ISSN 0370-3908

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXXIV | JUNIO DE 2010 | NÚMERO 131

DIRECTOR DE LA REVISTA: PEDRO PRIETO

CONTENIDO - CONTENTS

Pág.

Botánica (Botany)
Mejoramiento nutricional de la rosa para el manejo de *Peronospora sparsa* Berkeley, causante del mildeo velloso
[Nutritional improvement of rose to manage *Peronospora sparsa*, causal agent of downy mildew]
Carlos Fernando Castillo, Elizabeth Álvarez, Eduardo Gómez, Germán A. Llano y Jairo Castaño Zapata 137

Evaluación de caracteres del cáliz y de los estambres en la Tribu Merianieae (*Melastomataceae*) y definición de homologías
[Evaluation of calyx and stamen characters in the Tribe Merianieae (*Melastomataceae*) and definition of homologies]
Humberto Mendoza-Cifuentes & José Luis Fernández-Alonso 143

Ciencias de la Tierra (Earth Sciences)
Isla de calor y cambios espacio-temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá
[Heat island and temperature spatiotemporal changes in Bogotá city]
Laura Ángel, Alberto Ramírez, Efraín Domínguez 173

Física (Physics)
Comparación del módulo de elasticidad de espumas con base poliolefina, obtenidos en ensayos de compresión e indentación por caída de dardo. Curvas de amortiguamiento dinámico.
[Comparison of the elasticity modulus of polyolefin foams obtained from compression and indentation tests by dard fall. Dynamic cushioning curves]
O. A. Almanza, J. G. Carriazo, M. A. Rodríguez – Pérez, J. A. de Saja 185

¿Qué rayos sabemos?
[What on the lightning do we know?]
Horacio Torres Sánchez 193

Geología (Geology)
Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias
[A review of landslides triggered by rainfall]
Edier Aristizabal, Hernán Martínez & Jaime Ignacio Vélez 209

Pág.

Matemáticas (Mathematics)
Polynomials with a restricted range and curves with many points
[Polinomios de rango restringido y curvas con muchos puntos]
César Andrade Ramos & Álvaro Garzón R. 229

Química (Chemistry)
Uso de métodos electroquímicos como herramientas para evaluar parámetros de interfase en sistemas heterogéneos metal/medio acuoso
[Use of electrochemical methods as tools for evaluating interface parameters in heterogeneous systems (metal/aqueous medium)]
Enrique Vera López 241

Zoología (Zoology)
Reporte de un nuevo ejemplar de *Granastrapotherium snorki* en el Valle Superior del Magdalena, Desierto de la Tatacoa, Huila, Colombia
[Notice of a new specimen of *Granastrapotherium snorki* in the Upper Magdalena Basin, Desierto de la Tatacoa, Huila, Colombia]
Mauricio Pardo Jaramillo 253

Estudio taxonómico de los crustáceos decápodos de agua dulce (Trichodactylidae, Pseudothelphusidae) de Casanare, Colombia
[Taxonomic study of freshwater decapod crustaceans (Trichodactylidae and Pseudothelphusidae), from Casanare, Colombia]
Martha Rocha de Campos 257

Constitución de la Academia
(Members of the Academy) 267

Publicaciones de la Academia
(Publications of the Academy) 269

MEJORAMIENTO NUTRICIONAL DE LA ROSA PARA EL MANEJO DE *PERONOSPORA SPARSA* BERKELEY, CAUSANTE DEL MILDEO VELLOSO

Por

Carlos Fernando Castillo[1], Elizabeth Álvarez[2], Eduardo Gómez[2], Germán A. Llano[2], Jairo Castaño Zapata[1]

Resumen

Castillo C. F., E. Álvarez, E. Gómez, G. A. Llano & J. Castaño Zapata: Mejoramiento nutricional de la rosa para el manejo de *Peronospora sparsa* Berkeley, causante del mildeo velloso. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (131): 137-142, 2010. ISSN 0370-3908.

El mildeo velloso *(Peronospora sparsa*), es una de las enfermedades más limitantes del cultivo de rosa en Colombia, con pérdidas hasta del 8% de la producción. El objetivo de esta investigación fue determinar un control preventivo de la enfermedad mediante mejoramiento del balance nutricional. La primera fase, comprendió el estudio del efecto de diferentes concentraciones de N, K, Ca, B y Mn sobre la incidencia y severidad de mildeo velloso, en la segunda, se evaluaron los cinco mejores tratamientos de la primera fase. Los tratamientos se aplicaron a las variedades Charlotte, Classy y Malibú durante 4 semanas, en un arreglo de parcelas divididas con seis replicas; después de un mes se hizo la inoculación mediante aspersión foliar de una suspensión de 3 x 10^4 esporangios mL^{-1}.Los resultados de área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE), indicaron que las plantas de Charlotte con Si a 200 ppm, mostraron la menor expresión de la enfermedad. En Classy, el mejor tratamiento fue la solución estándar, corroborando que el efecto de los tratamientos varía con la variedad. Charlotte y Malibú, mostraron susceptibilidad, mientras Classy mostró resistencia parcial a la enfermedad.

Palabras clave: soluciones nutritivas, silicio, resistencia, mildeo velloso.

Abstract

The downy mildew (*Peronospora sparsa*), is one of the most important diseases of rose in Colombia, causing losses up to 8%. The objective of this research was to determine a preventive control of the disease, through the improvement of the nutritional balance of the plant. The first

1 Universidad de Caldas, correo electrónico: cafol_3@yahoo.com, jairo.castano_z@ucaldas.edu.co

2 Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), correo electrónico: e.alvarez@cgiar.org

phase, involved the effect of different concentrations of N, K, Ca, B and Mn, on the incidence and severity of the disease, and in the second one, the evaluation of the best five treatments of the first phase. The treatments were applied to the varieties Charlotte, Classy and Malibú during 4 weeks, using a splitting plot design with six replications. After one month the plants were inoculated with the fungus at a concentration of $3x10^4$ sporangia mL^{-1} .The results of the area under the disease progress curve (AUDPC), showed that the plants of Charlotte with 200 ppm of Si had the lowest expression of the disease. In Classy, the best treatment was the standard solution, demonstrating that the effects of the treatments depend of the variety. Charlotte and Malibú showed susceptibility, while Classy, partial resistance to the disease.

Key words: nutritional solutions, silica, resistance, downy mildew.

Introducción

La rosa es considerada el principal producto dentro de la producción de flores con un 48% del total de las exportaciones, seguido por Clavel 16%, Mini Clavel 8%, Crisantemo 4% y otros 24%. Colombia es el primer exportador de flores hacia Estados Unidos con una participación del 60% del mercado total (**Asocolflores,** 2005).

El mildeo velloso es el mayor problema fitosanitario del cultivo de rosa en Colombia, con pérdidas hasta del 8% de la producción, afecta la productividad de las plantas, calidad del producto a exportar y aumenta los costos de producción, especialmente por el incremento en el número de aplicaciones de fungicidas.

El fortalecimiento del hospedante mediante una nutrición adecuada es una práctica común de manejo preventivo de enfermedades y se hace con el fin de que las plantas sean menos susceptibles a los patógenos. Según la literatura, algunos elementos nutricionales como: nitrógeno, potasio, calcio, boro, silicio y la relación N: K son importantes en el aumento de resistencia a parásitos obligados (**Ivancovich,** 1996; **Krauss,** 2001). Con base en esta premisa se desarrolló esta investigación, con el objetivo de mejorar el balance nutricional del cultivo de rosa, como medida de control preventivo del mildeo velloso, causado por *Peronospora sparsa* Berkeley.

Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo en dos fases, en los laboratorios e invernaderos del Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. La primera fase, comprendió el estudio del efecto de varios nutrientes sobre la incidencia y severidad de mildeo velloso, para lo cual se prepararon soluciones nutritivas con N, K, Ca, B y Mn en concentraciones de 50% y 150% en una solución nutritiva estándar. También se evaluó el efecto de Si en concentraciones de 50, 100 ppm y 150 ppm. En la segunda fase, se evaluaron los mejores tratamientos de la primera fase, en comparación con una solución estándar. Las soluciones nutritivas se prepararon de acuerdo con la fórmula sugerida por el doctor Raúl Cabrera (Profesor Asociado de la Universidad de Texas A & M, Estados Unidos), con un pH final entre 5.5 y 6.5.

En la segunda fase, también se evaluaron dos soluciones nutritivas con diferentes variaciones en la relación de N/K, N/Cu, Ca/K, Ca/Mn y Ca/B, en comparación con la solución estándar, utilizando las variedades Charlotte y Classy. Los tres tratamientos fueron: a) solución nutritiva estándar; b) solución nutritiva con la siguiente relación de elementos N/K: 1.3, N/Cu: 3090, Ca/K: 0.44, Ca/Mn: 38, Ca/B: 262; y c) solución nutritiva con la siguiente relación de elementos N/K: 2.2, N/Cu: 5000, Ca/K: 1.1, Ca/Mn: 200, Ca/B: 600. Estas relaciones se basan en los niveles adecuados para relaciones nutricionales recomendadas por la Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia.

Para los ensayos se utilizaron plantas de las variedades comerciales de rosa Charlotte, Classy y Malibú, de 8 semanas de injertadas sobre el patrón Natal Briar. Después de 3 semanas de establecidas en una mezcla de arena, suelo franco arcilloso del CIAT y cascarilla de arroz en proporción 6:4:1, bajo condiciones de casa de malla, las plantas se trasplantaron a macetas plásticas con 1.1 Kg de arena cuarcítica previamente humedecida con agua deionizada. Posteriormente se iniciaron los riegos con las respectivas soluciones nutritivas, aplicando 50 mL/planta dos veces al día y 50 mL de agua deionizada cada 4 días, para evitar la acumulación de sales en el sustrato. Durante 3 semanas, las plantas se mantuvieron con las soluciones nutritivas a una temperatura de 18°C a 35°C y humedad relativa entre 35% y 98 %. Las plantas fueron podadas una semana después del transplante con el fin de estimular el desarrollo de tejido joven óptimo para la infección con *P. sparsa*.

Los tratamientos se distribuyeron en un diseño de parcelas divididas con cinco replicas, con las variedades como

parcela principal y las soluciones nutritivas como subparcelas. La unidad experimental comprendió ocho plantas. Como testigo (sin inocular), se establecieron tres plantas para cada tratamiento. Cada réplica se estableció por separado a través del tiempo.

Para la segunda fase, la unidad experimental se redujo a seis plantas y se establecieron seis réplicas simultáneas. Los testigos sin inoculación comprendieron tres plantas por unidad experimental y tres réplicas.

En los ensayos de la segunda fase y en la evaluación de soluciones con diferentes relaciones nutricionales, se utilizaron plantas de las variedades Charlotte y Classy de 8 semanas de edad, sembradas en arena.

Producción de inóculo de Peronospora sparsa. Con el fin de mantener producción continua de inóculo del hongo, se mantuvieron plantas de la variedad Charlotte infectadas con mildeo velloso, en cámara de humidificación, a una temperatura mínima de 19ºC en la noche y máximo 35ºC en el día, y humedad relativa entre 31% y 98%. Las plantas se podaron periódicamente para mantener hojas nuevas donde coloniza fácilmente el patógeno. El inóculo se obtuvo a partir de hojas con síntomas típicos de la enfermedad y presencia de esporangios de *P. sparsa*.

Se recolectaron hojas de la variedad Charlotte, con esporangios de *P. sparsa* y se sumergieron en recipientes plásticos con agua deionizada estéril y solución Tween 80 al 0.1%, seguido de agitación por 20 min. Se ajustó la concentración final del inóculo a $3x10^4$ esporangios mL^{-1} mediante recuento en un hemacitómetro, marca American Optical Co.

Inoculación. La inoculación de las plantas establecidas en arena con las diferentes soluciones nutritivas, se llevó a cabo mediante aspersión empleando un aspersor DeVilbiss modelo 15 adaptado a una bomba de vacío marca Welch Thomas modelo No. 254B-01 y con un manómetro Ashroft 723-09 a una presión de 2 kg cm^{-2} (28 psi), asperjando todas las hojas de las plantas por el haz y el envés, a una distancia de 40 cm., cubriendo ambas superficies con una película de agua libre. Con el fin de asegurar el establecimiento del hongo, las plántulas, se expusieron durante 4 horas a una humedad relativa de 95% y presencia de agua libre (**Gómez,** 2004). Para tal fin se utilizó una cámara plástica provista de un humidificador eléctrico y a temperatura entre 19°C y 35°C.

Aunque en investigaciones realizadas por **Gómez** (2002) se registró inhibición de *P. sparsa* a temperaturas mayores a 20°C, en este caso se obtuvo inóculo a temperaturas que alcanzaron 35°C, siempre y cuando la humedad relativa fuera mayor de 95% y se presentara lámina de agua libre en las hojas.

En el mismo invernadero, fuera de la cámara húmeda, se mantuvieron plántulas con los mismos tratamientos de nutrición, no inoculadas, bajo un sistema de microaspersión durante un min. a las 2, 6, 8, 10, 11 y 12 a.m., y 1, 2, 4, 6 y 10 p.m., con temperaturas que oscilaron entre 34.4°C en el día y 22.2°C en la noche y humedad relativa entre 64% y 98%.

Evaluación. Durante el periodo de inoculación y evaluación, las plantas recibieron las soluciones nutritivas con la misma frecuencia. Para mantener uniformidad en la cantidad y edad de las hojas, para las evaluaciones de incidencia y severidad, se dividieron las plantas en dos estratos diferenciando con una cinta, el estrato superior (hojas jóvenes), comprendido entre el ápice y la última hoja con ligera coloración rojiza, y estrato medio, correspondiente a las siguientes tres hojas hacia la base de la planta (hojas maduras). Las evaluaciones de incidencia y severidad se hicieron cada 2 días, a partir del noveno día después de la inoculación, durante 10 días. Se calculó el área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE) para incidencia y severidad.

Resultados y discusión

Los datos presentados corresponden al estrato superior, donde la enfermedad se presentó con mayor severidad y uniformidad.

En la primera fase, las variedades Charlotte y Malibú, mostraron susceptibilidad en su reacción a la enfermedad, sin diferencia significativa entre ellas, mientras que Classy presentó nivel parcial de resistencia (Tabla 1). Los valores de ABCPE para incidencia fueron dos veces menor en Classy que en Charlotte; entre esta variedad y Malibú no se presentaron diferencias significativas, como tampoco entre Classy y Malibú.

En el análisis de ABCPE para **incidencia** entre los tratamientos, para una misma variedad, se observó que para Charlotte, el tratamiento Si 150 ppm (52.47), no mostró diferencias estadísticamente significativas con ninguno de los tratamientos que alcanzaron valores hasta 143.25: N 50%, K50%, Ca 150%, B 50%, B 150%, Mn 150%, Si 100 ppm y solución estándar, pero sí fue significativamente superior a tratamientos como N 150%, K 150%, Ca 50%, Mn 50% y Si 50 ppm, cuyo valor de ABCPE para incidencia fue superior a 143.25. El incremento de N a 150% de su contenido en la solución estándar, aumentó la incidencia de 91.42 a 268.53, en la variedad Charlotte. La concentración baja de silicio en la solución nutritiva, aumentó la

incidencia de la enfermedad en Charlotte y Malibú, con respecto a la solución estándar. En la medida que el silicio aumentó a 100 ppm y 150 ppm, la incidencia se redujo y fue inferior a la presentada con la solución estándar.

Cada variedad se comportó diferente en cuanto al efecto de los tratamientos de nutrición y a la incidencia de la enfermedad, indicando una interacción significativa variedad x tratamiento. Mientras en Charlotte, el mejor tratamiento fue Si 150 ppm y el menos efectivo fue Mn 50%, en la variedad Malibú, el mejor tratamiento fue Mn 50% y el peor fue N 150%; en la variedad Classy, los mejores tratamientos fueron N 50%, Ca 150% y Mn 50%, y los menos efectivos fueron las soluciones con silicio 100 ppm y 150 ppm. En Classy, al contrario de lo ocurrido con las otras variedades, las soluciones con silicio 100 ppm y 150 ppm, aumentaron la incidencia de la enfermedad.

En el análisis de ABCPE para **severidad** se observó que para Charlotte, el mejor tratamiento fue Si 150 ppm (82.09), el cual no mostró diferencias estadísticamente significativas con ninguno de los tratamientos que alcanzaron valores hasta 181.38: N 50%, K 50%, K 150%, Ca 50%, Ca 150%, B 50%, B 150%, Mn 150%, Si 100%, Si 150% y solución estándar, pero sí fue significativamente superior a los tratamientos N 150%, Mn 50% y Si 50 ppm, cuyo valor de ABCPE para severidad fue superior a 181.38 (Tabla 2).

De acuerdo con la Tabla 2, se observó un mayor incremento de la enfermedad con el tratamiento N 150% para las variedades Charlotte y Malibú. La concentración de 50 ppm de silicio en la solución nutritiva, aumentó la severidad de la enfermedad en Charlotte y Malibú, con respecto a la solución estándar. En la medida en que el silicio aumentó a 100 ppm y 150 ppm, la severidad se redujo superando al tratamiento con la solución estándar.

Cada variedad se comportó en forma diferente en cuanto al efecto de las soluciones nutritivas y a la severidad de la enfermedad, indicando una interacción significativa variedad x tratamiento. Mientras en Charlotte, el mejor tratamiento fue Si 150 ppm y el menos efectivo fue Si 50 ppm, en Malibú, el mejor tratamiento fue N 50% y el peor fue N 150%; en la variedad Classy, los mejores tratamientos fueron N 50%, Ca 150% y Mn 50%, y los menos efectivos fueron las soluciones con Si 100 ppm y N 150%.

Con base en los promedios de los tratamientos para las variedades evaluadas, el aumento de la concentración de N en la solución, favoreció la incidencia y severidad de la enfermedad, resultado que concuerda con estudios que registran aumento de ataque de parásitos obligados (**Marschner,** 1995), como *P. sparsa*. Por su parte, el aumento de la concentración de Si, Ca y Mn, redujo la expresión de mildeo velloso, mientras que el incremento de la concentración de B redujo los síntomas de la enfermedad en la variedad Malibú (Tablas 1, 2).

Tabla 1. Área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE) calculada con base en la **incidencia** del mildeo velloso en las variedades de rosa Charlotte, Malibú y Classy, cultivadas en arena con 14 soluciones nutritivas.

Tratamiento	ABCPE (Incidencia)			
	Charlotte	Malibú	Classy	Promedio
N 50%	117.95	42.77	0	53.57
N 150%	268.53	132.20	58.34	153.02
K 50%	98.20	61.36	111.32	90.29
K 150%	161.94	63.77	33.33	86.34
Ca 50%	170.07	87.98	22.91	93.65
Ca 150%	140.59	85.26	0	75.28
B 50%	108.32	97.67	94.35	100.11
B 150%	97.19	78.77	97.54	91.16
Mn 50%	224.12	22.91	0	86.51
Mn 150%	107.96	68.48	86.06	87.50
Si 50 ppm	216.46	126.90	79.17	140.84
Si 100 ppm	97.50	86.66	125.82	103.32
Si 150 ppm	52.47	68.82	118.10	79.79
Solución estándar	91.42	84.73	119.84	98.66
Promedio variedad	139.48	79.16	68.52	
DMS α = 5% variedades				64.42
DMS α = 5% tratamientos	90.78	90.78	90.78	24.26

Tabla 2. Área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE) calculada con base en la **severidad** del mildeo velloso en las variedades de rosa Charlotte, Malibú y Classy, cultivadas en arena con 14 soluciones nutritivas.

Tratamiento	ABCPE (Severidad)			
	Charlotte	Malibú	Classy	Promedio
N 50%	122.08	57.76	0	59.94
N 150%	242.4	150.6	47.66	146.88
K 50%	85.36	72.64	43.9	67.3
K 150%	178.5	80.83	24.81	94.71
Ca 50%	155.34	99.19	36.6	97.04
Ca 150%	138.74	87.18	0	75.3
B 50%	109.35	137.7	43.78	96.94
B 150%	132.38	82.28	74.42	96.36
Mn 50%	225.52	60.44	0	95.32
Mn 150%	95.83	74.97	56.28	75.69
Si 50 ppm	235.67	130.97	23.37	130
Si 100 ppm	103.34	110.05	62.09	91.82
Si 150 ppm	82.09	93.17	37.68	70.98
Solución estándar	121.14	117.19	76.06	104.79
Promedio variedad	144.83	96.78	37.61	
DMS α = 5% variedades				98.01
DMS α = 5% tratamientos	99.29	99.29	99.29	26.53

Comprobación de los mejores nutrientes de la primera fase

En la primera fase, las soluciones con incremento en Ca, Mn y B y la solución con mayor concentración de Si, mostraron la mayor efectividad en la reducción de la enfermedad. Por lo tanto, en la segunda fase, se compararon las soluciones con estos elementos a 150% y el silicio a 200 ppm, con respecto al efecto de la solución estándar sobre el mildeo velloso de la rosa.

De acuerdo con los resultados del ABCPE para **incidencia** y **severidad**, se observó que las plantas de la variedad Charlotte con el tratamiento Si 200 ppm mostraron la menor expresión de la enfermedad (Tabla 3). En la variedad Classy, el mejor tratamiento fue la solución estándar, corroborando que el efecto de los tratamientos varía con la variedad.

Mediante comparaciones ortogonales de cada tratamiento con la solución estándar, para la incidencia y severidad en la variedad Charlotte, se determinó que el tratamiento Si 200 ppm fue el único con diferencia estadísticamente significativa con respecto a la solución estándar. En la variedad Classy no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (Tabla 3).

Los resultados para incidencia y severidad muestran un efecto positivo en la aplicación de Si 200 ppm sobre el desarrollo de la enfermedad en la variedad Charlotte, mientras que la aplicación de la solución estándar resultó en mayor incidencia y severidad de la enfermedad en esta variedad. Los tratamientos con Ca 150%, Mn 150% y B 150% comparados con la solución estándar, mostraron menor expresión de la enfermedad en Charlotte; sin embargo, de acuerdo con los resultados de la primera etapa, la solución estándar mostró efectividad relativa en el control de la enfermedad.

Soluciones nutritivas con variación en las relaciones nutricionales

En las variedades Charlotte y Classy, el tratamiento No. 1 (relaciones más bajas) fue el que mantuvo la **incidencia** y **severidad** más baja, en comparación con las ABCPE de la solución nutritiva estándar y solución del tratamiento No. 2 (relaciones más altas). Consistentemente, la relación de nutrientes del tratamiento No. 1 (relaciones más bajas) superó al estándar, mientras que la relación de nutrientes del tratamiento No. 2, fue inferior al estándar en las variedades evaluadas. Aunque las diferencias entre tratamientos no fueron estadísticamente significativas, los valores para incidencia y severidad del tratamiento No. 1 fueron muy inferiores a la solución estándar y al tratamiento No. 2 (Tabla 4). Estos resultados corroboran la recomendación de la Universidad Jorge Tadeo Lozano sobre balance entre nutrientes.

