i>	<i>Helicotylenchus</i>	<i>Pratylenchus</i>
1	no	sí	no
2	no	sí	no
3	sí	sí	no
4	sí	no	no
5	sí	no	no
6	sí	no	no
7	sí	no	sí
8	no	sí	sí
9	no	no	sí
10	no	sí	sí
<b>Porcentaje</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>40</b>

nematodo, mostrando que puede existir competencia por el lugar alimenticio entre los tres géneros de nematodos fitoparásitos identificados.

*Meloidogyne* spp., que es el nematodo registrado como más perjudicial, se encontró en el 50% de las muestras analizadas, lo cual resalta la importancia de adquirir plantas de guayabo Pera de viveros certificados y/o el tratamiento del suelo antes de la siembra.

Debido al daño que causa este nematodo en el sistema radical, al igual que puede ser un factor predisponente para que actúen otros microorganismos (hongos, bacterias y virus), es necesario monitorear sus poblaciones y comenzar a realizar un manejo integrado del cultivo.

Finalmente, la decisión o recomendación de un programa de manejo integrado de nematodos fitoparásitos se debe basar en el conocimiento de los géneros y las densidades poblacionales, que son la base para la selección e implementación de cualquier medida de manejo.

## Bibliografía

- Agrios G.** 2005. Plant pathology. 5 ed. Nueva York: Elsevier Academic Press. 922 p.
- AGRONET.** 2009. Red de información y comunicación del sector agropecuario de Colombia. <http://www.agronet.gov.co/agronetweb/Boletines/tabid/75/Default.aspx>
- Araya M. et al.** 1995. Densidad poblacional y frecuencia de los nematodos parásitos de banano (*Musa* AAA) en nueve cantones de Costa Rica. CORBANA. **20**(43): 6-11.
- Bolaños M. et al.** 2007. Evaluación de prácticas de manejo de nematodos parásitos en cultivos de guayabo en el Valle del Cauca. Plegable divulgativo, noviembre de 2007.

**Cabrales L.** 1995. Determinación del sitio de muestreo de raíces en estudios nematológicos del banano. ASCOLFI. **19**(1): 129-135.

**Castañó Zapata J. & H. Salazar.** 1998. Illustrated guide for identification of plant pathogens. Universidad de Caldas. Manizales, Colombia. pp. 74-98.

**Castillo P & N. Vovlas.** 2008. *Pratylenchus* (Nematoda, Pratylenchidae): Diagnosis, biology, pathogenicity and management. Nematology Monographs and Perspectives. Brill Academic Publishers. 529 p.

**Lozano C. et al.** 2002. Manual sobre el cultivo de la guayaba en Colombia. Fruticultura colombiana. Cali, Colombia. 278 p.

**Luc M. et al.** 1990. Morphology, anatomy and biology of plant parasitic nematodes – a synopsis. En: Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture. Edited by Luc M. & J. Sikora. CAB International. Londres. pp. 1-44.

\_\_\_\_\_, **R. Sikora & J. Bridge.** 2005. Plant Parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture. 2nd Edition. 871 p.

**Mai W., P. Mullin & H. Lyon.** 1996. Plant parasitic nematodes. A pictorial key to genera. Fifth edition. Comstock Publishing Associates. A Division of Cornell University Press. 277 p.

**Meredith J.** 1973. Algunos métodos de campo y laboratorio para trabajar con nematodos. Maracaibo, Venezuela. 44 p.

**Mitkowski A. & G. Abawi.** 2003. Plant disease lessons: Root-knot nematode pathogen: *Meloidogyne* species. The American Phytopathological Society. <http://www.apsnet.org/education/LessonsPlantPath/RootKnotNema/default.htm>

**Mosquera A. et al.** 1994. Susceptibilidad del guayabo a nematodos fitoparásitos. ASCOLFI Informa **20**(6): 71-75.

**Mosquera A. et al.** 1997. Efecto de extractos vegetales y hongos patógenos en la población de nematodos de guayaba *Psidium guajava* L. Fitopatología Colombiana. **21**(2): 25-29.

**Perry R. & M. Moens.** 2006. Plant nematology. CAB International. London. 447 p.

\_\_\_\_\_, **& J. Starr.** 2009. Root knot nematodes. CAB International. London. 480p.

**Román J.** 1978. Fitonematología tropical. Colegio de Ciencias Agrícolas. Universidad de Puerto Rico. 256 p.

**Siddiqi R.** 2001. Tylenchida: Parasites of plants and Insects. CAB International. London. 864 p.

**Taylor A.** 1968. Introducción a la nematología vegetal aplicada. Guía de la FAO para el estudio y combate de los nematodos parásitos de las plantas. Roma. 131 p.

**Thorne G.** 1961. Principles of nematology. USA. McGraw-Hill- Book Company. 547 p.

**Villota F. & F. Varón.** 1997. Evaluación de materiales de guayaba (*Psidium guajava* L) por su comportamiento al ataque de *Meloidogyne incognita* Raza 2. Fitopatología Colombiana **21**(2): 31-37.

[http://www.frutasyhortalizas.com.co/portal/Business/product\\_view.php](http://www.frutasyhortalizas.com.co/portal/Business/product_view.php)

Recibido: mayo 4 de 2009.

Aceptado para su publicación: diciembre 18 de 2009.