Este estudio indica que el balance entre algunos nutrientes es importante para mantener un adecuado estado fitosanitario de las plantas. De acuerdo con los resultados del ensayo de relaciones, la solución estándar fue relativamente efectiva en el control de la enfermedad. La DMS (α= 5%) entre variedades para incidencia (93.25) y severidad (48.02), indica que las dos variedades evaluadas son estadísticamente diferentes, siendo más resistente la variedad Classy (Tabla 4).

Las diferencias entre tratamientos para el promedio de las dos variedades no fueron significativas. La DMS α= 5% para incidencia fue de 114.22, valor que supera las diferencias entre los tratamientos. Igual ocurrió con severidad donde la DMS α= 5% fue 58.82.

Tabla 3. Efecto de cinco tratamientos de nutrición, sobre el área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE), calculada con base en **incidencia** y **severidad** del mildeo velloso en las variedades de rosa Charlotte y Classy, establecidas en arena.

Tratamiento	ABCPE (Incidencia)			ABCPE (Severidad)		
	Charlotte	Classy	Promedio	Charlote	Classy	Promedio
Ca 150%	228.09	162.71	195.40	123.95	80.11	102.03
Mn 150%	211.59	155.68	183.63	113.86	83.11	98.49
B 150%	195.98	165.60	180.79	115.13	76.40	95.76
Si 200 ppm	192.40	178.19	185.29	85.13	78.29	81.71
Solución estándar	264.93	147.38	206.15	131.97	68.25	100.11
Promedio variedad	218.59	161.91		114.00	77.23	
DMS α = 5% variedades			28.18			13.05
DMS α = 5% tratamientos			10.28			10.28

Tabla 4. Efecto de tres soluciones nutritivas, con diferentes relaciones de nutrientes bajo condiciones de hidroponía, sobre el área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE), calculada con base en **incidencia** y **severidad** del mildeo velloso en las variedades de rosa Charlotte y Classy, establecidas en arena.

Tratamiento	ABCPE (Incidencia)			ABCPE (Severidad)		
	Charlotte	Classy	Promedio	Charlote	Classy	Promedio
Tratamiento 1*	228.37	66.08	147.23	122.38	36.33	79.35
Tratamiento 2**	278.8	233.15	255.97	148.36	114.51	131.42
Solución estándar	251.32	153.13	202.22	133.4	68.59	100.99
Promedio variedad	252.83	150.79		134.71	73.14	
DMS α = 5% variedades			93.25			48.02
DMS α = 5% tratamientos			114.22			58.82

*Tratamiento de relaciones nutricionales bajas entre N/K, N/Cu, Ca/K, Ca/Mn y Ca/B; **Tratamiento de relaciones nutricionales altas.

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos, se concluyó:

La variedad Classy mostró resistencia parcial a la enfermedad y respondió a la fertilización, de modo diferente que las variedades Charlotte y Malibú, que fueron susceptibles.

Con la incorporación de 100 a 200 ppm de Si a la solución estándar, se redujeron considerablemente los síntomas y el avance de la enfermedad.

La solución nutritiva con relaciones nutricionales bajas (N/K: 1.3, N/Cu: 3090, Ca/K: 0.44, Ca/Mn: 38, Ca/B: 262), mantuvieron bajos niveles de incidencia y severidad de la enfermedad.

El aumento de nitrógeno a 150% de su contenido en la solución nutritiva estándar, incrementó la incidencia y severidad de la enfermedad, principalmente en las variedades susceptibles.

El aumento de Mn a 150% de su contenido en la solución nutritiva estándar, redujo la enfermedad, comparado con la solución estándar.

El aumento de K a 150% en la solución nutritiva, redujo la enfermedad en las variedades Malibú y Classy, pero la incrementó en la variedad Charlotte.

Referencias bibliográficas

Agrios, G. 1995. Fitopatología. 2da. ed. Editorial Limusa. México. 838 pp.

Asocolflores. 2005. Asociación colombiana de exportadores de flores. Boletín Número 176. Bogotá. D.C.

Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano y CIAA. 1998. La producción de rosas en la sabana de Bogotá y la relación clima-producción – MIPE. Chía, Colombia. 45 pp.

Gómez, S. M. 2002. Influencia de la temperatura en la germinación de esporangios de *Peronospora sparsa*, en rosa. Agronomía Colombiana **20**: 35-38.

Gómez, S. 2004. Determinación de componentes de la biología de *Peronospora sparsa* Berkeley, y caracterización de la respuesta de tres variedades de rosa a la infección del patógeno bajo condiciones de laboratorio e invernadero. Bogotá. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Agronomía. 68 p.

Ivancovich, A. 1996. Manejo de enfermedades. En: Bota, G., A. Ivancovich, L.D. Ploper y I. Laguna (Eds.) Enfermedades de Soja. Manual de Diagnóstico y Manejo, INTA CRBAN EEA Pergamino, 15-32.

Krauss, A. 2001. Potassium and biotic stress. Presented at the 1st FAUBA-FERTILIZAR-IPI Workshop on Potassium in Argentina's Agricultural Systems. 20-21 November 2001, Buenos Aires, Argentina. International Potash Institute (IPI).

http://www.ipipotash.org/presentn/pabs.html consultado junio 2005.

Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd edition. Academic Press, London. 889 p.

Recibido: febrero 1 de 2010.

Aceptado para su publicación: mayo 18 de 2010.

EVALUACIÓN DE CARACTERES DEL CÁLIZ Y DE LOS ESTAMBRES EN LA TRIBU MERIANIEAE (*MELASTOMATACEAE*) Y DEFINICIÓN DE HOMOLOGÍAS

Por

Humberto Mendoza-Cifuentes[1] & José Luis Fernández-Alonso[1,2]

Resumen

H. Mendoza-Cifuentes & J. L. Fernández-Alonso: Evaluación de caracteres del cáliz y de los estambres en la tribu Merianieae (*Melastomataceae*) y definición de homologías. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (131): 143-172, 2010. ISSN 0370-3908.

Los caracteres del cáliz y de los estambres se han utilizado clásicamente para diferenciar géneros y establecer secciones dentro de géneros en la tribu Merianieae (*Melastomataceae*), pero no se han analizado integralmente desde el punto de vista de homologías. Se estableció una lista completa de especies para la tribu y se evaluó la variación de los caracteres del cáliz y los estambres. En total se registran 15 géneros y 277 especies en Merianieae, el 78% de las cuales fueron evaluadas completamente y el resto de ellas parcialmente en lo referente a los caracteres estudiados. Se establecieron 23 caracteres, cinco asociados al cáliz y 18 a los estambres. En Merianieae se presenta gran variación en el desarrollo de los lóbulos y del diente dorsal del cáliz y en la apertura de la caliptra. Las flores son diplostémonas en todos los géneros. Se encontró que en cinco de los géneros (el 80% de las especies de la tribu) los estambres son no geniculados. Se plantea que la ausencia de geniculación en los estambres se originó por fusión de tejidos del conectivo y del filamento, que impide que los estambres se descontorsionen en la antesis. Se cuantifica la variabilidad de los caracteres en los géneros más diversificados y se documentan los problemas de circunscripción existentes entre los géneros *Centronia*, *Graffenrieda* y *Meriania.*

Palabras clave: cáliz, estambres, homología, *Melastomataceae*, Merianieae, morfología.

Abstract

Calyx and stamen characters have been used traditionally to separate genera and also to establish sections within genera in the tribe Merianieae (*Melastomataceae*). However, they have not been analyzed integrally from the point of view of homologies. In this study, a complete species list for

1 Instituto de Ciencias Naturales, Apart. 7495, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. Colombia, Correo electrónico: hummendoza@gmail.com

2 Real Jardín Botánico CSIC, Plaza de Murillo 2, 28014 Madrid, España. Correo electrónico: jlfernandeza@rjb.csic.es

the tribe is presented. We evaluated the variation of calyx and stamens characters. In the tribe Merianieae, there are 15 genera and 277 species; of these, 78 % of the species was completely evaluated for these characters, and the other 22% was partially evaluated. Twenty-three characters were established; five of them were associated with the calyx and 18 with the stamens. In Merianieae, there are many combinations in the development of calyx lobes, the dorsal tooth, and the opening of the calyptra. The flowers are diplostemonous. Be found that in five of the genera (80% of the overal species of the tribe) there are nongeniculate stamen. We conclude that in the group with nongeniculate stamens, there was a merger of tissues of the connective and the filament. This fusion does not allow the stamens to untwist during anthesis. The variability of the characters is quantified in the most diverse genera, and the causes of problems of circumscription between the genera *Centronia*, *Graffenrieda* and *Meriania* are documented.

Key words: calyx, homology, *Melastomataceae*, Merianieae, morphology, stamens.

Introducción

La tribu Merianieae fue establecida por Triana hace cerca de 140 años, y desde entonces ha permanecido estable a los cambios propuestos por diferentes autores, excepto por la exclusión o incorporación de algunos géneros (**Triana**, 1871; **Cogniaux**, 1891; **Renner,** 1993; **Clausing & Renner**, 2001). Es un grupo neotropical y se caracteriza por la presencia de apéndices conectivales dorsales, tálamo del hipanto libre del ovario o parcialmente unido (súpero a medio ínfero), fruto cápsula redondeada (no angulada) y semillas rectas (**Renner**, 1993; **Mendoza & Ramírez**, 2006).

La forma del cáliz y en especial de los estambres son caracteres taxonómicos importantes dentro de la tribu y se han utilizado para establecer subdivisiones seccionales dentro de los géneros, para separar los géneros más diversificados como *Graffenrieda* DC., *Axinaea* Ruiz & Pav. y *Meriania* Sw. y para circunscribir otros géneros como *Centronia* D. Don (**Don**, 1823; **Triana**, 1871; **Wurdack**, 1973, 1980a; **Almeda**, 1993).

A pesar de su importancia taxonómica dentro de Merianieae y en la familia, los caracteres de estas estructuras florales han sido poco evaluados para establecer homologías. **Wilson** (1950) fue el primero que realizó un trabajo comparativo sobre la vascularización de los estambres de Melastomataceae, que incluyó varios géneros de Merianieae. Al nivel filogenético el único trabajo en Merianieae que ha incorporado homologías de caracteres del cáliz o de los estambres es el de **Schulman & Hyvonen** (2003), quienes trabajaron en la filogenia del género *Adelobotrys* DC. Otros trabajos, pero en tribus distintas, que han considerado homologías de estas estructuras son los de **Michelangeli** (2000) en *Tococa* Aubl. (Miconieae), **Fritsch *et al.*** (2004) en la tribu Microlicieae, **Penneys** (2007) en la tribu Blakeeae y **Becquer** (2008) en *Pachyanthus* Rich. (Miconieae). **Goldenberg *et al.*** (2008) analizaron la variación de caracteres de los estambres en el género *Miconia* Ruiz & Pav. con base en una filogenia realizada con caracteres moleculares.

El uso de caracteres del cáliz y de los estambres para establecer géneros dentro de Merianieae ha generado algunos problemas de circunscripción (**Wurdack**, 1973; **Almeda**, 1993) por lo que es importante establecer hasta que punto estos caracteres son filogenéticamente informativos dentro de la tribu. En este contexto, este trabajo pretende evaluar de forma integral la variabilidad de los caracteres del cáliz y de los estambres en el mayor número de especies de Merianieae con la finalidad de establecer homologías que puedan ser utilizadas en futuros análisis filogenéticos. También se pretende presentar una lista actualizada de referencia de los géneros y especies que componen la tribu Merianieae.

Métodos

Lista de especies

Para la obtención de una lista completa de nombres válidos de especies de los géneros de la tribu Merianieae se consultó una serie de fuentes como: las colecciones de algunos herbarios de EEUU (F, MO, NY, US), de Colombia (COL, FMB) y Ecuador (QCA, QCNE); bases de datos como el MelList y W3Tropicos, literatura en general y fotografías de los tipos de especies de la tribu depositados en los herbarios P y K.

Evaluación de caracteres

Para la evaluación de caracteres se utilizaron o bien en flores rehidratadas procedentes de ejemplares de herbario o bien muestras frescas recolectadas en campo durante esta investigación y conservadas en alcohol al 70%. En algunos casos, como complemento se utilizaron descripciones de la literatura y en especial las notas e ilustraciones inéditas de Gleason y Wurdack depositadas en el herbario NY.

Se procedió a evaluar la variabilidad de los caracteres del ápice del cáliz y de los estambres en la mayor cantidad posible de géneros y especies considerados para la tribu. Con fines comparativos, en la evaluación se incluyeron

especies de géneros de otras tribus: Miconieae (*Miconia* y *Clidemia* D. Don), Melastomeae (*Tibouchina* Aubl.) de acuerdo a lo propuesto por **Clausing & Renner** (2001) y Cyphostyleae (*Allomaieta* Gleason), siguiendo el criterio de **Lozano & Becerra** (1999a). También se consideró la totalidad de las especies del género *Wurdastom* B. Walln., de posición tribal incierta pero con caracteres de las semillas y de los estambres que permiten asociarlo a Merianieae (**Mendoza & Ramírez**, 2006).

Del cáliz se evaluaron los siguientes caracteres: el desarrollo de lóbulos calicinos y la dehiscencia y textura de la caliptra. Del androceo y de los estambres se evaluaron su número con respecto a los pétalos, la simetría entre verticilos, el desarrollo y forma del filamento, la disposición de las anteras con respecto al filamento, la forma y posición de los apéndices del conectivo y la disposición del poro de la antera. Para evaluar el desarrollo de los estambres y determinar caracteres como el desarrollo del filamento y aspectos de dimorfismo entre verticilos, se realizaron cortes de botones florales en diferentes etapas de desarrollo de varias especies de los géneros *Meriania*, *Adelobotrys*, *Centronia*, *Graffenrieda*, *Wurdastom* y *Miconia*. También se realizaron cortes de estambres para evaluar la forma del haz vascular del conectivo dorsal.

Los caracteres evaluados se tabularon y se establecieron homologías. Finalmente se sintetizaron las tendencias de cambio de los caracteres dentro de los géneros más diversificados de la tribu.

Resultados y discusión

En total se documentan 15 géneros y 277 especies para la tribu (Apéndice 1). Nombres no considerados por ser sinonimias o que se identificaron en este trabajo que deben

Tabla 1. Diversidad y distribución de los géneros de la tribu Merianieae y número de taxones evaluados.

Tribu / Género	Distribución	No. Total de especies	No. de especies evaluadas > 90%
Tribu Merianieae Triana			
Adelobotrys DC.	Neotrópico	31	22
Axinaea Ruiz y Pavon	Costa Rica hasta Bolivia	39	39
Behuria Chamizo	SE Brasil	14	0
Bisglaziovia Cogniaux	SE Brasil	1	1
Centronia D. Don	Venezuela hasta Perú	15	15 + 1 sp. ined.
Dolichoura Brade	SE Brasil	2	2
Graffenrieda A. P. DC.	Neotrópico	54	46
Huberia A.P. DC.	SE Brasil	16	9
Meriania O. Swartz	Neotrópico	84	70
Merianthera Kuhlmann	SE Brasil	3	3
Neblinanthera Wurdack	Venezuela – NE Brasil	1	1
Ochthephilus Wurdack	Venezuela	1	1
Pachyloma A. P. DC.	Colombia, Venezuela , Guyanas y N. de Brasil	4	3
Phainantha Gleason	Guyanas, Venezuela y Ecuador	5	1
Tessmannianthus Markgraf	Panamá hasta Perú	7	4
Total		277	218
Tribu Miconieae DC.			
Clidemia D. Don	Neotrópico	ca. 175	2
Miconia Ruiz & Pavon	Neotrópico	ca. 1056*	2
Tribu Melastomeae Renner			
Tibouchina Aublet	Neotrópico	ca. 350*	2
Tribu Cyphotyleae Gleason			
Allomaieta Gleason	Colombia	8*	8
Tribu no asignada			
Wurdastom Wallnöfer	Colombia, Ecuador	8*	8

* Datos basados en Todzia & Almeda 1991 (*Tibouchina*), Wallnöfer 1996 (*Wurdastom*), Lozano & Becerra 1999b (*Allomaieta*), Goldenberg 2000 (*Miconia*).

ser sinonimizados se presentan en el Apéndice 2. Del total de especies, 78% fueron evaluadas en la totalidad o la mayoría de los caracteres establecidos para el cáliz y los estambres. El grupo restante sólo se evaluó parcialmente, ya sea por la escasez de colecciones, por la ausencia de flores en antesis en los ejemplares, o por contar con sólo las colecciones tipo.

Caracteres y homologías

Cáliz (caracteres 0-4)

Se establecieron cinco caracteres, uno de los caracteres fue binario y los restantes multiestado (Apéndice 1, Figura 1).

Caracter 0. Forma ápice del cáliz

El primer caracter obedece a la forma de lóbulos calicinos y que se asocia al desarrollo del tálamo del ápice del cáliz y de zonas o líneas de abscisión que permiten que se separen los lóbulos. La caliptra se interpreta como un cáliz con lóbulos fuertemente desarrollados pero en donde no existen los bordes de división de éstos. Una evidencia de lo anterior es la presencia en el interior de las caliptras del género *Centronia* de líneas relictuales de separación de los lóbulos adicionales a las líneas de los haces vasculares asociadas a cada lóbulo. En el extremo de variación de este caracter se encuentra los lóbulos plenamente separados y desarrollados, pero se observaron variaciones intermedias entre éstos. Estados:

0 *Lobulado.* Con lóbulos evidentes ya sean triangulares, redondeados, subulados o lineares (Figuras 1a, 1e, 1i)

1 *Truncado.* Ápice abierto pero con tálamo de los lóbulos poco desarrollado y sin zonas de abscisión como en *Meriania pastazana* Wurdack; aquí también se consideran aquellos talamos calicinos con lóbulos anchamente triangulares poco desarrollados, como ocurre en la mayoría de las especies de *Adelobotrys* (Figuras 1b, 1f, 1j).

2 *Subcaliptrado*. El cáliz es levemente cerrado pero en al ápice sobresalen los pétalos y durante la antesis hay rompimiento parcial del cáliz, como en *Meriania versicolor* L. Uribe (Figuras 1c, 1g, 1k)

3 *Caliptrado.* Cuando el ápice del cáliz es completamente cerrado formando una capucha como en las especies de *Centronia* (Figuras 1d, 1h, 1L)

Caracter 1. Desarrollo de los dientes dorsales del cáliz

Esta estructura en la literatura se conoce como lóbulo externo o diente externo (**Gleason**, 1931, 1939; **Wurdack**, 1973, 1980a, 1993; **Michelangeli**, 2000) y regularmente se ha considerado como un verticilo o confundido con el lóbulo calicino. En este trabajo se considera que es una estructura accesoria que puede desarrollarse en el dorso del lóbulo y en algunos casos ser más grande que éste, pero no se considera como un verticilo. El desarrollo del "diente dorsal" calicino presentó una variación casi continua dentro de la tribu, por lo que se establecieron tres estados que van desde conspicuamente desarrollados hasta no desarrollados. Regularmente los dientes dorsales se asocian a los cálices con lóbulos conspicuos; no obstante, se encontraron casos de cálices caliptrados con dientes externos en la base (*Centronia sessilifolia* Cogn., *Graffenrieda gracilis* (Triana) L. O. Williams). Estados:

0 Dientes dorsales conspicuamente desarrollados (figuras 1a, 1b, 1c, 1d)

1 Dientes dorsales poco desarrollados y a manera de protuberancias, como en *Meriania maxima* Marcgr. (Figuras 1e, 1f, 1g, 1h)

2 Sin dientes dorsales (Figuras 1j, 1j, 1k, 1L)

Caracter 2. Dehiscencia de la caliptra o subcaliptra

Este caracter y los siguientes se asocian a variaciones del cáliz caliptrado o subcaliptrado y no aplican a cálices con lóbulos evidentes o truncados. El caracter corresponde a la forma de dehiscencia de los cálices y que se observó que puede ocurrir por fisuras irregulares, por fisuras que forman lóbulos regulares en igual número que pétalos, o circuncísil. Las observaciones indican que las rupturas se dan por las zonas más delgadas de las caliptras pero no se puede decir que existan ejes definidos longitudinales o verticales de rompimiento. En las caliptras en donde se presentan dientes dorsales, éstos ocasionan que las rupturas se generen en sus lados que son menos gruesos generando lóbulos en igual número que pétalos. En las caliptras apiculadas, las paredes tienden a ser más gruesas hacia el ápice y más delgadas hacia el torus, por lo que la ruptura se da cerca de esta última zona pero irregularmente. Estados:

0 *Apertura por fisuras regulares* que genera lóbulos en igual número que pétalos como en *Meriania versicolor* (Figura 1m)

1 *Apertura por fisuras irregulares* (Figura 1n). La dehiscencia irregular de la caliptra, en ocasiones, ha sido mal interpretada, ya que por factores mecánicos regularmente genera un cáliz truncado similar a como ocurre con la dehiscencia circuncísil. No obstante, este caracter hace referencia a un proceso de apertura del cáliz y no de daño mecánico secundario.

2 *Dehiscencia circuncísil*, o cuando la caliptra cae de forma integra (Figura 1o)

Caracter 3. Forma de la caliptra

Se encontraron tres variantes o estados que se puede considerar homólogos:

0 Caliptras apicalmente *redondeadas* como en *Meriania maguirei* Wurdack y *Centronia sessilifolia* (Figura 1p)

1 Caliptras apicalmente *obtusas* como en *Graffenrieda limbata* Triana (Figura 1q)

2 Caliptras apicalmente *agudas o apiculadas* como en *Centronia brachycera* (Naudin) Triana (Figura 1r)

Caracter 4. Textura de la caliptra

Se observaron variaciones en este caracter que comprende dos estados:

0 Caliptras *papiráceas o cartáceas*

1 Caliptras *membranáceas* transparentes y muy delgadas como ocurre en las especies de *Phainantha* Gleason

Estambres (caracteres 5-17)

De los estambres se establecieron 18 caracteres; nueve fueron binarios, siete con tres estados y dos con cuatro a cinco estados. Los caracteres se abordaron de la siguiente forma:

- **Verticilos estaminales (número y presencia)**: caracteres 5-6
- **Diferencias entre verticilos estaminales (dimorfismo)**: caracteres 7-9
- **Caracteres del estambre (disposición filamento-antera)**: caracter 10
- **Caracteres del conectivo (ubicación, haz vascular, forma de los apéndices)**: caracteres 11-12
- **Caracteres del conectivo-antera (lugar de conexión)**: caracter 13
- **Caracteres de la antera (ubicación del poro, forma, textura)**: caracteres 14-17

Caracter 5. Verticilos - Número de estambres

Corresponde al número de estambres con relación al número de pétalos. Estados:

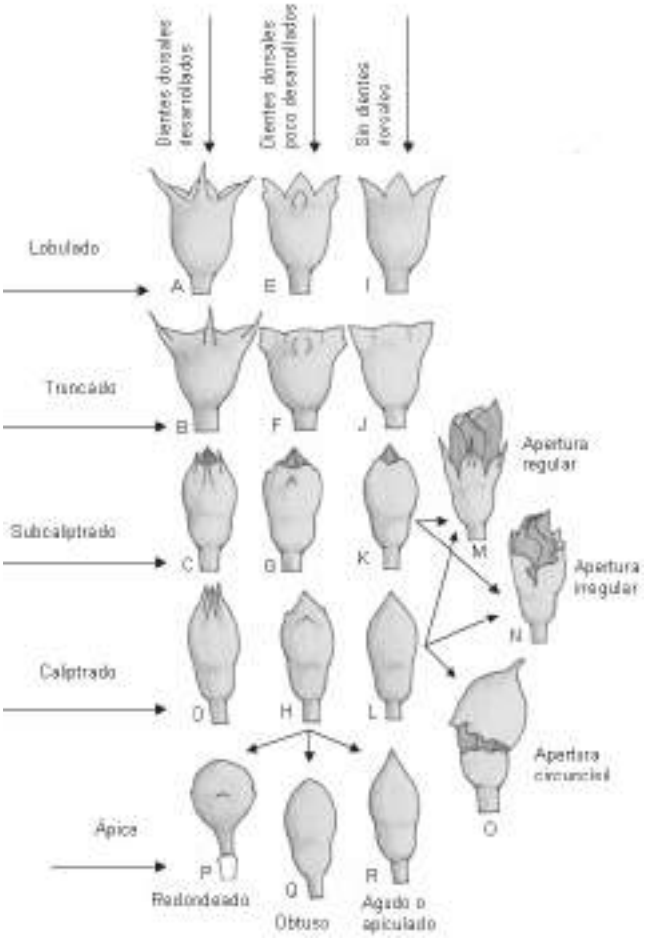


Figura 1. Variación de los caracteres del cáliz en la tribu Merianieae. Tipos de desarrollo de los lóbulos calicinos, forma y dehiscencia de la caliptra (explicaciones complementarias en el texto).

0 *Diplostemonia*, o doble número de estambres que de pétalos.

1 *Haplostemonia*, o igual número de estambres que de pétalos; sólo se documentó para los géneros *Wurdastom* y *Allomaieta* y la especie *Centronia ruizii* Lozano.

Este caracter fue bastante estable entre taxones y puede utilizarse inclusive para establecer divisiones al nivel de tribu. Merianieae presentó exclusivamente flores diplostémonas excepto por una especie de *Centronia*, que posiblemente corresponda a una inadecuada ubicación genérica.

Caracter 6. Verticilos - Presencia de estambres

Este caracter sólo aplica a flores haplostémonas o con igual número de estambres que pétalos y en donde un

verticilo ha desaparecido por completo. Se establecen dos estados:

0 Estambres *opositipétalos* presentes

1 Estambres *opositisépalos* presentes

En la totalidad de las especies haplostémonas consideradas en este estudio, los estambres opositipétalos no existen, por lo que este caracter no varía y puede ser omitido. No obstante, es importante mantenerlo como caracter hasta que sea evaluado en la totalidad de las tribus y los géneros de la familia.

Caracter 7. Diferencias entre verticilos - Dimorfismo estaminal

Corresponde a la simetría en forma-tamaño o variaciones en función entre verticilos de los estambres opositipétalos y laterales a éstos en flores diplostémonas. Este caracter en Merianieae presentó mucha variación y estados intermedios entre la isomorfía y el dimorfismo fuerte, por lo que se estableció un solo caracter con tres estados. Es posible establecer dos caracteres de aquí como sería verticilos isomórficos o dimórficos, y de los dimórficos establecer otro caracter con los diferentes grados de variación entre los verticilos. Sin embargo, no se estableció de esta forma, puesto que se observó que en algunos géneros, como *Axinaea* y *Pachyloma* DC., la variación entre isomorfismo y el dimorfismo puede llegar a ser continua y algunas veces difícil de establecer, por lo que se puede pensar que no es necesario fuertes cambios evolutivos para variar entre el isomorfismo y el dimorfismo leve. Estados (Figura 2):

0 *Verticilos isomórficos*. La isomorfía se consideró entre verticilos y no entre estambres; esto es importante, pues en Merianieae es constante que el androceo durante la antesis adopte un diseño zigomorfo, con estambres de diferente longitud del filamento y ubicados a un lado específico de la flor.

1 *Verticilos levemente dimórficos*. En géneros como *Adelobotrys*, *Axinaea* y *Meriania* se encontraron verticilos de estambres levemente disímiles, ya sea por la longitud del filamento, de la antera o forma del conectivo, pero no hay diferenciación en función. Las diferencias en forma y tamaño no necesariamente son muy conspicuas a simple vista; las funciones se asumen similares.

2 *Verticilos fuertemente dimórficos*. Este estado se aplicó cuando desde la etapa de botón floral se puede percibir diferencias entre los verticilos de estambres; los verticilos presentan diferencias en función, en forma y algunas veces en color. Un ejemplo de este estado se observa en *Meriania peltata* L. Uribe y *M. nobilis* Triana . Este estado también aplica cuando se encuentran verticilos con diferente orientación del poro de la antera, ya que esto se considera como un indicio de variación en función.

Este caracter aún demanda mayor estudio y evaluación en la tribu. La variación en forma-tamaño entre los verticilos puede obedecer a diferentes estructuras como el filamento, la antera y el conectivo o una combinación de los tres, por lo que es posible que se pueda desglosar con detalle el caracter de dimorfismo leve. No obstante, esto es algo bastante difícil de establecer por la configuración zigomorfa que adopta el androceo en la antesis y también por su dificultad de hacer observaciones detalladas en flores secas. La variación leve entre verticilos de estambres en Merianieae posiblemente obedece a efecto de la compactación de las estructuras florales durante su desarrollo en el botón floral. En la mayoría de los casos, este caracter se presentó en especies con flores fuertemente compactadas en la fase de botón floral, mientras que en géneros como *Graffenrieda*, con verticilos isomórficos, los botones florales tienden a tener espacios laxos y el hipanto paredes delgadas. No obstante, esto demanda un mayor estudio.

Las variaciones funcionales entre verticilos y que se considera en este trabajo como dimorfismo fuerte, también demanda mayor evaluación. En *Adelobotrys*, por ejemplo, se encontró una tendencia de variación en la orientación del poro de la antera entre verticilos; no obstante, algunas especies típicas del género no presentaron esta variación y fueron clasificadas como levemente dimórficas. En *Meriania peltata*, se encuentra un verticilo atrofiado y se clasificó en este estado; no obstante, consideramos que no es homologable al dimorfismo fuerte considerado para la mayoría de las especies de *Adelobotrys*. Lo anterior muestra que el caracter de dimorfismo fuerte es posible desglosarlo en varios caracteres como se plantea a continuación, pero cuya evaluación no se abordó en este trabajo.

7.2. A- Verticilos fuertemente dimórficos- Fertilidad

Este caracter hace referencia a las diferencias en fertilidad de las anteras:

0 *Los dos verticilos funcionales* en producción de polen (como en *Adelobotrys* y algunas especies de *Tibouchina*)

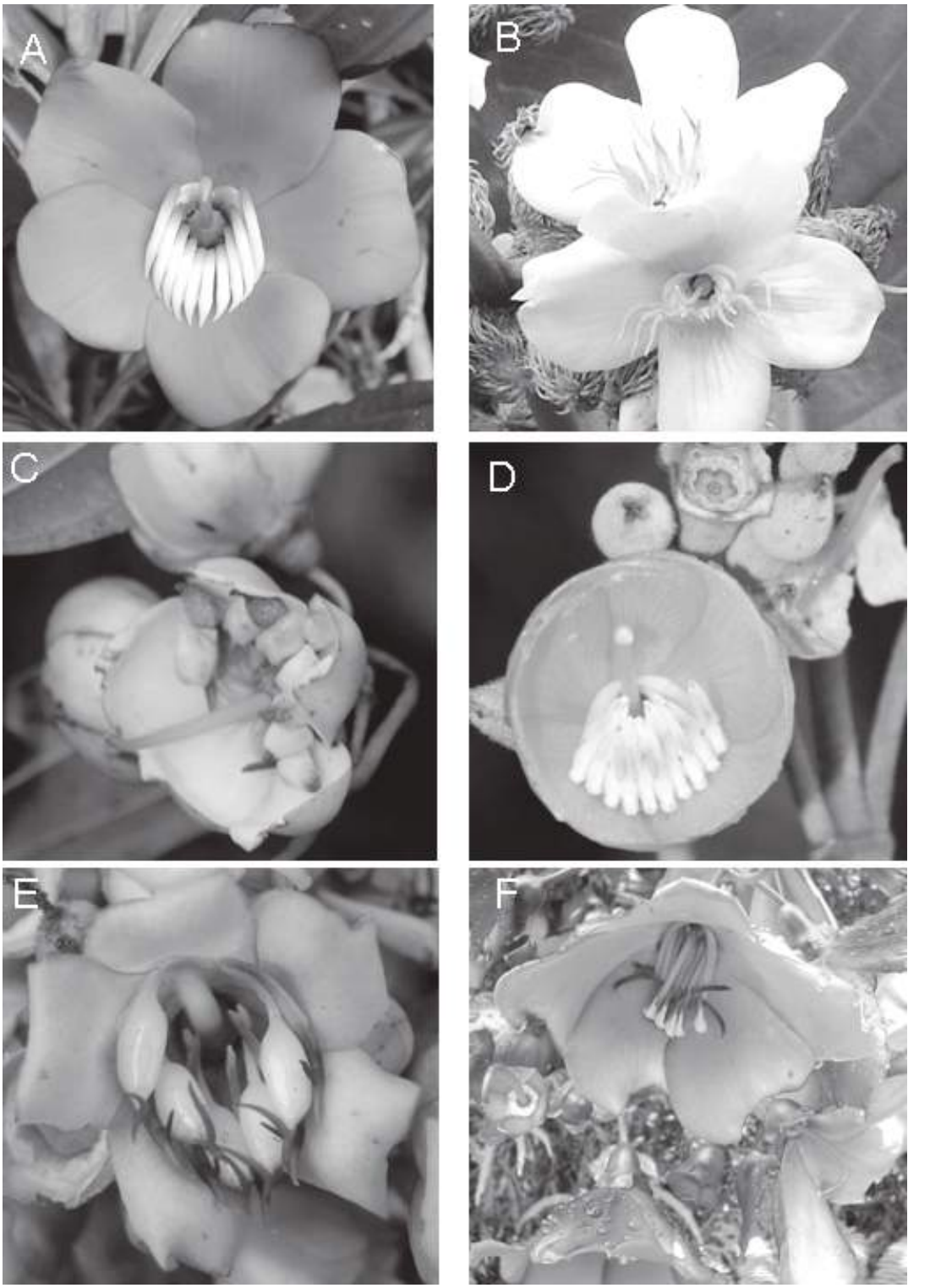


Figura 2. Flores representativas de la variación entre verticilos estaminales en la tribu Merianieae. **A-B**, estambres isomórficos; **A**, *Meriania longifolia* (Naud.) Cog. (Colombia); **B**, *Centronia laurifolia* D. Don (Ecuador); **C-D**, estambres levemente dimórficos; **C**, *Axinaea* sp. (Ecuador); **D**, *Meriania tomentosa* (Cog.) Wurdack (Ecuador). **E-F**, estambres fuertemente dimórficos; **E**, *Meriania peltata* L. Uribe (Colombia); **F**, *Meriania nobilis* Triana (Colombia). Fotografías A, F: de William Ariza; B: de Wilson Quishpe; C: de Robin Foster; D y E: de Humberto Mendoza.

1 *Uno de los verticilos sin función polínica*, atrofiado por completo en función (como en *Meriania peltata*)

7.2. B- Verticilos fuertemente dimórficos – variación en función

Se observaron diferencias notables entre géneros con dimorfismo fuerte, que presentan los dos verticilos funcionales. Aplica sólo a los taxones en donde los dos verticilos son funcionales en producción de polen (estado 0 del anterior caracter):

0 Los verticilos con diferencias muy conspicuas en forma y color, pueden tener igual o distinta orientación del poro. La variación en color puede darse al nivel de las tecas, como en *Tibouchina triflora* Gleason , o del conectivo como ocurre en *Meriania nobilis*.

1 Los verticilos difieren en tamaño y orientación del poro, pero de igual color y más o menos de igual forma (como en muchas especies de *Adelobotrys*)

Este caracter referencia principalmente el tipo de diferencias entre verticilos, ya sea por orientación del poro de la antera o por otro tipo de diferencias. Es un caracter complejo y amerita mayor estudio para desglosarlo, pues las variaciones entre verticilos del estado "0" pueden darse por color o forma. No obstante, esto es difícil de establecer en muestras secas y es necesario contar con flores frescas o con buenas anotaciones de campo.

Otro caracter que se puede considerar referente al dimorfismo funcional es la disposición de los estambres en flores abiertas. Por ejemplo: en *Arthrostemma primaevum* Almeda, los estambres del verticilo menor se disponen en el centro de la flor, mientras que los estambres mayores se disponen de forma zigomorfa a un lado de la flor (**Almeda**, 1994); en *Meriania nobilis*, con dimorfismo funcional pero ambos verticilos poliníferos, los estambres de los dos verticilos se disponen en una misma orientación zigomorfa a un lado de la flor.

El dimorfismo funcional implica una suposición de diferencias en función inferidas a partir de diferencias en la morfología. En algunos casos, como sucede en *M. peltata* y *M. nobilis*, la diferenciación funcional es evidente, pero en otros casos, como en *Adelobotrys*, es simplemente una inferencia.

La diferenciación funcional (de labores) entre verticilos fue planteada por **Darwin** (1862); no obstante, los experimentos realizados desde esa época no fueron efectivos en la comprobación de esta hipótesis (**Müller**, 1881; **Forbes**, 1882). Recientemente, **Luo *et al.*** (2008, 2009) lograron evaluar positivamente la hipótesis de Darwin en varias especies asiáticas de los géneros de Melastomataceae, *Melastoma* L. y *Fordiophyton* Stapf. Estos autores encontraron diferencias en la proporción de producción de polen, la viabilidad del grano de polen y aspectos de polinización entre los verticilos, concluyendo que hay diferenciación funcional entre los dos tipos de estambres.

Caracter 8. Diferencias entre verticilos - Tamaño

Este caracter aplica a androceos dimórficos y en donde se establecen tres estados:

0 Estambres *opositipétalos más grandes* que los opositisépalos

1 Estambres *opositisépalos más grandes* que los opositipétalos

2 Estambres entre verticilos *sin diferencias* notables en tamaño

En la mayoría de las especies en Merianieae, las diferencias en tamaño de los verticilos obedece al tamaño de la antera, por esto, este caracter podría hacer alusión a la longitud y robustez de la antera. Es importante aclarar que no necesariamente los estambres más altos en fases de botón o en flores abiertas son los mayores. En el 81% de los taxones con estambres dimórficos, y en los que se pudo evaluar este caracter, los estambres mayores fueron los opositipétalos, en el 14% fueron los estambres opositisépalos y en el 5% los verticilos fueron de igual tamaño o con diferencias muy leves y en donde difícilmente se puede establecer qué verticilo es mayor. Los únicos géneros que presentaron estambres mayores opositisépalos fueron *Huberia* DC. y *Tessmannianthus* Markgr.

Este caracter fue el más difícil de evaluar en flores rehidratadas y en general en la literatura existen ambigüedades e indefiniciones sobre que verticilo es de mayor tamaño.

Caracter 9. Diferencias entre verticilos - Anteras divergentes en el ápice

Este caracter aplica a taxones en donde las tecas se separan en los ápices en la etapa de antesis. Esta condición en las especies evaluadas sólo se presenta en uno de los dos verticilos estaminales, por lo que se establecen dos estados:

0 Estambres *opositisépalos* con los ápices de las tecas separados

1 Estambres *opositipétalos* con los ápices de las tecas separados

Las tecas divergentes sólo se presentaron en un grupo de especies de *Meriania* de las Antillas y en el género *Tessmannianthus*. La diferencia entre los dos géneros radicó en que en el primero se presentan en los estambres opositisépalos y el último en los opositipétalos. Este caracter también se reporta para una especie de *Henriettella* Naudin de Colombia (**Mendoza & Ramírez**, 2006).

Caracter 10. Estambre - Disposición filamento-antera

Este caracter hace referencia a la forma del estambre y disposición de la antera con respecto al filamento. En *Meriania*, *Centronia*, *Axinaea*, *Graffenrieda* y *Adelobotrys*, se observó que el filamento estaminal en fase de botón siempre es recto y no presenta ninguna clase de flexionamiento en el ápice como sí ocurre con muchas especies de *Miconia* y *Clidemia*. **Cotton** (2003) observó esta característica en *Axinaea* y estableció en su descripción genérica que la antera se dispone en ángulo de 90° con respecto al filamento. **Penneys** (2007) también utiliza este caracter para la tribu Blakeeae, desglosando diferentes grados de orientación de la antera con respecto al filamento.

El codo estaminal en Merianieae. Cortes de los estambres en botones florales y en flores en antesis muestran que en el ápice del filamento en especies de *Meriania*, *Adelobotrys*, *Axinaea*, *Centronia* y *Graffenrieda* se encuentra un flexión del haz vascular (que denominamos con el término "***codo***") rodeado de tejido proveniente tanto del filamento como de la parte basal del conectivo. En especies del género *Miconia* esta curvatura apical es completamente libre y no tiene ninguna fusión de tejidos con el conectivo, generando lo que algunos autores referencian como anteras geniculadas (Figura 3). En las ilustraciones 19, 21 y 22 que representan la vascularización de estambres documentada por **Wilson** (1950), también se observa esta curvatura del haz vascular inmersa en tejidos en géneros de Merianieae. La hipótesis que planteamos al respecto en los principales géneros de Merianieae, es que en el ápice del filamento ocurrió una fusión de tejidos del filamento con tejidos de la base del conectivo, que origina que la antera no se pueda desdoblar y los estambres no sean geniculados. **Schulman & Hyvonen** (2003) plantean este caracter (no. 81) en su trabajo, pero no lo esclarecen completamente al igual que **Penneys** (2007) (caracter 72).

Esta fusión de tejidos origina una estructura subulada o "**codo**" de caracter ambiguo, pues es producto de tejidos de dos estructuras: el filamento y el conectivo. La homologación de esta estructura en Merianieae con la de otros géneros de otras tribus de Melastomataceae se muestra en la Figura 4, donde se retoman las ilustraciones de **Wilson** (1950). Esta homologación primaria se basa en el criterio de posición espacial del ápice del filamento del estambre, pero también cumple el criterio de conjunción (**De Pinna**, 1991), pues los dos estados de caracter propuestos a continuación no se presentan en una misma especie o género.

Para este caracter se plantean dos estados (Figura 5):

0 Estambres *no geniculados*; filamento recto en el botón floral, antera en la antesis orientada en ángulo agudo a recto con respecto al filamento.

1 Estambres *geniculados*; filamento inflexo hacia el ápice en el botón floral, se endereza en la antesis; antera dispuesta en el mismo eje del filamento o levemente diferente pero o no en ángulo recto o agudo.

Caracter 11. Conectivo - Ubicación de los apéndices en estambres opositipétalos

En toda la tribu se observó poca variación en la posición del apéndice conectival. En términos generales predominaron los apéndices dorsales; no obstante, en el género *Phainantha* se encuentra un apéndice conectival basal panduriforme que difícilmente se le puede asignar una orientación. La presencia de apéndices mostró variación entre verticilos, por lo que este caracter sólo se analizó en los estambres opositipétalos. Estados:

0 Apéndices *dorsales* (toda la tribu presenta apéndices dorsales)

1 Apéndices *ventrales*

2 Apéndices *basales* sin orientación definida

Caracter 12. Conectivo dorsal - Forma del apéndice en estambres opositipétalos

El conectivo dorsal en muchos géneros de melastomatáceas neotropicales siempre tiene asociado un haz vascular (**Wilson**, 1950). En Merianieae el conectivo dorsal reviste mayor complejidad dada la fusión planteada anteriormente con el flexionamiento del ápice del filamento y las variaciones de la orientación y división del haz vascular, lo que hace difícil establecer homologías. Esto implica que no se puede considerar sólo la forma externa de los apéndices para establecer homologías, sino que debe considerarse la forma del haz vascular. En la Figura 6, se representa la variación de esta estructura y del haz en los principales géneros de la tribu. Se observa que hay haces vasculares conspicuamente divididos y otros no, unos

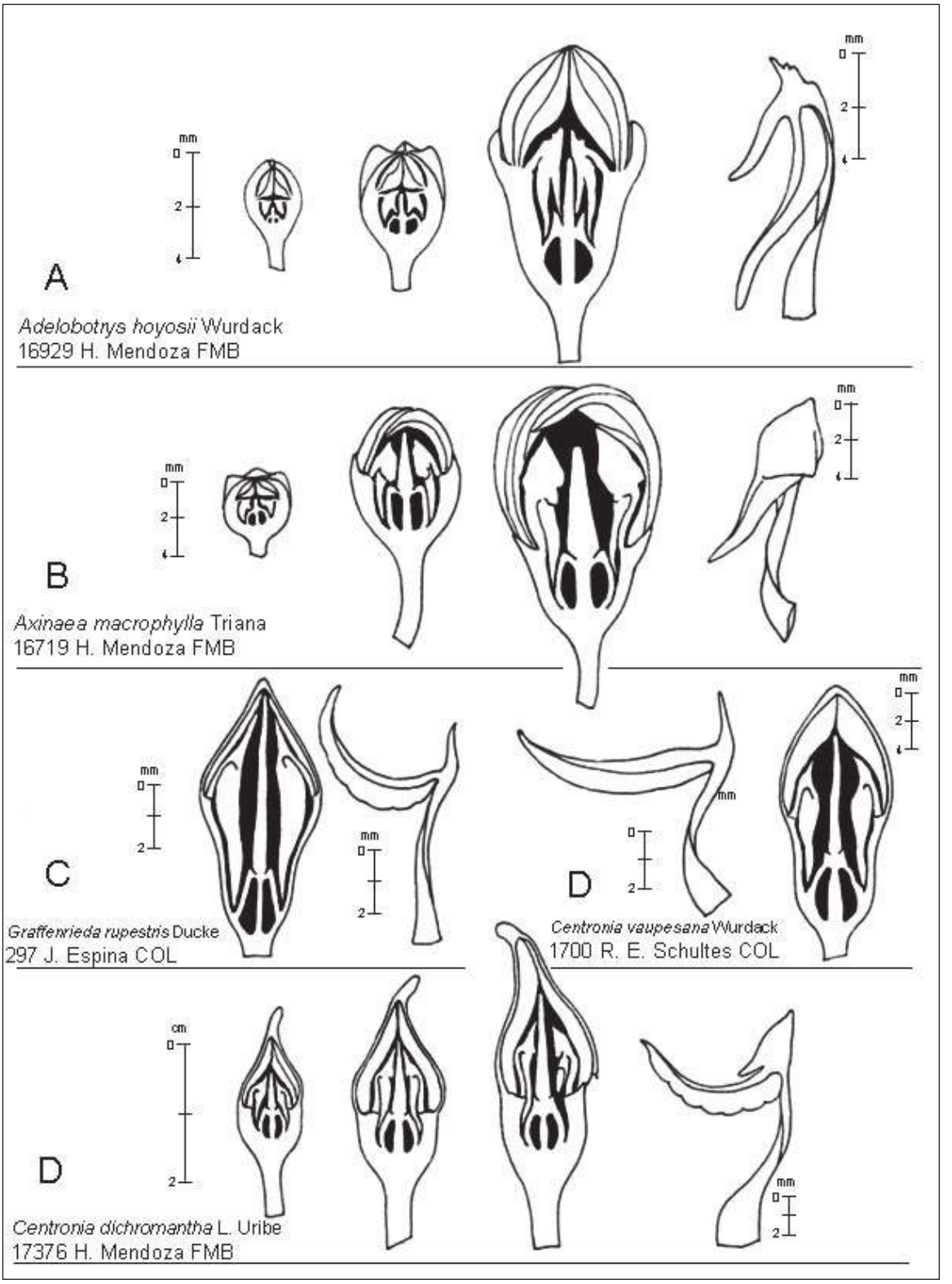


Figura 3-1. Desarrollo de los estambres en diferentes etapas florales en los grupos estudiados de la tribu Merianieae. Al final de cada secuencia de desarrollo se representa un estambre completamente desarrollado. **A-D**, Especies con estambres no geniculados.

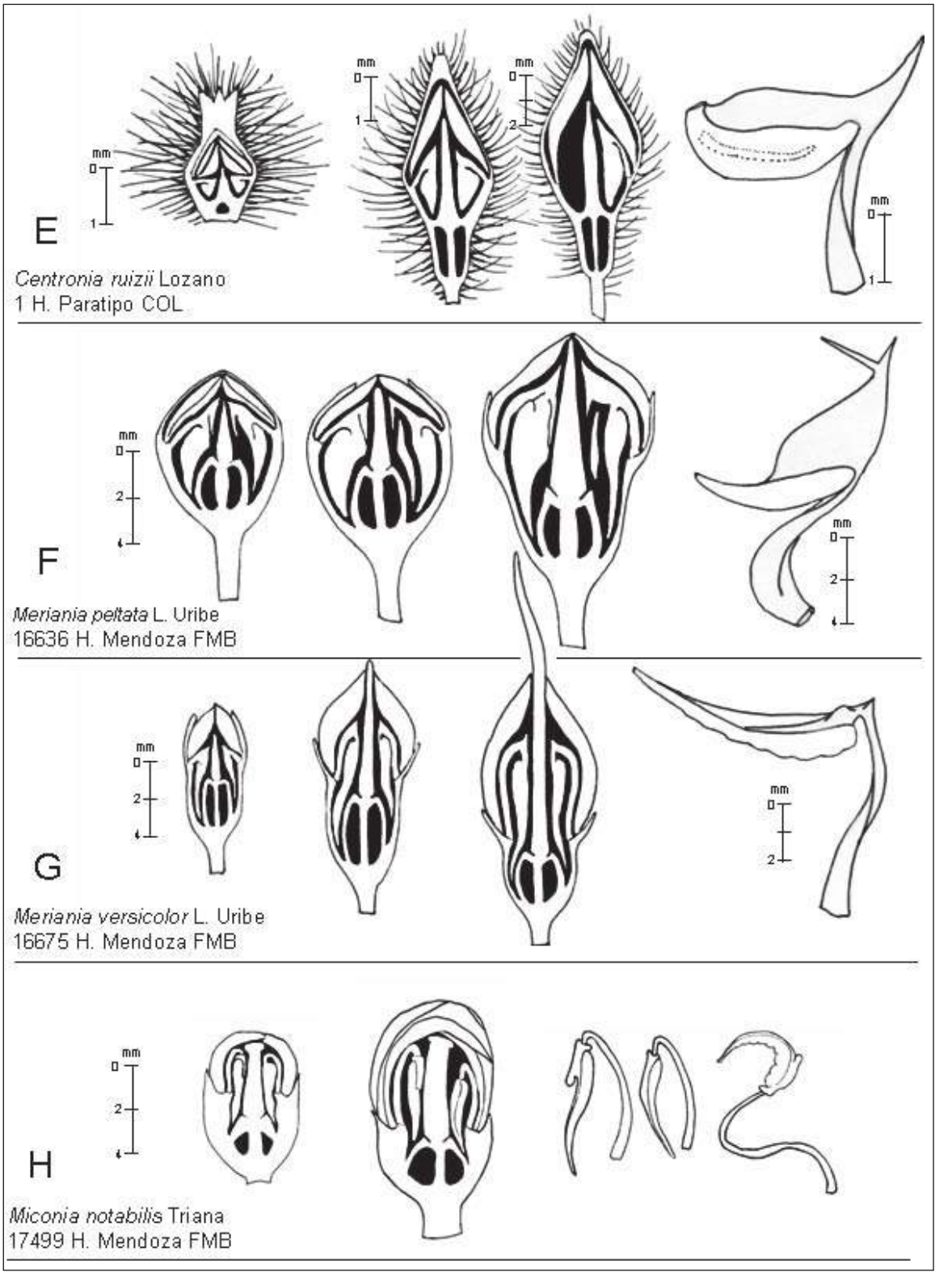


Figura 3-2. Desarrollo de los estambres en diferentes etapas florales en los grupos estudiados de la tribu Merianieae. Al final de cada secuencia del desarrollo se representa un estambre completamente desarrollado. **E-F**, especies con estambres no geniculados; **H**, con estambres geniculados.

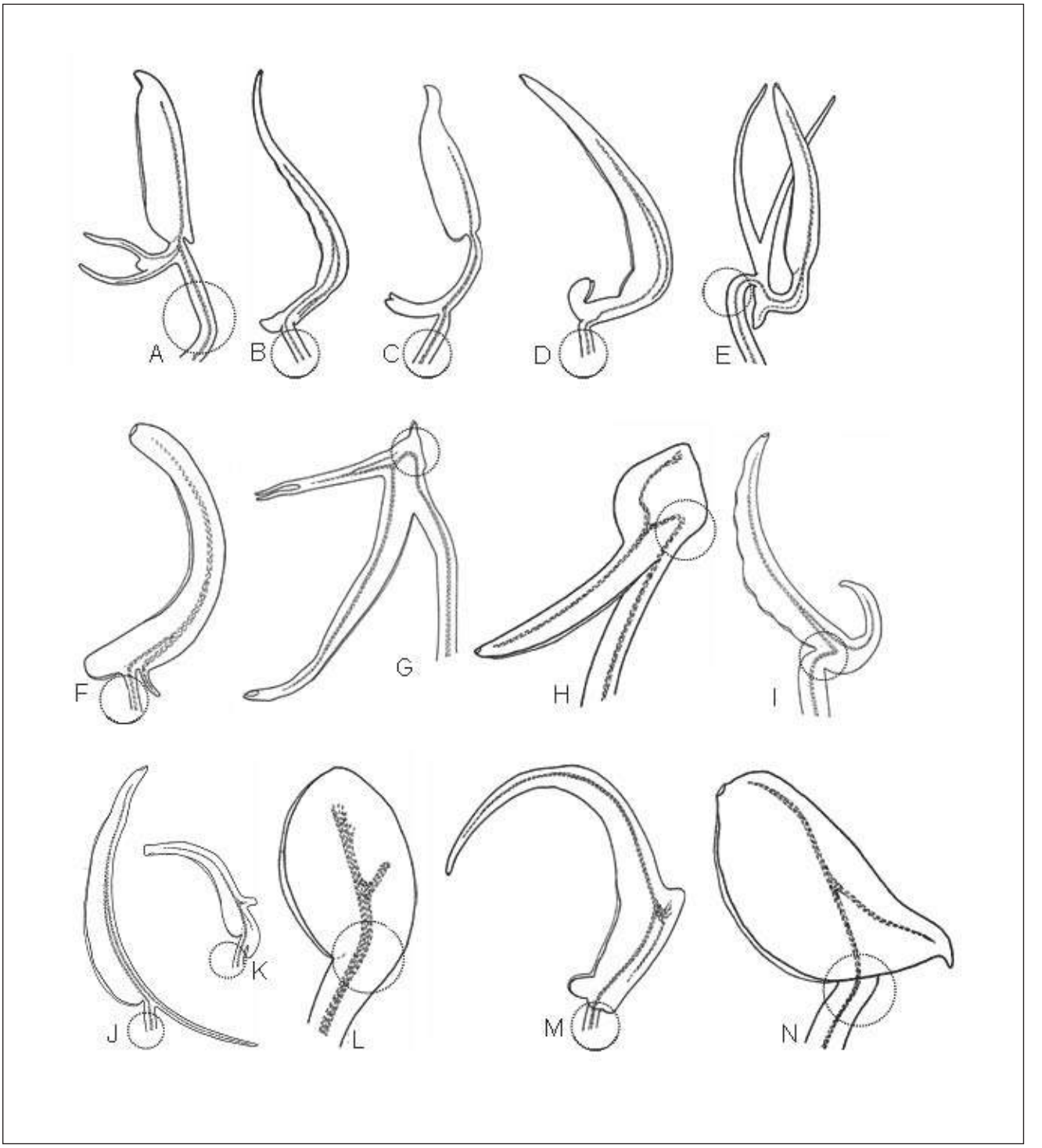


Figura 4. Homología del ápice del filamento en estambres de diferentes grupos de Melastomataceae. Ilustraciones tomadas de Wilson (1950). **A**, *Arthrostemma grandiflorum* Markg. (opositipétalo); **B**, *Tibouchina semidecandra* (Shr. & Mart.) Cogn. (opositipétalo); **C**, *Microlicia fulva* (Speng.) Cham. (opositipétalo); **D**, *Comolia vernicaefolia* Benth. (opositipétalo); **E**, *Ernestia cuadrisetosa* Berg. (opositipétalo); **F**, *Rhexia virginica* L.; **G**, *Adelobotrys ciliata* (Naud.) Triana; **H**, *Axinaea lepidota* (Benth.) Triana (opositipétalo); **I**, *Graffenrieda limbata* Triana; **J**, *Huberia semiserrata* DC; **K**, *Salpinga margaritacea* Triana; **L**, *Bellucia weberbauerii* Cog.; **M**, *Miconia dodecandra* Cogn.; **N**, *Blakea repens* (R. & P.) D. Don. Nota: El círculo punteado representa las estructuras homólogas del ápice del filamento.

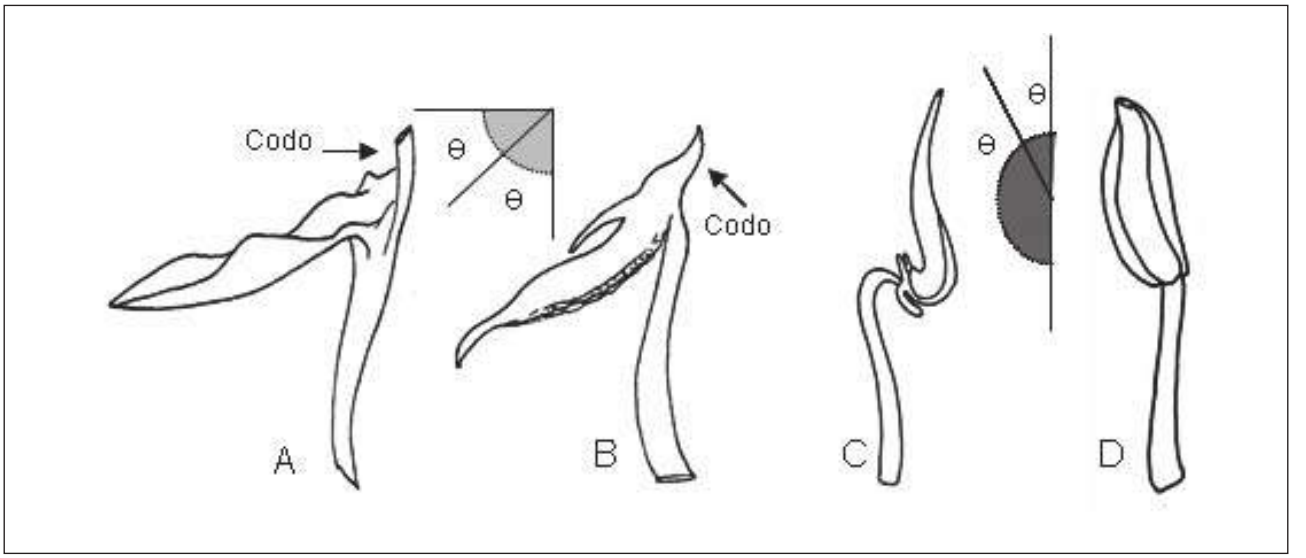


Figura 5. Caracter 10. Tipos de disposición de filamento-antera en la tribu Merianieae. **A**,**B**, estambre no geniculado, antera en ángulo agudo a recto con respecto al filamento; **C, D**, estambre geniculado, antera dispuesta en ángulo de 180° o no recto con respecto al filamento.

orientados plenamente hacia la base de la antera y otros, como en *Adelobotrys*, orientados hacia el ápice. Considerando esta variación, los caracteres del apéndice conectival dorsal se abordan de acuerdo al siguiente esquema:

Los siguientes son los caracteres del esquema anterior y sólo se establecen para los estambres opositipétalos.

Caracter 12a. Conectivo dorsal - Orientación del haz vascular:

0 *Hacia el ápice de la antera*. *Adelobotrys* en general se caracteriza por este tipo de orientación y este caracter se puede asociar con anteras esbeltas con el dorso del conectivo delgado, el apéndice cilíndrico alargado cerca del ápice del filamento, y codo del ápice del filamento corto (Figura 6A).

1 *Hacia la base de la antera*. Los estambres no geniculados con este caracter generalmente tienen el conectivo engrosado en el dorso o el codo del ápice del filamento muy subulado como en *Graffenrieda;* el grupo asociado a *M. tomentosa* (Cogn.) Wurdack es una excepción, ya que no presenta ambos aspectos morfológicos, y en este caso las tecas son seudoresupinadas. En los estambres geniculados, como en *Huberia*, es más fácil de establecer este caracter considerando sólo el aspecto externo de la antera (la orientación del filamento dorsal) (Figura 6B-I).

Caracter 12b. Conectivo dorsal - Forma del haz vascular:

0 *Conspicuamente bifurcado*. Aquí se consideran múltiples especies de *Meriania* y *Centronia* (Figuras 6C, 6E, 6G, 6H, 6I). En estambres no geniculados este caracter también se puede aplicar pero difícilmente se puede asociar a una morfología externa del conectivo.

1 Sin bifurcación conspicua. Aquí se considera a *Axinaea* (Figura 6B), *Graffenrieda* (Figura 6D), algunas especies de *Meriania* (Figura 6F), *Huberia* y *Pachyloma*. En *Axinaea* es posible encontrar un haz muy ramificado dendríticamente (**Wilson**, 1950), pero lo brazos de ramificación no son conspicuos.

Caracter 12c. Conectivo dorsal - Forma del apéndice

Para estambres con el haz orientado hacia la base de la antera y con el haz vascular no bifurcado:

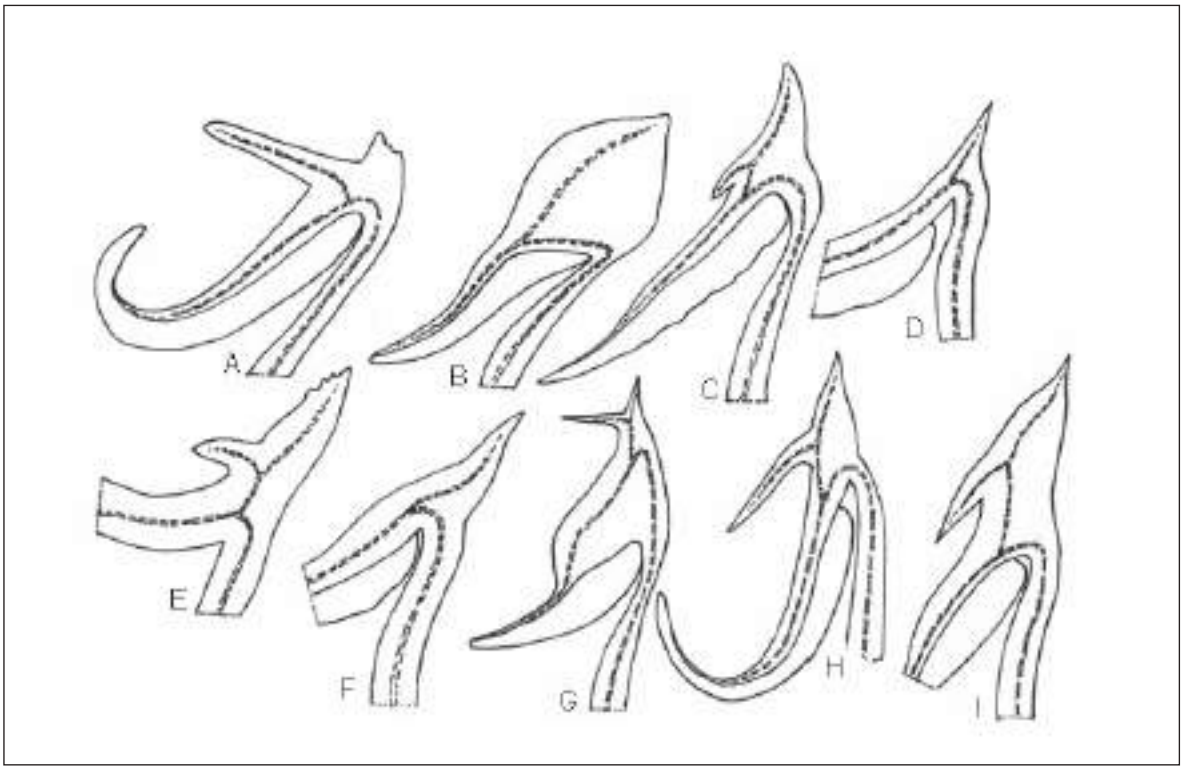


Figura 6. Representación de cortes seccionales de estambres opositipétalos y opositisépalos en los principales géneros de la tribu Merianieae. Línea discontinua representa el haz vascular. **A-H**: estambres opositipétalos; **I**: Estambre opositisépalo. **A,** *Adelobotrys hoyosii* Wurdack (*H. Mendoza 16884* FMB); **B**, *Axinaea macrophylla* Triana (*H. Mendoza 16719* FMB); **C**, *Centronia dichromantha* L. Uribe (*H. Mendoza 17376* FMB); **D**, *Graffenrieda caryophyllea* Triana (*B. Maguirre 4159* COL); **E**, *Meriania phlomoides* (Triana) Almeda (*H. Mendoza 17303* FMB); **F**, *Meriania pastazana* Wurdack (*C. González 961* COL); **G**, *Meriania peltata* L. Uribe (*H. Mendoza 16663* FMB); **H-I**, *Meriania nobilis* Triana (de plantas cultivadas en el Jardín Botánico de Bogotá).

0 *Globoso* (como en *Axinaea*) (Figura 7A)

1 *Subulado* (como en *Graffenrieda*) (Figura 7B)

2 *Almohadillado*, manera de almohadilla corta (Figura 7C)

3 *Filiforme* (como en *Huberia*) (Figura 7D)

4 *Linguiforme,* en forma de lengua (Figura 7E)

Caracter 12d. Conectivo dorsal - Forma del apéndice

Para estambres con el haz orientado hacia la base de la antera y con el haz vascular bifurcado:

0 *Romo a dentiforme* (Figura 7F)

1 *Subulado* (Figura 7G)

2 *Bífido* (Figura 7H)

3 *Cilíndrico* (Figura 7I)

Caracter 12e. Conectivo dorsal - Forma del codo

Para estambres con el haz bifurcado y orientado hacia la base de la antera. En taxones con este caracter el conectivo dorsal es complejo y por eso se separa la forma del codo de la forma del apéndice conectival del caracter anterior. Aplica sólo a estambres no geniculados, ya que en éstos es donde se presenta el codo del ápice del filamento:

0 Conspicuamente *subulado* (como en *Centronia dichromantha* L. Uribe) (Figura 7K)

1 *Truncados e irregularmente rugosos o dentiformes* (como en *Meriania tomentosa* y *M. phlomoides* (Triana) Almeda) (Figura 7J)

Caracter 12f. Conectivo dorsal - Forma del apéndice

Para estambres con el haz vascular orientado hacia el ápice de la antera (como en *Adelobotrys*):

0 *Cilíndrico a subulado* (Figura 7L)

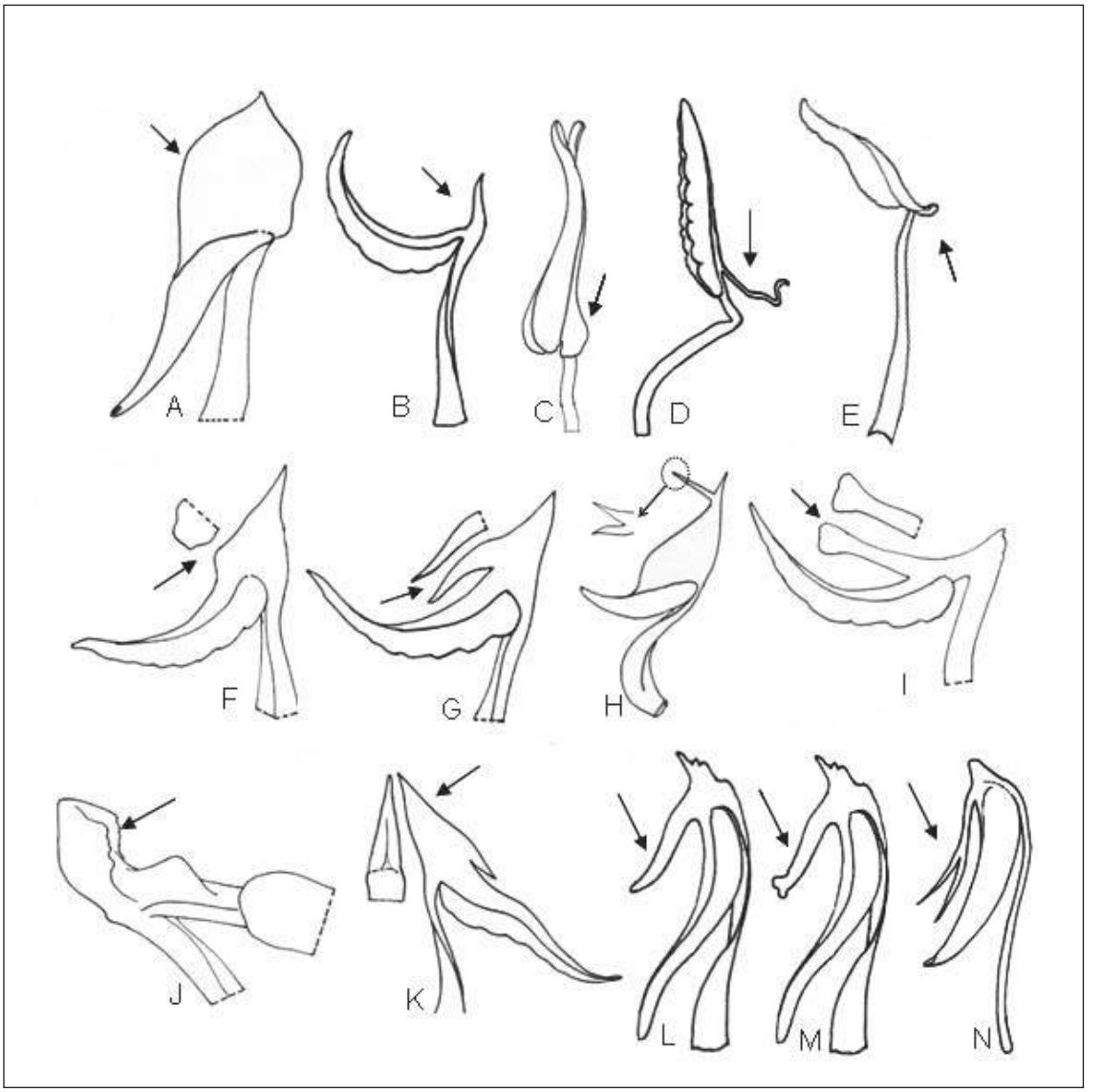


Figura 7. Caracteres del conectivo dorsal de la antera en estambres opositipétalos en géneros de la tribu Merianieae. **A-E**, Caracter 12c; **A**, apéndice globoso (*Axinaea*); **B**, subulado (*Graffenrieda*); **C**, a manera de almohadilla (*Tessmannianthus*); **D**, filiforme (*Huberia*); **E**, lenguiforme (*Neblinanthera*); **F-I**, Caracter 12d; **F**, apéndice romo o dentiforme (*Meriania*); **G**, subulado (*Meriania*); **H**, bífido (*Meriania*); **I**, cilíndrico (*Adelobotrys*); **J-K**, Caracter 12e; **J**, codo del ápice del filamento truncado e irregular (en forma de tacón de zapato) (*Meriania*); **K**, de forma subulada (*Centronia*); **L-M**, Caracter 12f; **L**, apéndice subulado (*Adelobotrys*); **M**, ensanchado en el ápice (*Adelobotrys*); **N**, bífido (*Adelobotrys*).

1 *Cilíndrico ensanchado en el ápice*, algunas veces levemente bífido (Figura 7M)

2 *Conspicuamente bífidos* en el ápice, ramas subuladas (Figura 7N)

En síntesis se puede decir que el conectivo dorsal en Merianieae siempre presenta un haz vascular, por lo que la presencia de apéndices dorsales es un buen caracter para la tribu. Estos apéndices pueden ser sencillos o complejos y dependen de la forma y orientación del haz vascular que los sustenta. Los anteriores seis caracteres abarcan la mayor parte de la variabilidad observada en la tribu para estambres opositipétalos, y es posible aplicarlos tanto a estambres geniculados como no geniculados. En la mayoría de las especies los caracteres del haz vascular se infirieron considerando una morfología externa; en estos casos se colocó un "?" al lado del número del estado (Apéndice 1). Esto quiere decir que, aunque se logró codificar

para la mayoría de las especies, es necesario realizar estudios más detallados de forma y orientación del haz vascular del conectivo.

En este trabajo no se abordaron caracteres del apéndice dorsal en estambres opositisépalos y forma del conectivo ventral en ambos verticilos estaminales. Estos caracteres son muy importantes en el género *Tessmannianthus*, pues los estambres opositisépalos son los de mayor tamaño y presentan apéndices ventrales conspicuos y no tienen apéndices dorsales. En toda la tribu, sólo se documentan apéndices ventrales en estambres opositipétalos en *Pachyloma*, en donde se desarrollan dos lóbulos subulados cortos en la base de la antera. *Pachyloma* es un género mal ubicado en Merianieae, pues además de presentar diferencias notables en caracteres de los estambres, presenta semillas subcocleadas a cocleadas de paredes muy ornamentadas, caracteres ausentes en Merianieae.

La función del apéndice conectival dorsal aun no se conoce ni se ha estudiado con detalle. **Renner** (1989) menciona que en algunas especies tiene la función de secretar olores o como plataforma para el aterrizaje de los insectos visitantes. En el trabajo de **Varasin *et al.*** (2008), se encontró que en *Meriania tomentosa* y *M. phlomoides* los apéndices son nectaríferos. Las observaciones en campo muestran que con mucha frecuencia estas estructuras son comidas por los insectos visitantes, por lo que consideramos que estos apéndices, en los principales géneros de Merianieae de corolas no tubulares, tienen la función de ofrecer tejidos alimenticios a los insectos.

Caracter 13. Lugar de conexión de las tecas y el conectivo

En Merianieae el conectivo de la antera regularmente sobresale por el dorso de las tecas y no se observa por el vientre de éstas. Pero hay un grupo de *Meriania* asociado a *M. tomentosa* en el cual las tecas se separan ampliamente, el conectivo las une por su parte media o ventral y regularmente se puede observar por el vientre de las tecas. Algunos autores se refieren a esta condición como anteras pseudoresupinadas. Estados:

0 Conectivo uniendo las tecas *cerca o sobre su parte dorsal*. El conectivo es conspicuo sobre el dorso de la antera y no es visible por el vientre de las tecas.

1 Conectivo uniendo las tecas *cerca de la parte abaxial y medial* de éstas. Esto ocasiona que las anteras tengan apariencia resupinada como en *Meriania versicolor* y *Meriania tomentosa.*

Caracter 14. Antera - Orientación del poro

Para estambres opositipétalos:

0 *Ventral*

1 *Dorsal*

2 *Apical* o cuando difícilmente se puede definir su orientación

Este caracter también fue planteado por **Penneys** (2007) con estados similares.

Caracter 15. Antera - Orientación del poro

Para estambres opositisépalos:

0 *Ventral*

1 *Dorsal*

2 *Apical* o cuando difícilmente se puede definir su orientación

En la mayoría de las flores examinada en botón y antes de la antesis mostraron anteras cerradas. En algunos casos se encontraron flores en proceso de antesis o recién abiertas en donde aun el poro de la antera no se había desarrollado. Esta apertura en la mayoría de los casos evaluados se desarrolló durante la antesis y su orientación está plenamente asociada a la orientación del estilo. En la mayoría de las especies de *Meriania* y *Centronia*, en donde las anteras son sigmoides o rectas, el poro se orientó dorsalmente hacia el lado donde se encontraba el estilo. Por otro lado, en *Graffenrieda*, la gran mayoría de especies presentaron anteras muy arqueadas hacia el dorso y el poro de la antera se orientó ventralmente justo en dirección del estilo.

La orientación del poro en estambres opositipétalos es posible considerarlo como un buen caracter para separar a *Meriania* de *Graffenrieda* si se depura el primer género, pero no es posible considerarlo como caracter diagnóstico de las especies actuales de *Centronia*.

Caracter 16. Antera - Forma

Se establecieron tres estados en cuanto a la forma de la antera en su conjunto:

0 *Subulada* (se adelgaza hacia el ápice)

1 *Oblonga u oblongo-obovada*

2 *Oblongo-lineal*

Caracter 17. Antera – Apariencia externa de las paredes de las tecas

En tres especies de *Meriania* procedentes de Bolivia se encontró que las tecas son fuertemente ruminadas, a diferencia del resto de la totalidad de las especies consideradas en este estudio. Estados:

0 Tecas con *paredes ruminadas*

1 Tecas con *paredes lisas*

En Melastomataceae, las tecas ruminadas hasta ahora sólo se conocen en varias especies de los géneros *Chaetostoma* DC. y *Microlicia* D. Don de Brasil y corresponde a un fenómeno de proliferación de tabiques internos que origina anteras multiesporangiadas (**Baumgratz *et al.***, 1996). Aunque no es concluyente, las tecas ruminadas en las tres especies de *Meriania* posiblemente corresponden a este mismo fenómeno, siendo la primera vez que se documenta para Merianieae.

Variación de caracteres en la tribu y dentro de los géneros

Los caracteres del cáliz y los estambres mostraron un comportamiento irregular dentro de los géneros considerados en Merianieae (Tablas 2 y 3). En algunos casos un caracter fue estable para un género pero no para otros. Se puede decir que Merianieae, con los géneros actuales, presenta flores diplostémonas y dos grupos de géneros: los que tienen estambres no geniculados (cinco géneros y el 80% de las especies) y los que tienen estambres geniculados (10 géneros y el 20% de las especies). El 41% de las especies de la tribu presentan estambres dimórficos; de éstos, en el 77% los estambres mayores son los opositipétalos. Todos los géneros, excepto *Phainantha*, presentan apéndices dorsales; ninguno de los géneros de la tribu mostró apéndices ventrales en los estambres opositipétalos. Predomina la orientación hacia la base de la antera del haz vascular asociado al conectivo dorsal de la antera. Se encontraron caracteres excepcionales como la separación de las tecas en el ápice y las tecas ruminadas.

Las siguientes son las variaciones encontradas para los géneros más diversificados.

Adelobotrys

El cáliz en este género se caracteriza por no presentar lóbulos evidentes, no desarrollan caliptras y el diente dorsal puede variar entre desarrollado a inexistente. En la totalidad de las especies se presenta un dimorfismo leve o fuerte entre verticilos de estambres. Los estambres mayores son los opositipétalos; el poro de la antera en los estambres opositipétalos se localiza en la parte dorsal y en los opositisépalos varía entre apical y ventral. El conectivo dorsal se caracteriza por un codo del ápice del filamento muy corto, anteras esbeltas y haz vascular del conectivo orientado hacia el ápice de la antera. El desarrollo de un apéndice dorsal conspicuo y alargado es otro caracter constante. No todas las especies evaluadas presentaron el ápice bífido del apéndice, encontrándose variación en el grupo de *A. hoyosii*

Tabla 2. Síntesis de la variación de los caracteres del cáliz en la tribu Merianieae.

Genero	Caracter 0					Carácter 1				Carácter 2				Carácter 3			4		Porcentaje
	0	1	2	3	Pol	0	1	2	Pol	0	1	2	Pol	0	1	2	0	1	Evaluado
Adelobotrys	4	89	4		3	25	46	18	11	100	-	-		-	-	-	-	-	88
Axinaea	3	92	3		3	3	33	46	18	67	33	-		-	-	-	-	-	100
Behuria																			
Bisglaziovia	100					100				-	-	-		-	-	-	-	-	100
Centronia				100			6	94			38	63		6	13	81	100		100
Dolichoura		50			50		50		50	-	-	-		-	-	-	-	-	100
Graffenrieda	2	6	52	32	8	24	8	67		13	49	18	18		11	89	50	50	91-93
Huberia		100				100				-	-	-		-	-	-	-	-	56
Meriania	6	43	32	13	5	35	29	30	6	38	53			36		64	91	9	90
Merianthera			67	33				100		33	67				100			100	100
Neblinanthera	100							100		-	-	-		-	-	-	-	-	100
Ochthephilus	100					100				-	-	-		-	-	-	-	-	100
Pachyloma		100					67	33		-	-	-		-	-	-	-	-	75
Phainantha		20		80			100				100					100		100	100
Tessmannianthus	50	17	33				33	67			100			-	-	-	-	-	86

Notas: Los datos de la matriz corresponden al porcentaje de especies evaluadas dentro de cada estado de caracter. Caracteres con polimorfismo se adicionan en la columna (Pol).

Tabla 3. Síntesis de la variación de caracteres de los estambres en la tribu Merianieae. Nota: Los datos de la matriz corresponden al porcentaje de especies evaluadas dentro de cada estado de caracter. Caracteres con polimorfismo se adicionan en la columna (Pol).

Género	5		6		7			8			9		10		11			
	0	1	0	1	0	1	2	0	1	2	0	1	0	1	0	1	2	Pol
Adelobotrys	100		-	-		14	86	100			-	-	100		100			
Axinaea	100		-	-	13	87		100			-	-	100		100			
Behuria	100													100				
Bisglaziovia	100		-	-		100			100		-	-		100	-	-	-	
Centronia	94	6		100	93	7		100			-	-	100		100			
Dolichoura	100		-	-	100			-	-	-	-	-		100	100			
Graffenrieda	100		-	-	100			-	-	-	-	-	100		*			
Huberia	100		-	-		100			100		-	-		100	100			
Meriania	100		-	-	31	31	38	79	2	19	100		100		100			
Merianthera	100		-	-			100	100			-	-		100	100			
Neblinanthera	100		-	-	100			-	-	-	-	-		100	100			
Ochthephilus	100		-	-	100			-	-	-	-	-	100		-	-	-	
Pachyloma	100		-	-	50	50		?	?	?	-	-		100				100
Phainantha	100		-	-		100			100		-	-		100			100	
Tessmannianthus	100		-	-			100		100			100		100	100			

Género	12a		12b		12c					12d				12e		12f			13	
	0	1	0	1	0	1	2	3	4	0	1	2	3	0	1	0	1	2	0	1
Adelobotrys	100			100?	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38	8	54	100	
Axinaea		100		100	100					-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	
Behuria		100		100				100		-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Bisglaziovia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	
Centronia		100	44	56		100				18	82			91	9	-	-	-	94	6
Dolichoura		100		100				100		-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	
Graffenrieda		100	2	98		100				*	-	-	-	*	-	-	-	-	100	
Huberia		100		100				100		-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	
Meriania	22	78	58	42		100				62	32	3	3	57	43	31	69		72	28
Merianthera	100			100?	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		67	33	100	
Neblinanthera		100		100?					100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	
Ochthephilus		100		?		100				-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	
Pachyloma		100?		100				100		-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	
Phainantha			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	
Tessmannianthus		100?		?			100?			-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	

Género	14				15				16				17		Porcentaje
	0	1	2	Pol	0	1	2	Pol	0	1	2	Pol	0	1	Evaluado
Adelobotrys					19	19	63		100					100	
Axinaea		100				100			100					100	100
Behuria															
Bisglaziovia	100				100					100				100	100
Centronia	20	66	10	15	19	69	12.5		94	6				100	100
Dolichoura	50		50		50		50			100				100	100
Graffenrieda	87		11	2	87		11	2	94		6			100	87-89
Huberia	100				100				100					100	56
Meriania		94	6		24	61	14	2	100				4	96	74-91
Merianthera			100		50		50				33	67**		100	100
Neblinanthera				100				100			100			100	100
Ochthephilus		100				100			100					100	100
Pachyloma	100				100				100					100	100
Phainantha	100				100				100					100	20-100
Tessmannianthus	75	25			100				100					100	57-100

* Solo presente en una especie.

** El polimorfismo en estos grupos considera dos caracteres presentes en un estambre o una misma flor y no a variaciones entre inviduos.

Wurdack y *A. antioquiensis* Wurdack, con ápices redondeados o engrosados. Estas últimas especies no constituyen el grupo de *Adelobotrys sensu stricto* de acuerdo con **Schulman & Hyvonen** (2003) y las comparaciones en este trabajo indican que se asocian a las especies de *Meriania* de la Mata Atlántica de Brasil.

Axinaea

En este género hay poca variación en los caracteres del cáliz y los estambres. En general predominan los cálices truncados, nunca presenta caliptra y el diente dorsal es inexistente o levemente desarrollado. Predominan los estambres levemente dimórficos por condiciones de longitud del filamento; el apéndice conectival siempre es globoso. Los estambres opositipétalos son más largos. En una especie, *A. fallax* Gleason, el apéndice no es tan ensanchado como las otras especies y al parecer comparte más caracteres con *Meriania*.

Centronia

La circunscripción tradicional de este género comprende caliptras circuncísiles y estambres con poro ventral (**Wurdack**, 1973); no obstante, se encontraron variaciones e inconsistencia de estos caracteres que explica los problemas de circunscripción con taxones cercanos como *Graffenrieda* y *Meriania* mencionados por **Wurdack** (1973) y **Almeda** (1993).

Todas las especies del género presentan caliptras; no obstante, la forma del ápice es variable, al igual que el tipo de dehiscencia (Tablas 2 y 3). La orientación del poro, que se ha utilizado clásicamente para separar este género de *Meriania*, resultó ser polimórfico, pues el 67% de sus especies presentaron poros dorsales, el 26% ventrales y cerca del 7% apicales. *Centronia* es el único género en Merianieae con un taxón con flores haplostémonas y con caracteres que se asocian al género *Wurdastom* por la presencia de ovario ínfero y tricomas barbelados.

Respecto a la forma del conectivo dorsal de la antera se encontraron dos grupos de especies: el que tiene el haz del conectivo dorsal no bifurcado como en *Graffenrieda*, y un grupo en donde el haz es bifurcado como en algunas especies de *Meriania*. Estas variaciones e inconsistencias en los caracteres diagnósticos son un indicio de que *Centronia* no es un grupo natural y amerita su evaluación filogenética.

Graffenrieda

Este género fue variable en caracteres del cáliz pero homogéneo en caracteres de los estambres (Tablas 2, 3). Predominan los cálices subcaliptrados y caliptrados, sin dientes dorsales y con dehiscencia irregular. Los estambres siempre son isomórficos y se encontraron apéndices dorsales sencillos excepto por una especie, *G. caudata*. Los estambres tienen una forma similar en la mayoría de las especies evaluadas, por lo que con su apariencia fácilmente se puede reconocer el género: filamento con "**codo**" subulado, anteras subuladas curvas hacia el dorso y con poro ventral o apical. Con frecuencia se encuentra una pequeña fracción en la parte basal del conectivo libre de las tecas.

Meriania

Este género fue ampliamente variable en caracteres del cáliz y de los estambres (Tablas 2, 3). En el género predominan los cálices truncados, pero presenta todos los estados de caracter documentados para esta estructura excepto por la dehiscencia circuncísil de las caliptras.

De caracteres de los estambres, se encuentra en proporciones similares del número de especie el isomorfismo, el dimorfismo leve y el dimorfismo fuerte. También se encontró amplia variabilidad en los apéndices dorsales, encontrándose un grupo con anteras y conectivo muy similar al de *Adelobotrys*, y otro grupo con estambres con el haz vascular dividido y orientado hacia la base de la antera. En el 96% de los taxones evaluados, en los estambres opositipétalos el poro se orienta dorsalmente. En taxones con dimorfismo estaminal predominan los estambres mayores opositipétalos. Este es el único género que presentó variaciones en caracteres excepcionales como la pseudoresupinación de las tecas y anteras ruminadas. También se presentaron taxones con tecas divergiendo en el ápice. Igual como sucede en *Centronia*, esta variación es indicio de que *Meriania* no es un grupo natural y amerita una evaluación filogenética.

Agradecimientos

Este proyecto (Núm. 201010011273) contó con la financiación de la Dirección de Investigación (DIB) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá a quien expresamos nuestro agradecimiento. Del mismo modo, nuestros sinceros agradecimientos a las siguientes instituciones por la ayuda prestada para el desarrollo de este trabajo: Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia; Instituto Alexander von Humboldt; Field Museum de Chicago; los herbarios COL, FMB, CUVC, HUQ, CAUP, QCA, QCNE, MO, F, NY, US. A los colegas Fabián Michelangeli, Carmen Ulloa, Corine Vriecendrop, Tyana Wachter, Robin Foster, William Ariza, Iván Gil, Wilson Quishpe, Gorky Villa y Janet Muñoz quienes contribuyeron de forma variada, sumistrando imágenes, ejemplares o facilitando el apoyo logístico. A Fernando Alzate, Carlos Parra y a dos evaluadores anónimos por sus valiosas observaciones al manuscrito.

Literatura citada

Considera la literatura citada en el Apéndice 1.

Almeda, F. 1981. The Mexican and Central American species of *Adelobotrys* (Melastomataceae). Ann. Missouri Bot. Gard. **68**(1): 204-212.

_____. 1984. New and noteworthy additions to the Melastomataceae of Panama. Proc. Calif. Acad. Sci. **43**(17): 269-282.

_____. 1989. *Tessmannianthus*, an arborescent genus of Melastomataceae new to Panama. Ann. Missouri Bot. Gard. **76**(1):1-6.

_____. 1990. A third species of *Tessmannianthus* (Melastomataceae: Merianieae) from Panama. Brittonia **42**(1):7-11.

_____. 1993. An evaluation of the Mesoamerican species of *Meriania* (Melastomataceae: Merianieae). Proc. Calif. Acad. Sci. **48**(7):141-152.

_____. 1994. *Arthrostemma primaevum* (Melastomataceae): a new species endemic to southeastern Mexico. Brittonia **46**:75-80.

Baumgratz, J. F. A. 1999. Duas novas espécies de *Huberia* DC. (Melastomataceae) para o Brasil. Rodriguésia **50**(76/77):39-47.

_____. 2004. Sinopse de *Huberia* DC. (Melastomataceae: Merianieae). Rev. Brasil. Bot. **27**(3):545-561.

_____., M. L. D. R. Souza, E. M. Woodgyer & E. M. Nic Lughadha. 1996. Polysporangiate anthers: described for the first time in Melastomataceae. Kew Bull. **51**(1):133-144.

_____., M. L. D'ElRei Souza & R. dos Anjos M. Tavares. 2004. *Bizglaziovia* Cogn. (Merianieae, Melastomataceae): Consideraçôes taxonômicas e biogeográficas. Bradea **10**(2): 75-80.

_____., M. L. D'ElRei Souza & R. dos Anjos M. Tavares. 2007. Melastomataceae na Reserva Ecológica de Macaé de Cima, Nova Friburgo, Rio de Janeiro, Brasil. I – Tribos Bertoloieae, Merianieae e Microlicieae. Rodriguésia **58**(4):797-822.

Becquer, E. R. 2008. Taxonomía y filogenia del género *Pachyanthus* (Melastomataceae: Miconieae). Universidad de la Habana, Jardín Botánico Nacional, Cuba. Tesis de Doctorado.

Brade, A.C. 1935. Melastomataceae Novae. Arq. Inst. Biol. Veg. **2**(1):13-18.

_____. 1956. Melastomataceae Novae IV. Arch. Jard. Bot. Rio de Janeiro **14**:213-240.

_____. 1958. Melastomatáceas novas de regiâo amazônica. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia. Rio de Janeiro. Pags. 12-16.

_____. 1959. Melastomataceae Novae VI. Arch. Jard. Bot. Rio de Janeiro **16**:7-16.

Brako, L. & J. L. Zarucchi 1993. Catalogue of the Flowering Plants and Gymnosperms of Peru. Monogr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard. **45**:1-1286.

Calderón, E. & H. Mendoza. 2000. Melastomatáceas de los géneros *Axinaea*, *Blakea*, *Castratella*, *Centronia*, *Killipia*, *Meriania*, *Monochaetum*, *Ossaea* y *Tibouchina* en Colombia. Biota Colomb. **1**(3):336-357.

Chiavegatto, B. & J. F. A. Baumgratz. 2008. *Meriania* (Melastomataceae; Merianieae) no Rio de Janeiro, Brasil. Rodriguésia **59**(4):899-913.

Clausing, G. & S. Renner. 2001. Molecular phylogenetics of Melastomataceae and Memecylaceae: implications for character evolution. Amer. J. Bot. **88**(3):486-498.

Cogniaux, A. 1886. Melastomataceae. En C. F. P de Martius (ed.), Fl. Bras. **14**(4): 13, pl. 3, f.2.

_____. 1891. Melastomatacées. (p 425). En: de Candolle (ed.), Monogr. Phan. 7. París.

_____. 1908. Melastomataceae peruvianae. Pas 131-148. En: Ign. Urban (edit.). Plantae novae andinae imprimis Weberbauerianae IV. Systematik, Pflanzengeschichte.

Cotton, M. E. 2003. A taxonomic revision of the genus *Axinaea* Ruiz & Pav. (Melastomataceae). Tesis de M.Sc. Departamento de Botánica Sistemática Universidad de Aarhus, Dinamarca.

_____., R. W. Bussmann & P. Lozano. 2004. Three new Ecuadorian species of Axinaea (Melastomataceae). Nord. J. Bot. **23**:49-55.

Darwin, C. 1862. Letter to Asa Gray, 22 January. Disponible en URL: http://www.darwinproject.uk/con-tent/28/38

De Pinna, M. C. 1991. Concepts and test of homology in the cladistic paradigm. Cladistic **7**:367-391.

Don, D. 1823. An Illustration of the natural family of plants called Melastomataceae. Mem. Wern. Nat. Hist. Soc. Edinburgh.

Fritsch, P. W., F. Almeda, S. Renner, A. B. Martins & B. C. Cruz. 2004. Phylogeny and circumscription of the near-endemic Brazilian tribe Microlicieae (Melastomataceae). Amer. J. Bot. **91**(7):1105-1114.

Forbes, H. 1882. Two kinds of stamens with different functions in the same flower. Nature **26**:386.

Foster, R. C. 1958. A catalogue of the ferns and flowering plants of Bolivia. Contr. Gray Herb. **184**:1-223.

Gleason, H. A. 1931. The relationship of certain myrmecophilous melastomes. Bull. Torrey Bot. Club **58**:73-85.

_____. 1932. Some undescribed flowering plants from South America. Am. Jour. Bot. **19**:741-742.

_____. 1936. Seven American melastomes. Bull. Torrey Bot. Club **63**:533-537.

_____. 1939. The genus *Clidemia* in Mexico and Central America. Brittonia **3**:97-130.

_____. 1950. Observations on tropical American melastomes. Phytologia **3**(7):345-360.

Goldenberg, R. 2000. O gênero *Miconia* Ruiz & Pav. Melastomataceae. I. Listagens analítica. II. Revisão taxonômica da seção Hypoxanthus (Rich. ex DC.) Hook. Tesis de Doctorado. Universidad de Campinas, Campinas, Brasil.

_____. & A. B. Martins. 1999. Two new Melastomataceae from São Paulo, Brasil. Kew Bull. **54**:465-470.

_____. **& M. Reginato.** 2006. Sinopse da família Melastomataceae na Estação Biológica de Santa Lúcia, Santa Teresa, Espírito Santo. Bol. Mus. Biol. Mello Leitão (N. Ser.) **19**:31-56.

_____. **& R. dos Anjos M. Tavares.** 2007. A new species of *Dolichoura* (Melastomataceae) and broadened circumscription of the genus. Brittonia **59**(3):226-232.

_____**., D. S. Penneys, F. Almeda, W. S. Judd & F. Michelangeli.** 2008. Phylogeny of Miconia (Melastomataceae): patterns of stamen diversifications in a megadiverse neotropical genus. Inst. J. Plant Sci. **169**(7):963-979.

Hokche, O., P. E. Berry & O. Huber (eds). 2008. Nuevo catálogo de la flora vascular de Venezuela. Fundación Instituto Botánico de Venezuela. Caracas, Venezuela.

Judd, W. S. & J. D. Skean jr. 1987. Two new species of *Meriania* (Melastomataceae) from Hispaniola. Syst. Bot. **12**(3):374-380.

Luo, Z., D. Zhang & S. S. Renner. 2008. Why two kinds of stamens in buzz-pollinated flowers? Experimental support for Darwin's division-of-labour hypothesis. Funct. Ecol. **22**:794-800.

_____**., L. Gu & D. Zhang.** 2009. Intrafloral differentiation of stamens in heterantherous flowers. J. Syst. Evol. **47**(1): 43-56.

Lozano, G. & M. Alvear. 2002. Novedades en *Axinaea* y *Meriania* (Melastomataceae) de Colombia. Caldasia **23**(1): 147-152.

_____**., G. & Becerra de Lozano, N.** 1999a. Los géneros *Allomaieta* y *Cyphostyla* (Melastomataceae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **23**(86): 5-18.

_____**. & N. Becerra.** 1999b. Notas sobre el género *Centronia* (Melastomataceae) en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **23**:79-83.

McBride, J. F. 1941. Melastomataceae - Flora of Peru. Publ. Field Mus. Nat. Hist., Bot Ser. **13**(4/1):327.

Mendoza, H. & B. Ramírez. 2006. Guía ilustrada de géneros de Melastomataceae y Memecylaceae de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt; Universidad del Cauca, Bogotá D.C. 288 p. http://www.humboldt.org.co/humboldt/homeFiles/inventarios/publicaciones_inventa.pdf

Michelangeli, F. 2000. A cladistic analysis of the genus *Tococa* (Melastomataceae) based on morphological data. Syst. Bot. **25**(2):211-234.

Muller, H. 1881. Two kinds of stamens with different functions in the same flower. Nature **24**:307-308.

Penneys, D. S. 2007. Phylogeny and character evolution in the Blakeeae (Melastomataceae). Tesis de Doctorado, University of Florida. 176 pag.

Renner, S. 1989. A survey of reproductive biology in neotropical Melastomataceae and Memecylaceae. Ann. Missouri Bot. Gard. **76**(2): 496-518.

_____**.** 1993. Phylogeny and classification of the Melastomataceae and Memecylaceae. Nord. J. Bot. **13**(5):519-550.

_____**., F. Almeda & E. Cotton.** 1999. Melastomataceae. Pags. 561-585. En: P. M. Jørgensen & S. Leon-Yáñez (eds). Catalogue of the vascular plants of Ecuador. Missouri Botanical Garden.

Schulman, L. 2003. A geo-ecologically specialized new species of *Adelobotrys* (Melastomataceae: Merianieae) from Peruvian Amazonia. Kew Bull. **58**:459-466.

_____**.** 2008. *Adelobotrys atlantica* (Melastomataceae: Merianieae): the first species of Adelobotrys from Brazil's Mata Atlântica. Kew Bull. **63**:457-461.

_____**. & J. Hyvonen.** 2003. A cladistic analysis of *Adelobotrys* (Melastomataceae) based on morphology, with notes on generic limits within the Tribe Merianieae. Syst. Bot. **28**(4):738-756.

Tavares, R. dos Anjos M. 2005. Rivisão taxonômica do gênero *Behuria* Cham. (Melastomataceae; Merianieae). Tesis de M.SC. Universidad Federal de Rio de Janeiro, Museo Nacional, Rio de Janeiro, Brasil.

_____**., J. F. A. Baumgratz & R. Goldenberg.** 2008. A new species of *Behuria* Cham. (Melastomataceae: Merianieae) from Brazil. Bot. J. Linn. Soc. **158**:489-492.

Todzia, C. A. & F. Almeda. 1991. A revision of *Tibouchina* section Lepidotae (Melastomataceae: Tibouchineae). Proc. Calif. Acad. Sci. **47**:175-206.

Triana, J. 1871. Les Melastomacées. Trans. Linn. Soc. London, Bot. **28**: 1-188.

Ulloa, C. & D. Neill. 2006. *Phainantha shuariorum* (Melastomataceae), una especie nueva de la Cordillera del Condor, Ecuador, disyunta de un género guayanés. Novon **16**:281-285.

_____**., D. F. Fernández & D. Neill.** 2007. *Meriania aurata* (Melastomataceae), una nueva especie de los Llangates, Ecuador. Novon **17**:525-528.

_____**. & J. Homeier.** 2008. *Meriania franciscana* (Melastomataceae), una especie nueva de los Andes de Ecuador. Anales Jard. Bot. Madrid **65**(2):383-387.

Uribe, L. 1962. Sertula Florae Colombiae V. Caldasia **8**(3):532.

_____**.** 1969. Sertula Florae Colombiae XI. Caldasia 10(48): 293-295.

Varassin, I. G., D. Penneys & F. Michelangeli. 2008. Comparative anatomy and morphology of nectar-producing Melastomataceae. Ann. Bot. **102**:899-909.

Wallnöfer, B. 1996. A revision of the genus *Alloneuron* Pilg. and segregation of *Wurdastom* gen. n. (Melastomataceae). Ann. Naturhist. Mus. Wien **98B** Suppl.: 447-462.

Wilson, C. L. 1950. Vasculation of the stamen in the Melastomataceae, with some phyletic implications. Amer. J. Bot. **37**(6): 431-444.

W3 Tropicos / Missouri Botanical Garden. Nomenclatural Data Base. 2009. Available for Internet <URL: http://mobot.mobot.org/W3T/vast.html.

Wurdack, J. J. 1964. Certamen Melastomataceis VIII. Phytologia **9**(7):411-412.

_____**.** 1966. Certamen Melastomataceis X. Phytologia **13**(20):71-73.

_____. 1971a. Certamen Melastomataceis XVI. Phytologia **21**(2):118-119.

_____. 1971b. Certamen Melastomataceis XVII. Phytologia **21**(6):353-354.

_____. 1972. Certamen Melastomataceis XX. Phytologia **24**(3):197-196.

_____. 1973. Melastomataceae (Memecylaceae by T. Morley). P 1-819. En: T. Lasser (ed.). Flora de Venezuela. No. 8. Instituto Botánico, Ministerio de Agricultura y Cría, Caracas.

_____. 1975. Certamen Melastomataceis XXIV. Phytologia **31**(6):492.

_____. 1976a. Endemic Melastomataceae of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. Brittonia **28**(1):138-143.

_____. 1976b. Certamen Melastomataceis XXV. Phytologia **35**(1):5-6.

_____. 1979. Certamen Melastomataceis XXX. Phytologia **43**(4):339-340.

_____. 1980a. Melastomataceae. En: G. Harling & B. Sparre (eds.). Flora of Ecuador. No. 13. Univ. Göteborg & Riksmuseum, Stockholm.

_____. 1980b. Certamen Melastomataceis XXXI. Phytologia **45**(4):324-325.

_____. 1984. Certamen Melastomataceis XXXVII. Phytologia **55**(3):133-134.

_____. 1987a. Notes on Melastomataceae of the Guianas. Brittonia **39**(2):159-264.

_____. 1987b. A new *Meriania* from Serra Aracá. Acta Amazoniaca **16/17**:223-224.

_____. 1989. Una nueva especie colombiana de *Tesmannianthus*. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **27**(65):247-248

_____. 1993. Melastomataceae. Flora of the Guianas. Series A Phanerogams **13**:3-301.

_____. **& S. Renner.** 1993. Melastomataceae. Pags. A. R. A. Görts – van Rijn. Flora of the Guianas. Fasciculo 13. Koeltz Scientific Books. Alemania.

Recibido: septiembre 31 de 2009.

Aceptado para su publicación: mayo 18 de 2010.

Apéndice 1 Lista de géneros y especies de la Tribu Merianieae y matriz de datos de caracteres evaluados del cáliz y de los estambres.

Taxon			%	Cáliz					Estambre																		Ejemplares revisados o referencias	Referencia del nombre
Género	Epíteto Específico	Autor	Evaluación	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12a	12b	12c	12d	12e	12f	13	14	15	16	17		
Tribu Merianieae																												
Adelobotrys	*acreana*	Wurdack	100	1	1	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0	1?	-	-	-	2	0	1	2	0	1	W. Palacios 8499 (COL)	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*adscendens*	(Sw.) Triana	100	1	1	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0	1?	-	-	-	2	0	1	2	0	1	C. barbosa 1449 (FMB), D. Soejarto 2664 (COL)	Hokche *et al.* 2008
Adelobotrys	*antioquiensis*	Wurdack	100	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	0	1	-	-	-	0	0	1	1	0	1	L. Albert 267 (Paratipo COL), D. Cárdenas 2509 (FMB), J. Hernández 162 (Tipo US)	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*atlantica*	L.Schulman	26	1	2	-	-	-	0																		L.Schulman 2008	L.Schulman 2008
Adelobotrys	*ayangannensis*	Wurdack	100	1	1/2	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	0	0	1	2	0	1	Geason & Wurdack notas ined., Wurdack 1987a	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*barbata*	Triana	100	1	2	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0	1?	-	-	-	0	0	1	2	0	1	C. Dominguez 218 (COL)	Hokche *et al.* 2008
Adelobotrys	*boissieriania*	Cogn.	90	1	2	-	-	-	0	-	2?	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	2	0			0	1	H. Lugo S. sn (QCA), McBride 1941	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*ciliata*	(Naudin) Triana	100	1	0	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	2	0	1	1	0	1	L. Otleman B. 615 (COL), Gleason & Wurdack notas ined.	Hokche *et al.* 2008
Adelobotrys	*duidae*	(Gleason) Wurdack	100	0	1	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0	1?	-	-	-	0/1	0	1	2	0	1	G.H. Tate 403 (Holotipo US)	Hokche *et al.* 2008
Adelobotrys	*fruticosa*	(Gleason) Wurdack	100	1	1	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0	1?	-	-	-	1	0	1	2?	0	1	B. Maguire 36392 (Tipo NY)	Hokche *et al.* 2008
Adelobotrys	*fuscescens*	Triana	100	1	2	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	2	0	1	2	0	1	F. García 323 (FMB)	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*hoyosii*	Wurdack	100	1	1	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0	1	-	-	-	0	0	1	2	0	1	H. Mendoza 16918, 16884 (FMB)	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*intonsa*	(Gleason) Wurdack	90	1	0	-	-	-	0	-	2?	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	2	0			0	1	Killip 29969 (Tipo US), Gleason & Wurdack notas ined.	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*jefensis*	Almeda	90	1	0	-	-	-	0	-	2?		-	0	0	0?	1?	-	-	-	2	0	1		0	1	Almeda 1981	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*klugii*	Wurdack	100	0/1	0	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0	1?	-	-	-	2	0	1	0	0	1	G. Klug 1914 (Isotipo, F)	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*macrantha*	Gleason	90	1	1	-	-	-	0	-	2?	0	-	0	0	0	1?	-	-	-	2	0			0	1	Gleason & Wurdack notas ined.	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*macrophylla*	Pilg.	100	1	1	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0	1?	-	-	-	2	0	1	2	0	1	A. Rudas 2702 (FMB)	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*marginata*	Brade	100	1	1	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	0	0	1	1	0	1	J. Ribeiro 1736 (NY)	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*monticola*	Gleason	100	1	1/2	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	2	0	1	0	0	1	H. D. Clarke 11977 (NY)	Hokche *et al.* 2008
Adelobotrys	*panamensis*	Almeda	95	1	1	-	-	-	0	-	2?	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	0	0	1		0	1	M. Correa 3061 (F), Almeda 1981	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*permixta*	Wurdack	80	2	0	0	-	-	0	-			-	0	0	0?	1?	-	-	-	2	0			0	1	B. Maguire 46171 (NY)	Hokche *et al.* 2008
Adelobotrys	*praetexta*	Pilg.	28						0	-			-														sn M. Pabón (COL)	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*rachidotricha*	Brade	81	1	1	-	-	-	0	-			-	0	0	0?	1?	-	-	-	0	0			0	1	Brade 1958	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*rotundifolia*	Triana	28						0	-			-														L.Schulmann & Hyvonen 2003	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*roukolainenii*	L.Schulman	52	1	1	-	-	-	0	-			-														L.Schulman 2003	L.Schulman 2003
Adelobotrys	*saxosa*	Wurdack	100	1	0/1	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0	1?	-	-	-	1	0	1	2	0	1	B. Maguire 41610 (F), J. Wurdack 43451 (Isotipo F, Holotipo US)	Hokche *et al.* 2008
Adelobotrys	*scandens*	(Aubl.) DC.	86	1	0	-	-	-	0	-			-	0	0	0	1?	-	-	-	0	0			0	1	Krukoff 9023, Gleason & Wurdack notas ined.	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*spruceana*	Cogn.	57						0	-			-	0	0	0?	1?	-	-	-	2	0			0	1	Gleason & Wurdack notas ined.	Hokche *et al.* 2008
Adelobotrys	*stenophylla*	Wurdack	28						0	-			-															Hokche *et al.* 2008
Adelobotrys	*subsessilis*	Gleason	95	1	1	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0	1?	-	-	-	0	0	1	0	0	1	Killip 27147 (Tipo US), Gleason 1931	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Adelobotrys	*tessmannii*	Markgr.	90	1	1	-	-	-	0	-	2?	0	-	0	0	0	1?	-	-	-	2	0			0	1	Tessman 3572 (Tipo), Gleason & Wurdack notas ined.	L.Schulmann & Hyvonen 2003
Axinaea	*affinis*	(Naudin) Cogn.	100	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	N. Betancourt 6691 (QCA)	Cotton 2003
Axinaea	*alata*	E.Cotton	100	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	Cotton 2003	Cotton 2003
Axinaea	*campii*	E.Cotton	100	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	Cotton 2003	Cotton 2003
Axinaea	*colombiana*	Lozano & Alvear	100	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	H. Sanchez 819 (FMB)	Cotton 2003
Axinaea	*confusa*	E.Cotton	100	1	1	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	Cotton 2003	Cotton 2003
Axinaea	*costaricensis*	Cogn.	100	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	R. L. Wilbur 17500 (F)	Cotton 2003
Axinaea	*crassinoda*	Triana	100	1	1	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	J. F. Macbride 4873 (F)	Cotton 2003
Axinaea	*dentata*	E.Cotton	100	1	0	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	Cotton 2003	Cotton 2003
Axinaea	*dependens*	Pav. ex D. Don	100	1	1/2	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	D. Neill 7590 (QCA)	Cotton 2003
Axinaea	*disrupta*	E.Cotton	100	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	Cotton 2003	Cotton 2003
Axinaea	*fallax*	Gleason	100	1	1	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	M. Palacios 92 (COL), J. Cuatrecasas 18059 (Isotipo F)	Cotton 2003
Axinaea	*flava*	E.Cotton, Bussmann & P.Lozano	100	1	2	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	Cotton *et al.* 2004	Cotton 2003
Axinaea	*floribunda*	(Naudin) Triana	100	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	Cotton 2003	Cotton 2003
Axinaea	*glandulosa*	Pav. ex D. Don	100	2	1	0	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	J. J. Wurdack 1624 (F)	Cotton 2003
Axinaea	*glauca*	E.Cotton & P.Lozano	100	1	1	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	Cotton *et al.* 2004	Cotton 2003
Axinaea	*grandifolia*	(Naudin) Triana	100	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	H.G. Barclay 10320 (COL)	Cotton 2003
Axinaea	*lanceolata*	Ruiz & Pav.	100	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	J. Steibach 9861 (F)	Cotton 2003
Axinaea	*lehmannii*	Cogn. ex Chair.	100	1	1/2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	G. Herrera 9447 (FMB)	Cotton 2003
Axinaea	*lawessonii*	E.Cotton	100	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	Cotton *et al.* 2004	Cotton 2003
Axinaea	*luteynii*	E.Cotton	100	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	Cotton 2003	Cotton 2003
Axinaea	*macrophylla*	(Naudin) Triana	100	1	1/2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	A. Prieto 2789 (FMB), H. Mendoza 16719 (FMB)	Cotton 2003
Axinaea	*merianiae*	(DC.) Triana	100	1	1	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	N. Betancourt 366(F)	Cotton 2003
Axinaea	*mertensioides*	Wurdack	100	1/2	1/2	1	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	J. J. Wurdack 147 (Isotipo F)	Cotton 2003
Axinaea	*minutiflora*	E.Cotton	100	1	1/2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	Cotton 2003	Cotton 2003
Axinaea	*nitida*	Cogn.	100	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	R. Ferreyra 1539 (F)	Cotton 2003
Axinaea	*oblongifolia*	(Cogn.) Wurdack	100	1	1	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	V. Quipuscoa 693 (F)	Cotton 2003
Axinaea	*pauciflora*	Cogn.	100	1	1/2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	Cotton 2003	Cotton 2003
Axinaea	*pendula*	E.Cotton	100	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	Cotton 2003	Cotton 2003
Axinaea	*pennellii*	Gleason	100	1	1	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	F.W. Pennell 14003 (isotipo F)	Cotton 2003
Axinaea	*plinervata*	E.Cotton	100	1	2	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	Cotton 2003	Cotton 2003
Axinaea	*quitensis*	Benoist	100	1	2	0	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	J. L. Clark 1296 (COL), Gleason & Wurdack notas ined.	Cotton 2003
Axinaea	*robusta*	Eves	100	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	Cotton 2003	Cotton 2003

Continuación Apéndice 1

Taxon			%	Cáliz					Estambre																		Ejemplares revisados o referencias	Referencia del nombre
Género	Epíteto Específico	Autor	Evaluación	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12a	12b	12c	12d	12e	12f	13	14	15	16	17		
Axinaea	*ruizteranii*	Wurdack	100	1	1	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	J. Wurdack 2787 (Paratipo US)	Cotton 2003
Axinaea	*sclerophylla*	Triana	100	1	1	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	W. H. Camp 4371 (F)	Cotton 2003
Axinaea	*scutigera*	Triana	100	1	1/2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	J. M. Idrobo 6277 (COL), J. L. Fernández 11982 (COL)	Cotton 2003
Axinaea	*sessilifolia*	Triana	100	1	1	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	G. Harling 9555 (Q), N. Betacourt 493 (F)	Cotton 2003
Axinaea	*sodiroi*	Wurdack	100	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	A. Sodiro 68 (Q), Gleason & Wurdack notas ined.	Cotton 2003
Axinaea	*tomentosa*	Cogn.	100	0	1	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	J. J. Wurdack 1623 (F)	Cotton 2003
Axinaea	*weberbaueri*	Cogn.	100	1	1	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	0	-	-	-	0	1	1	0	1	A. Weberbauer 5648 (Lectotipo F)	Cotton 2003
Behuria	*capixaba*	R.Goldenb. & Reginato	0																								-	W3Tropicos
Behuria	*comosa*	Tavares, Baumgrantz & R.Goldend.	34			-	-	-	0	-			-	1												1	Tavares *et al.* 2008	Tavares 2005
Behuria	*cordifolia*	Cogn.	57	0	2	-	-	-	0	-			-	1								0			0	1	Cogn. 1886	Tavares 2005
Behuria	*corymbosa*	Cogn.	57	0	2	-	-	-	0	-			-	1								0			0	1	Baumgratz *et al.* 2007	Tavares 2005
Behuria	*glazioviana*	Cogn.	34			-	-	-	0	-			-	1												1	Tavares 2005	Tavares 2005
Behuria	*glutinosa*	Cogn.	21						0	-			-	1												1	Tavares 2005	Tavares 2005
Behuria	*huberoides*	Brade	82	1	1	-	-	-	0	-			-	1	0	1	1	3	-	-	-	0			0	1	Brade 1935	Tavares 2005
Behuria	*insignis*	Cham.	57	0	2	-	-	-	0	-			-	1								0			0	1	Tavares 2005	Tavares 2005
Behuria	*limae*	Brade	82	1	1	-	-	-	0	-			-	1	0	1	1	3	-	-	-	1			1	1	Brade 1935	Tavares 2005
Behuria	*parvifolia*	Cogn.	57	0	2	-	-	-	0	-			-	1								0			0	1	Tavares 2005	Tavares 2005
Behuria	*mouraei*	Cogn.	34			-	-	-	0	-			-	1												1	Tavares 2005	Tavares 2005
Behuria	*sousa-limae*	Brade	34			-	-	-	0	-			-	1												1	Tavares 2005	Tavares 2005
Behuria	*edmundoi*	Brade	82	1	1	-	-	-	0	-			-	1	0	1	1	3	-	-	-	0			0	1	Brade 1956	Tavares 2005
*Benevidesia**	*organensis*	Saldanha & Cogn.	60	1	2	-	-	-	0	-	0	-	-									0			0	1	N. Glaziou 16819	Tavares 2005
*Benevidesia**	*magdalenesis*	Brade	60							-			-	1	0	1	1	3	-	-	-	0			0	1	Brade 1935	Tavares 2005
Bisglaziovia	*behurioides*	Cogn.	100	0	0	-	-	-	0	-	1	1?	-	1	-				-	-	-	0	0	0	1	1	A. Glaziou 16821 (Isosintipo F), Baumgratz et al. 2004	Baumgratz *et al.* 2004
Centronia	*brachycera*	(Naudin) Triana	100	3	2	2	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	0	-	1	0	-	0	1	1	0	1	A. Prieto 1768 (FMB)	Calderon & Mendoza 2000
Centronia	*dichromantha*	L.Uribe	100	3	2	2	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	0	-	1	0	-	0	1	1	0	1	H. Mendoza 17376 (FMB), L. Uribe 4246 (Isotipo-COL)	Calderon & Mendoza 2000
Centronia	*eximia*	(Naudin) Triana	100	3	2	2	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	0	-	1	0	-	0	1	1	0	1	H. Mendoza 16662 (FMB)	Calderon & Mendoza 2000
Centronia	*haemantha*	(Planch. & Linden) Triana	100	3	2	2	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	0	-	1	0	-	0	1	1	0	1	R. Ardila 82 (FMB), H. Mendoza 4089 (FMB)	Calderon & Mendoza 2000
Centronia	*insignis*	(Naudin) Triana	100	3	2	2	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	0	-	1	0	-	0	1	1	0	1	H. Mendoza 7207 (FMB)	Hokche *et al.* 2008
Centronia	*laurifolia*	D.Don	100	3	2	1	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0/2	2	0	1	W. Quizhpe 2058 (QCNE)	Renner *et al.* 1999
Centronia	*mutabilis*	Gleason	100	3	2	2	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	0	-	1	0	-	0	1	1	0	1	H. Rincon s.n (HUQ), W. Vargas 578 (HUQ)	Calderon & Mendoza 2000
Centronia	*mutisii*	(Bonpl.) Triana	100	3	2	2	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	0	-	0	0	-	0	1	1	0	1	G. Tellez 631, 632 (UDBC, FMB)	Calderon & Mendoza 2000
Centronia	*neblinae*	Wurdack	100	3	2	1	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	B. Maguire 42507 (Tipo US), Wurdack 1973	Hokche *et al.* 2008
Centronia	*nobilis*	Gleason ined.	100	3	2	1	1	0	0	-	0	-	-	0	0	1	0	-	1	0	-	0	1	1	0	1	H. Mendoza 14973, 17338 (FMB), P. Silverstone 1508 (CUVC)	Calderon & Mendoza 2000
Centronia	*peruviana*	J.F.Macbri.	100	3	2	1	2	0	0	-	1	0	-	0	0	1	0	-	0	1	-	1	2	2	0	1	B. Maguirre 44432 (COL)	McBride 1941
Centronia	*pulchra*	Cogn.	100	3	2	2	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	0	-	1	0	-	0	1	1	0	1	R. Teran 3058 (US)	Hokche *et al.* 2008
Centronia	*reticulata*	Triana	100	3	2	1	1	0	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	F. Woythowski 8029 (US)	McBride 1941
Centronia	*ruizii*	Lozano	100	3	2	1	2	0	1	1	-	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	-	1	1	1	C. Babosa 8719 (Paratipo COL)	Lozano & Becerra 1999b
Centronia	*sessilifolia*	Cogn.	100	3	1	1	0	0	0	-	0	-	-	0	0	1	1	0	-	1	0	-	0	1	1	0	1	I. Sanchez 4531 (F)	Cogn. 1891
Centronia	*vaupesana*	Wurdack	100	3	2	1	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	R. E. Schultes 1700 (COL, Isotipo)	Calderon & Mendoza 2000
Dolichoura	*spiritusanctensis*	Brade	100	1	0/1	-	-	-	0	-	0	-	-	1	0	1	1	3	-	-	-	0	0	0	1	1	P. H. Labiak 4029 (F), Brade 1959	R.Goldend. & Tavares 2007
Dolichoura	*kollmannii*	R.Goldend. & Tavares	100	1	1	-	-	-	0	-	0	-	-	1	0	1	1	3	-	-	-	0	2?	2?	1	1	R.Goldend. & Tavares 2007	R.Goldend. & Tavares 2007
Graffenrieda	*bella*	Almeda	100	3	0	2	2	1	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	2	2	2	1	P. H. Allen 4355 (NY)	Almeda 1984
Graffenrieda	*anomala*	Triana	66	3	2	0	2	0	0	-			-	0								0				1	E. Forero 1481 (COL)	Triana 1871
Graffenrieda	*calyptrelloides*	Wurdack	100	1	0	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	2	2	2	1	J. J. WurdacK 1506 (Isotipo F, Holotipo US)	Renner *et al.* 1999
Graffenrieda	*caryophyllea*	Triana	100	3	2	1	1	0	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	B. Maguirre 41596 (COL), J. Cuatrecasas 6881 (F)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*caudata*	Wurdack	100	2	2	1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	0?	-	0	0	-	0	0	0	0	1	B. Hoffman 2123 (NY)	Wurdack & Renner 1993
Graffenrieda	*chrysandra*	(Griseb.) Triana	57	2	0	0/1	-	-	0	-			-									0				1	E. L. Hekman 7423 (NY)	Triana 1971
Graffenrieda	*cinna*	J.F.Macbri.	100	2	2	1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	G. Klug 3313 (Holotipo F)	McBride 1941
Graffenrieda	*cinnoides*	Gleason	90			-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	B. Maguire 28180 (Isotipo F)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*colombiana*	Gleason	100	3	2	1	2	1	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	J. Luteyn 5057 (COL), G. Klug 1866 (Tipo US)	Renner *et al.* 1999
Graffenrieda	*conostegioides*	Triana	100	3	2	1	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	G. Lozano 3741 (COL), G. Barriga 12406 (COL)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*cucullata*	(Triana) L.O.Williams	100	3	1	2	2	1	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	H. Mendoza 4005 (FMB), L. Uribe 4955 (COL)	Renner *et al.* 1999
Graffenrieda	*emarginata*	(Ruiz & Pav.) Triana	100	2	2	1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0/2	0/2	0	1	D. Soejarto 1075 (COL), F. González 3155 (COL), J. J. Wurdack 1056 (F)	Renner *et al.* 1999
Graffenrieda	*fantastica*	R.E.Schultes & L.B.Sm.	100	2	2	0	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	M.V. Arbelaez 903 (COL), R. E. Schultes 5620 (Isotipo F)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*foliosa*	Cogn.	33						0	-			-									0				1	Cogn. 1908	Cogn. 1891
Graffenrieda	*fruticosa*	Wurdack	100	2	0	1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	B. Maguire 42422 (F), J.A. Steyermark 103936 (COL)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*galeottii*	(Naudin) L.O.Williams	100	3	2	2	2	1	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	L. Uribe 2767 (COL), F. Almeda 3585 (F)	Renner *et al.* 1999
Graffenrieda	*gracilis*	(Triana) L.O.Williams	100	3	0	2	2	1	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	2	2	0	1	H. Mendoza 2436, 5120 (FMB)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*grandifolia*	Gleason	100	3	2	1	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	W.H. Hodge 6768 (COL), D. Soejarto 3506 (F)	Gleason 1950
Graffenrieda	*harlingii*	Wurdack	100	2	2	0	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	N. Betancourt 320-A (F), J. E. Madsen 85698 (NY)	Renner *et al.* 1999
Graffenrieda	*hitchcockii*	Gleason	100	2	2	1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	B. Maguire 35338 (F)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*intermedia*	Triana	100	3	2	1	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	H. Mendoza 2874, 8914A (FMB)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*inwinii*	Wurdack	100	2	2	1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	J. Pipoly 10137 (NY)	Wurdack & Renner 1993
Graffenrieda	*jauana*	Wurdack	100	2	0	0	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	J. A. steyermark 109281 (F)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*kralii*	Wurdack	100	0		1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	M. Nee 30657 (NY)	Hokche *et al.* 2008

Continuación Apéndice 1

Taxon			%	Cáliz					Estambre																	Ejemplares revisados o referencias	Referencia del nombre
Género	Epíteto Específico	Autor	Evaluación	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12a	12b	12c	12d	12e	12f	13	14	15	16	17	
Graffenrieda	*lanceolata*	Gleason	66	1	2	-	-	-	0	-			-	0								0				1	G. H. Tate 806	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*latifolia*	(Naudin) Triana	100	2	2	0/1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	R. L. Wilbur 7764 (F)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*limbata*	Triana	100	2/3	2	1	1	0	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	E.W. Davis 111 (COL), W. Thomas 3862 (F)	Triana 1871
Graffenrieda	*meridensis*	Wurdack	100	2	0		-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	2	1	L. R. Terán 429 (Holotipo US)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*miconioides*	Naudin	100	2	2	0/1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	E.L. Little Jr. 281 (COL), M.P. Galeano 1765 (COL)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*micrantha*	(Gleason) L.O.Williams	100	3	2	2	2	1	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	2	2	0	1	D. Tuberquia 168 (COL) cf., G. Herrera 7264 (F)	Gleason 1950
Graffenrieda	*moaensis*	Wurdack	100	2/3	2	1			0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	G. T. Prance 12634 (Isotipo F, Holotipo US)	Wurdack 1972
Graffenrieda	*moritziana*	Triana	100	2	0	0	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	J. J. Wurdack 2684 (F), W. Sonder 1636 (Isosintipo F)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*obliqua*	Triana	100	2	1	0	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	B. Maguire 33429 (F)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*ottoschulzii*	(Urb. & Ekman) Urb. & Ekman	0																								E. L. Ekman 12381 (K), sólo vista la imagen	W3Tropicos
Graffenrieda	*patens*	Triana	100	3	1	1	2	1	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	C. Sastre 3052 (COL), R.E. Schultes 10105G (COL), C. Londoño 844 (NY)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*pedunculata*	Gleason	100	3	2	2	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	B. Maguire 27522 (NY)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*polymera*	Gleason	100	2	2	1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	K. D. Phelps 469 (F), B. Maguire 42136 (Isotipo F)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*reticulata*	Wurdack	100	2	2	0/1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	W. R. Anderson 13471 (F), J.A. Steyermark 104003 (COL)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*rotundifolia*	(Bonpl.) DC.	100	1	1	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	H. Mendoza 15687, J. Zarucchi 3654 (FMB)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*rufa*	Wurdack	66						0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0			0	1	B. Maguire 30282, Wurdack 1958	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*rufescens*	Britton & P.Wilson	100	2	0	1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	E. L. Ekman 14263 (NY)	W3Tropicos
Graffenrieda	*rupestris*	Ducke	100	3	2	1	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	S. Castroviejo 12044 (FMB), J. Espina 297 (COL)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*santamartensis*	Wurdack	100	2	2	0/1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	H. H. Smith 1843 (Isotipo F)	Wurdack 1976a
Graffenrieda	*scandens*	(Gleason) Wurdack	100	3	0	2	2	1	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	C. Jativa 1142 (NY)	Renner *et al.* 1999
Graffenrieda	*sessilifolia*	Triana	100	2	2	1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	J.A. Steyermark 59493 (F)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*sipapoana*	Wurdack	43						0	-			-	0								0				1	B. Maguire 28272 (Paratipo F)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*styermarkii*	Wurdack	100	0/1	2		-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	J.A. Steyermark 74883 (Holotipo F)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*tamana*	Wurdack	100	2	2	0/1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	H. Mendoza 14706 (FMB), L. Ruiz-Teran 8925 (F)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*tricalcarata*	Gleason	100	3	0	2	2	1	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	2	2	0	1	R.S. Cowan 31395 (NY)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*trichanthera*	Gleason	100	2	2	1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	G. Klug 3298 (F)	Gleason 1936
Graffenrieda	*tristis*	(Triana) L.O.Williams	66	2	0	-	-	-	0	-			-	0								0				1	G. Klug 3213 (F)	Triana 1871
Graffenrieda	*uribei*	Wurdack	100	2	2	0/1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	H. Mendoza 3051 (FMB), L. Uribe 5638 (Isotipo F)	Wurdack 1971a
Graffenrieda	*versicolor*	Gleason	100	2/3	2	1	2	0	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	O. Huber 10956 (NY)	Hokche *et al.* 2008
Graffenrieda	*weddellii*	Naudin	100	2	2	0/1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	0	0	0	1	C. Sastre 2146 (FMB), J. Wurdack 43375 (F)	Hokche *et al.* 2008
Huberia	*carvalhoi*	Baumgratz	0																									Baumgratz 2004	Baumgratz 2004
Huberia	*Cogniauxi*	Baumgratz	0																									Baumgratz 2004	Baumgratz 2004
Huberia	*comsimilis*	Baumgratz	0																									Baumgratz 2004	Baumgratz 2004
Huberia	*espiritosantensis*	Baumgratz	100	1	0	-	-	-	0	-	1	1	-	1	0	1	1	3	-	-	-	0	0	0	0	1	Baumgratz 1999	Baumgratz 2004
Huberia	*glazioviana*	Cogn.	100	1	0	-	-	-	0	-	1	1	-	1	0	1	1	3	-	-	-	0	0	0	0	1	M. A. Glaziou 16816 (Tipo US)	Baumgratz 2004
Huberia	*laurina*	DC.	100	1	0	-	-	-	0	-	1	1	-	1	0	1	1	3	-	-	-	0	0	0	0	1	G. Hatschbach 44719 (COL)	Baumgratz 2004
Huberia	*minor*	Cogn.	0																									Baumgratz 2004	Baumgratz 2004
Huberia	*nettoana*	Brade	100	1	0	-	-	-	0	-	1	1	-	1	0	1	1	3	-	-	-	0	0	0	0	1	Baumgratz 2004, Brade 1935	Baumgratz 2004
Huberia	*ovalifolia*	DC.	100	1	0	-	-	-	0	-	1	1	-	1	0	1	1	3	-	-	-	0	0	0	0	1	J. P. Lanna 122 (COL), Noblick 3350 (COL)	Baumgratz 2004
Huberia	*parvifolia*	Cogn.	0																									Baumgratz 2004	Baumgratz 2004
Huberia	*peruviana*	Cogn.	0																									Baumgratz 2004	Baumgratz 2004
Huberia	*pranii*	Baumgratz	100	1	0	-	-	-	0	-	1	1	-	1	0	1	1	3	-	-	-	0	0	0	0	1	G. Hatschbach 31637 (Isotipo US)	Baumgratz 2004
Huberia	*semiserrata*	DC.	100	1	0	-	-	-	0	-	1	1	-	1	0	1	1	3	-	-	-	0	0	0	0	1	G. Hatschbach 31089 (COL)	Baumgratz 2004
Huberia	*staminodia*	Baumgratz	100	1	0	-	-	-	0	-	1	1	-	1	0	1	1	3	-	-	-	0	0	0	0	1	P. C. Hutchison 3995 (Isotipo US)	Baumgratz 2004
Huberia	*triplinervis*	Cogn.	0																									Baumgratz 2004	Baumgratz 2004
Huberia	*weberbaueriana*	Baumgratz	100	1	0	-	-	-	0	-	1	1	-	1	0	1	1	3	-	-	-	0	0	0	0	1	A. Weberbauer 7145 (Holotipo US)	Baumgratz 2004
Meriania	*acida*	(Markgr.) Wurdack	100	2	2	1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	0?	-	-	1	-	1	2	2	0	1	J. J. Wurdack 1054 (F)	Wurdack 1976b
Meriania	*acostae*	Wurdack	100	3	0	0	2	0	0	-	1	0	-	0	0	1	0?	-	1	0	-	0	1	1	0	1	G. Herrera 9586 (FMB)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*albertiae*	Wurdack	100	0	2	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	1	0	1	0	0	1	L. Albert de Escobar 5346 (US)	Calderon & Mendoza 2000
Meriania	*almedae*	Wurdack	0																								B. Ollgaard 90652 (QCA)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*amischophylla*	Wurdack	57	2	0	-	-	-	0	-			-	0												1	J. Schunke 9842 (Isotipo F)	Wurdack 1979
Meriania	*ampla*	Wurdack	100	1	1	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	0?	-	0	0	-	0	1	1	0	1	J. A. Steyermark 53507 (Holotipo F)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*amplexicaulis*	Wurdack	33						0	-			-	0												1	J. Kirkbride Jr. 4115 (US)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*antioquiensis*	L.Uribe	100	2/3	2	1	0	1	0	-	2	0	-	0	0	1	0	-	1	0	-	0	1	-	0	1	L. Albert 5994 (COL, F)	Uribe 1969
Meriania	*aracaensis*	Wurdack	24						0	-			-													1	I. L. de Amaral 1513 (Isotipo US)	Wurdack 1987b
Meriania	*aurata*	C. Ulloa, D. Fernandez & D. A. Neill	100	1	0	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1?	1	-	-	-	0	1	1	0	1	Ulloa *et al.* 2007	Ulloa *et al.* 2007
Meriania	*axineoides*	Gleason	100	2	1	1	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	0?	-	0	0	-	0	1	1	0	1	J. C. Solomon 10790	Gleason 1932
Meriania	*boliviensis*	Cogn.	100	2	0	0/1	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	0?	-	1	0	-	0	1	1	0	0	A.M. Bang Lectae 288 (NY)	Foster 1958
Meriania	*brevipedunculata*	Judd & Skean	100	1	0	-	-	-	0	-	2	0	0	0	0	1?	0?	-	3?	1?	-?	1	1	0	0	1	Judd & Skean 1987	Judd & Skean 1987
Meriania	*brittoniana*	Wurdack	100	1	1	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	0?	-	1	0	-	0	1	1	0	1	M. Nee 38261 (NY)	Wurdack 1966
Meriania	*broccha*	Wurdack	100	2	0	0	-	-	0	-	1	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	0	0	1	1	0	1	B.M. Boom 5512 (Tipo US)	Hokche *et al.* 2008
Meriania	*calophylla*	(Cham.) Triana	0																								R.Goldend. & Reginato 2006	R.Goldend. & Reginato 2006
Meriania	*campii*	Wurdack	100	1	0	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1?	1	-	-	-	0	1	1	0	1	W.H. Camp 4919 (Isotipo F)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*costata*	Wurdack	100	2	0	0	-	-	0	-	1	2	-	0	0	1	0?	-	0	1	-	1	1	1	0	1	Maguire 44358 (Tipo US)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*claussenii*	(Naudin) Triana	100	1	2	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	1	0	1	0	0	1	A. Glaziou sn (Tipo de M. dentata, F), Baumgratz et al. 2007	Baumgratz *et al.* 2007

Continuación Apéndice 1

Taxon			%	Cáliz					Estambre																			Ejemplares revisados o referencias	Referencia del nombre
Género	Epíteto Específico	Autor	Evaluación	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12a	12b	12c	12d	12e	12f	13	14	15	16	17		
Meriania	*crassiramis*	(Naudin) Wurdack	100	3	2	1	2	0	0	-	2	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	0	0	1	0	0	1	B. Maguire 33336 (MO)	Hokche *et al.* 2008
Meriania	*cuneifolia*	Gleason	100	2	0		-	-	0	-	2	0	-	0	0	1	0?	-	-	1	-	1	1	2	0	1	J. A. Steyermark 53543 (Isotipo F)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*cuzcoana*	Wurdack	100	1	1	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	0?	-	0	0	-	0	1	1	0	1	C. Vargas 5107 (Holotipo US)	Wurdack 1966
Meriania	*denticulata*	(Gleason) Wurdack	100	2	1	1	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	0?	-	0	1	-	1	2	2	0	1	J. A. Steyermark 54167 (F)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*dimorphanthera*	Wurdack	100	2	2	0/1	-	-	0	-	2		-	0	0	1	0?	-	-	1	-	1	1	-	0	1	A. Robles 48 (FMB), C. Barbosa 10094_89 (FMB)	Calderon & Mendoza 2000
Meriania	*drakei*	(Cogn.) Wurdack	100	3	1	1	0	0	0	-	0	-	-	0	0	1	1?	1	-	-	-	0	1	1	0	1	H. Vargas 2450 (QCNE), J. Jaramillo 12483 (COL)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*ekmanii*	Urb.	13						0	-			-														Urban 1927	Urban 1927
Meriania	*finicola*	Wurdack	100	3	2	1	2	0	0	-	1	2	-	0	0	1	0?	-	0	1		1	1	1	0	1	H. Baslev 2575 (Holotipo US)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*franciscana*	C. Ulloa & Homeier	100	2	2	1	-	-	0	-	2	0	-	0	0	1	0?	-	0	0		0	1	1	0	1	Ulloa & Homeier 2008	Ulloa & Homeier 2008
Meriania	*furvanthera*	Wurdack	100	2	1	0	-	-	0	-	1	2	-	0	0	1	0?	-	-	1	-	1	1	1	0	1	G. Harling 13506 (Holotipo US)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*glabra*	(DC.)Triana	100	1	2	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	1	0	1	0	0	1	W. Hoehne 5616 (COL), 939721F	Triana 1871
Meriania	*glazioviana*	Cogn.	95	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	1	0	1		0	1	Capanema 5191 (MO), Chiavegatto & Baumgratz 2008	Chiavegatto & Baumgratz 2008
Meriania	*grandiflora*	(Standl.) Almeda	100	3	2	0	2	0	0	-	1	0	-	0	0	1	0?	-	0	1	-	1	1	1	0	1	M. Davidson 360 (US), Almeda 1993	Almeda 1993
Meriania	*heptamera*	Lozano & Alvear	100	1	1/2	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	0?	-	1	0	-	0	1	1	0	1	C. Barbosa 2900 (FMB)	Lozano & Alvear 2002
Meriania	*hernandii*	L.Uribe	100	1	1	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1?	1	-	-	-	0	1	1	0	1	H. Mendoza 6010 (FMB), B. Maguire 61833 (COL, F)	Calderon & Mendoza 2000
Meriania	*hexamera*	Sprague	100	1	2	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	0	-	0	0	-	0	1	1	0	1	J. Cuatrecasas 9139 (COL), L. Williams 7598 7598 (F)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*huilensis*	Wurdack	100	1	0/1/2	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1?	1	-	-	-	0	1	1	0	1	H. Mendoza 4752 (FMB), J. Cuatrecasas 11627, 8614 (COL)	Calderon & Mendoza 2000
Meriania	*involucrata*	(Desr.) Naudin	100	2	0	0	-	-	0	-	2	2	0	0	0	1?	0?	-	0	1	-	1	1	0	0	1	Bro. Alain H. Liogier 11657 (F)	W3Tropicos
Meriania	*kirkbridei*	Wurdack	100	3	2	1/2	2	0	0	-	1	0	-	0	0	1	1?	1	-	-	-	0	1	1	0	1	J. Kirkbride 4208 (Isotipo F, Holotipo US)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*leucantha*	(Sw.) Sw.	100	1	0	-	-	-	0	-	2	2	0	0	0	1	1?		-		-	1	1	2	0	1	M.R. Crosby 1094 (F)	W3Tropicos
Meriania	*longifolia*	(Naudin) Cogn.	100	0	0	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1?	1	-	-	-	0	1	1	0	1	A. Dueñas 207 (FMB), E.L. Little Jr. 7355 (COL), J.M. Duque 2645 (COL)	Hokche *et al.* 2008
Meriania	*longipes*	O.Berg ex Triana	95	1	2	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	1	0	1		0	1	Chiavegatto & Baumgratz 2008	Chiavegatto & Baumgratz 2008
Meriania	*loxoensis*	Gleason	100	2	0		-	-	0	-	1	2	-	0	0	1	0?	-	0	1	-	1	1	1	0	1	J.A. Steyermak 54468 (Isotipo F)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*macrophylla*	(Benth.) Triana	100	1/2	2	0	-	-	0	-	2	0	-	0	0	1	0	-	1	0	-	0	1	-	0	1	J. Cuatrecasas 12554, 28745 (COL)	Hokche *et al.* 2008
Meriania	*maguirei*	Wurdack	100	3	1	1	0	0	0	-	0	-	-	0	0	1	0?	-	0	0	-	0	1	1	0	1	B. Maguire 44356 (Holotipo US)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*maxima*	Markgr.	100	1	1	-	-	-	0	-	1	1	-	0	0	1	0	-	1	0	-	0	1	1	0	1	G. Herrera 9162 (FMB)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*mexiae*	Wurdack	100	1	2	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	0?	-	0	0	-	0	1	1	0	1	H. Mendoza 6000 (FMB), L.E. Mora O. 6243 (COL)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*neblinensis*	Wurdack	100	1	1	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	0	0	1	2	0	1	60929 (Tipo NY), Gleason & Wurdack notas ined.	Hokche *et al.* 2008
Meriania	*nobilis*	Triana	100	1	1	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	1	0	-	1	0	-	0	1	2	0	1	G. Lozano 2969 (COL)	Calderon & Mendoza 2000
Meriania	*odorata*	Almeda	100	1	1	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	0	0	1	0	0	1	G. Mcpherson 11651 (Isotipo US), Almeda 1993	Almeda 1993
Meriania	*ornata*	Wurdack	100	2	1	1	-	-	0	-	2	0	-	0	0	1	0?	-	1	0	-	0	1	0	0	1	J. A. Steyermark 113912 (Holotipo US)	Hokche *et al.* 2008
Meriania	*pallida*	Gleason	100	1	2	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	1	0?	-	2	0	-	0	1	1	0	1	J. Cuatrecasas 15567 (Isotipo F)	Calderon & Mendoza 2000
Meriania	*panamensis*	Gleason	100	1/2	1		-	-	0	-	2	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	1	0	1	0/2	0	1	R. L. Wilbur 13196 (F), Almeda 1993	Almeda 1993
Meriania	*paniculata*	(DC.) Triana	100	1	1	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	1	0	1	0	0	1	Glaziou 16033 (F)	Triana 1871
Meriania	*parvifola*	Judd & Skean	100	0	0	-	-	-	0	-	2	0	0	0	0	1?	0?	-	0	0	-	1	1	0	0	1	W.S. Judd 6961 (NY)	Judd & Skean 1987
Meriania	*pastazana*	Wurdack	100	1	1	-	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	1	1	-	-	-	0	1	1	0	1	C. González 961 (COL), G. Harling 10198 (Isotipo F)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*peltata*	L.Uribe	100	2	2	1	-	-	0	-	2	0	-	0	0	1	0	-	1	0	-	0	1	-	0	1	H. Mendoza 16663 (FMB)	Uribe 1962
Meriania	*phlomoides*	(Triana) Almeda	100	3	2	1	2	0	0	-	1	0	-	0	0	1	0	-	0	1	-	1	2	1	0	1	H. Mendoza 17303 (FMB), Almeda 1993	Almeda 1993
Meriania	*pichinchensis*	Wurdack	100	3	2	1	0	0	0	-	1	0	-	0	0	1	0?	-	0	1	-	1	1	1	0	1	V. Zak 3233 (COL), S.E. Clemants 1698 (holotipo US)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*prunifolia*	D.Don	42	2	0		-	-	0	-			-	0													843473 F (Isotipo)	Brako & Zarucchi 1993
Meriania	*purpurea*	(Sw.) Sw.	100	2	0	0	-	-	0	-	2	2	0?	0	0	1	0?	-	0	1	-	1	1	0	0	1	W. S. Judd 5386 (F)	W3Tropicos
Meriania	*quintuplinervis*	Naudin	100	2	0	1	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	0?	-	0	1	-	1	2	2	0	1	A. Dueñas 234 (FMB), Gleason & Wurdack notas ined.	Calderon & Mendoza 2000
Meriania	*radula*	(Benth.) Triana	100	1	1	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1?	1	-	-	-	0	1	1	0	1	M. Weigend 98/339 (F)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*tetragona*	(Cogn.) Wurdack	13						0	-			-														Wurdack 1964	Wurdack 1964
Meriania	*rigida*	(Benth.) Triana	100	1	1	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	0?	-	0/1	0	-	0	1	1	0	1	B. Mguirre 61704 (COL), B. Maguire 61704 (F)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*robusta*	Cogn.	100	2	1/2	1	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	1	0	1	0	0	1	T. Plowman 12942 (F), Glaziou 16822 (isotipo de M. pergamentacea, F)	Chiavegatto & Baumgratz 2008
Meriania	*rugosa*	Markgr.	100	1	0	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	0?	-	0	0	-	0	1	1	0	1	J. J. Wurdack 1617 (F)	Wurdack 1964
Meriania	*sanchezii*	R.Goldend.	100	1	2	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	1	0	1	0	0	1	R.Goldend. & Martins 1999	R.Goldend. & Martins 1999
Meriania	*sanguinea*	Wurdack	100	1	1	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	0?	-	1	0	-	0	1	1	0	1	L.J. Dorr 6566 (QCNE), A. Muñoz 181 (COL), G. Harling 8044 (F)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*sclerophylla*	(Naudin) Triana	100	0/1	0		-	-	0	-	2	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	1	0	1	0	0	1	B. Maguire 33988 (F)	Hokche *et al.* 2008
Meriania	*speciosa*	(Bonpl.) Naudin	85	0	0	-	-	-	0	-	0	-	-	0		1	1?	1	-	-	-	0	1	1	0	1	S.L. Diaz 34 (CAUP)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*splendens*	Triana	66	1	1	-	-	-	0	-	1		-	0								0				1	C.E. González 3406 (CAUP), B. Maguirre 44257 (COL)	Triana 1871
Meriania	*squamulosa*	Urban & Ekman	33	2	0		-	-	0	-			0?														E.L. Ekman 7515 (US)	W3Tropicos
Meriania	*stellata*	(Gleason) Wurdack	0																									Wurdack 1976b
Meriania	*steyermarkii*	Gleason	57	2	0	1	-	-	0	-	1		-	0													S.S. Tillett 738_392 (COL)	Hokche *et al.* 2008
Meriania	*subumbellata*	Cogn.	100	1	1	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	0?	-	0	0	-	0	1	1	0	1	Foto Tipo A. Fendler (K), Wurdack 1973	Hokche *et al.* 2008
Meriania	*tetramera*	Wurdack	100	1	2	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0	1	1?	1	-	-	-	0	1	1	0	1	T. S. Satos 973 (Isotipo US)	Wurdack 1980b
Meriania	*tomentosa*	(Cogn.) Wurdack	100	3	1/2	1	2	0	0	-	1	2	-	0	0	1	0	-	0	1	-	1	2	2	0	1	H. Mendoza 8502 (FMB), W. Palacios 9838 (MO)	Renner *et al.* 1999
Meriania	*tuberculata*	Triana	33						0	-			-	0												1	Hno. Daniel 1607, 1712 (MEDEL)	Calderon & Mendoza 2000
Meriania	*urceolata*	Triana	100	1	1/2	-	-	-	0	-	2	0	-	0	0	0?	1?	-	-	-	0/1	0	1	0	0	1	J.M. Cardiel CHIN 54 (FMB), H. García Barriga 17097 (COL)	Hokche *et al.* 2008
Meriania	*vargasii*	Wurdack	100	2	0	0	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	0?	-	1	0	-	0	1	1	0	0	C. Vargas 13240 (Holotipo US)	Wurdack 1966
Meriania	*versicolor*	L.Uribe	100	2	0	0	-	-	0	-	1	0	-	0	0	1	0	-	0	1	-	1	1	1	0	1	H. Mendoza 16675 (FMB)	Calderon & Mendoza 2000
Meriania	*vilcabambensis*	Wurdack	33						0	-			-	0												1	T.R. Dudley 10595 (Holotipo US)	Wurdack 1971b
Meriania	*weberbaueri*	J.F.Macbri.	100	2	0	0	-	-	0	-	1	2	-	0	0	1	1?	1	-	-	-	0	1	1	0	0	A. Weberbauer 6659 (Holotipo F)	McBride 1941
Merianthera	*burlemarxii*	Wurdack	100	2	2	1	-	-	0	-	2	0	-	1	0	0	1?	-	-	-	1	0	2	0	0/1	1	G.J. Shepherd 5875 (F), P.C. Hutchison 8472 (Isotipo US)	Wurdack 1984

Continuación Apéndice 1

Taxon			%	Cáliz					Estambre																			Ejemplares revisados o referencias	Referencia del nombre
Género	Epíteto Específico	Autor	Evaluación	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12a	12b	12c	12d	12e	12f	13	14	15	16	17		
Merianthera	*sipolisii*	(Glaz. & Cogn.) Wurdack	100	2	2	0	-	-	0	-	2	0	-	1	0	0	1?	-	-	-	1	0	2	2	0/2	1	G. Hatschbach 36482 (MO),	Wurdack 1984
Merianthera	*pulchra*	Kuhlmann	90	3	2	1	1	1	0	-	2	0	-		0	0	1?	-	-	-	2	0	2		2	1	Gleason & Wurdack notas ined.	W3Tropicos
Neblinanthera	*cumbrensis*	Wurdack	100	0	2	-	-	-	0	-	0	-	-	1	0	1	1?	4	-	-	-	0	0/1	0/1	2	1	M. Nee 31126 (MO)	Hokche *et al.* 2008
Ochthephilus	*repentinus*	Wurdack	100	0	0	-	-	-	0	-	0	-	-	0	0?	1		1	-	-	-	0	1	1	0	1	Tillet 45084 (Tipo NY), Gleason & Wurdack notas ined.	Wurdack & Renner 1993
Pachyloma	*coriaceum*	DC.	100	1	1	-	-	-	0	-	1		-	1	0/1**	1?	1	3	-	-	-	0	0	0	0	1	R. E. Schultes 14249 (COL)	Hokche *et al.* 2008
Pachyloma	*huberioides*	(Naudin) Triana	100	1	2	-	-	-	0	-	1		-	1	0/1**	1?	1	3	-	-	-	0	0	0	0	1	A. Ducke 24105 (Tipo de *P. scanens* , US)	Hokche *et al.* 2008
Pachyloma	*pusillum*	Wurdack	100	1	1	-	-	-	0	-	0	-	-	1	0/1**	1?	1	3	-	-	-	0	0	0	0	1	G. Davidse 17422 (Isotipo de *P. nanum* , US)	Hokche *et al.* 2008
Pachyloma	*setosum*	Wurdack	100	1	1	-	-	-	0	-	0	-	-	1	0/1**	1?	1	3	-	-	-	0	0	0	0	1	M. Pabón 429 (COL), Wurdack 1973	Hokche *et al.* 2008
Phainantha	*laxiflora*	(Triana) Gleason	81	3	2	2	2	1	0	-	1		-	1	2		-	-	-	-	-	0			0	1	Wurdack 1973	Hokche *et al.* 2008
Phainantha	*maguirei*	Wurdack	81	3	2	2?	2	1	0	-	1		-	1	2		-	-	-	-	-	0			0	1	Wurdack 1973	Hokche *et al.* 2008
Phainantha	*myrteoloides*	Wurdack	81	3	2	2?	2	1	0	-	1		-	1	2		-	-	-	-	-	0			0	1	Wurdack 1973	Hokche *et al.* 2008
Phainantha	*shuariorum*	C. Ulloa & D.A. Neill	90	3	2	2	2	1	0	-	1	1	-	1	2		-	-	-	-	-	0	0		0	1	D. Neill 15853 (QCNE), Ulloa & Neill 2006	Ulloa & Neill 2006
Phainantha	*steyermarkii*	Wurdack	90	1	2	-	-	-	0	-	1		-	1	2		-	-	-	-	-	0	0	0	0	1	J. Steyermark 108984 (Tipo US), Gleason & Wurdack notas ined.	Hokche *et al.* 2008
Tessmannianthus	*calcaratus*	(Gleason) Wurdack	71	2	2		-	-	0	-	2	1	1	1								0			0	1	H. P. Fush 21762 (NY)	Wurdack 1975
Tessmannianthus	*carinatus*	Almeda	100	0	1	-	-	-	0	-	2	1	1	1	0	1?		2?	-	-	-	0	0	0	0	1	Almeda 1989	Almeda 1989
Tessmannianthus	*cenepensis*	Wurdack	76	2	2	1	-	-	0	-	2	1	1	1								0			0	1	W. Palacios 507 (NY)	Renner *et al.* 1999
Tessmannianthus	*cereifolius*	Almeda	100	1	2	-	-	-	0	-	2	1	1	1	0	1?		2?	-	-	-	0	1	0	0	1	Almeda 1990	Almeda 1990
Tessmannianthus	*gordonii*	Almeda	100	0	2	-	-	-	0	-	2	1	1	1	0	1?		2?	-	-	-	0	0	0	0	1	G. McPherson 11161 (Isotipo US), Almeda 1989	Almeda 1989
Tessmannianthus	*heterostemon*	Markgr.	43						0	-	2		1	1								0			0	1	C. Cerón 760 (NY)	Renner *et al.* 1999
Tessmannianthus	*quadridomius*	Wurdack	100	0	1	-	-	-	0	-	2	1	1	1	0	1?		2?	-	-	-	0	0	0	0	1	R. Callejas 8587 (NY)	Wurdack 1989
Miconieae																												
Miconia	*bubalina*	(D. Don) Naudin	100	0	2	-	-	-	0	-	2		-	1	-	1	0	2	-	-	-	0	1	0	0	1	H. Mendoza 16941 (FMB)	
Miconia	*dodecandra*	Cogn.	100	2	2	0/1	-	-	0	-	0	-	-	1	2	1	0?	2	-	-	-	0	0/2	0/2	0	1	J. Cuatrecasas 13369 (COL)	
Clidemia	*epiphytica*	(Triana) Cogn.	28	0	0	-	-	-	0	-	0	-	-	1	-			-	-	-	-	0			0	1	C. Barbosa 6441 (FMB)	
Clidemia	*dentata*	D. Don	100	1	0	-	-	-	0	-	0	-	-	1	-			-	-	-	-	0	2	2	0	1	H. Mendoza 2181 (FMB)	
Melastomeae																												
Tibouchina	*lepidota*	(Bonpl.) Baill.	100	0	2	-	-	-	0	-	0	-	-	1	1	1	1?	-	-	-	-	0	0	0	0	1	J. Luteyn 7171 (COL)	
Tibouchina	*triflora*	Gleason	100	0	2	-	-	-	0	-	1	1	-	1	1	1	1?	-	-	-	-	0	0	0	0	1	H. Mendoza 17328 (FMB)	
Cyphostyleae																												
Allomaieta	*caucana*	Lozano	100	3	2	1	1	0	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	1	1	C. Acevedo 90 (Holotipo COL)	
Allomaieta	*ebejicosana*	Lozano	100	3	2	0	1	0	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	1	1	L. Albert de Escobar 6378 (Holotipo COL)	
Allomaieta	*grandiflora*	Gleason	100	3	0	0	1	0	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	1	1	OR 13596 (COL)	
Allomaieta	*hirsuta*	(Gleason) Lozano	100	3	1/2	1	1	0	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	1	1	A. Robles 79 (FMB)	
Allomaieta	*pancurana*	Lozano	100	3	0	1	1	0	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	1	1	R. Callejas 4183 (Holotipo COL)	
Allomaieta	*strigosa*	(Gleason) Lozano	100	3	2	1	1	0	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	1	1	G. Lozano 4994 (COL)	
Allomaieta	*villosa*	(Gleason) Lozano	100	3	2	1	1	0	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	1	1	Toro 1038 (Tipo NY)	
Allomaieta	*zenufanasana*	Lozano	100	3	0	0	1	0	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	1	1	D. Tuberquia 139 (Holotipo COL)	
Tribu incierta																												
Wurdastom	*bullata*	(Wurdack) B.Walln.	100	0	1	-	-	-	1	1	-	-	-	0	0	1?	1?	1	-	-	-	0	-	1	1	1	J. Cuatrecasas 22475 (Tipo US)	
Wurdastom	*cuatrecasasii*	(Wurdack) B.Walln.	100	2	2	0	-	-	1	1	-	-	-	0	0	1?	1?	1	-	-	-	0	-	1	1	1	L. García 06 (FMB)	
Wurdastom	*dorri*	(Wurdack) B.Walln.	100	1	1	-	-	-	1	1	-	-	-	0	0	1?	1?	1	-	-	-	0	-	1	1	1	L.J. Dorr 6604 (Tipo US)	
Wurdastom	*dudleyi*	(Wurdack) B.Walln.	100	2	2	0	-	-	1	1	-	-	-	0	0	1?	1?	1	-	-	-	0	-	2	1	1	T. Katan 52 (QCNE), T. Madison 10101 (Tipo US)	
Wurdastom	*ecuadorense*	(Wurdack) B.Walln.	100	3	2	1	1	0	1	1	-	-	-	0	0	1?	1?	1	-	-	-	0	-	1	1	1	H. Mendoza 890 (FMB), I. Gil 726 (FMB)	
Wurdastom	*hexamera*	(Wurdack) B.Walln.	100	3	2	1	1	0	1	1	-	-	-	0	0	1?	1?	1	-	-	-	0	-	1	1	1	Foto Tipo K. von Sneidern 1638 (S); Gleason & Wurdack notas ined.	
Wurdastom	*sneidernii*	(Wurdack) B.Walln.	100	3	2	1	1	0	1	1	-	-	-	0	0	1?	1?	1	-	-	-	0	-	1	1	1	Foto Tipos K. von Sneidern 906, 977 (S); Gleaso & Wurdack notas ined.	
Wurdastom	*subglabra*	(Wurdack) B.Walln.	100	1	0	-	-	-	1	1	-	-	-	0	0	1?	1?	1	-	-	-	0	-	1	1	1	J. Cuatrecasas 15764 (Tipo US)	

Notas: *género considerado como una sinonimia de Behuria según Tavares 2005 / **En un mismo estambre.

Apéndice 2. Lista de nombres de la tribu Merianieae no incluidos en el apéndice I.

Los nombres de taxones que se listan a continuación corresponden en su mayoría a binomios reconocidos hoy como sinónimos de otros taxones incluidos en el apéndice I. También se incluyen nombres que no cuentan con suficiente información que los respalde y otros no publicados válidamente (nombres de herbario, nombres inválidos, etc.). Se incluyen por último algunos nombres de taxones de los cuales se pudieron observar los tipos o sus fotografías, lo que permitió sugerir algunas sinonimias aún no establecidas formalmente (se coloca probable=). En la lista que se presenta a continuación y para el caso de sinonimias nomenclaturales o taxonómicas, se indica en la columna derecha el nombre correcto aceptado en la actualidad.

Adelobotrys

A. guianensis (DC.) Gleason = ***A. adcendens*** (Sw.) Triana

A. laxiflora Triana = ***Phainantha laxiflora*** (Triana) Gleason

A. linearifolia L.Uribe – probable = *A. subsessilis* Gleason

A. multiflora Pilger = ***A. adcendens*** (Sw.) Triana

Axinaea

A. pupurea Ruiz & Pav. = ***Meriania radula*** (Benth.) Triana

A. rugosa Ruiz & Pav. = ***A. dependens*** Pav. ex D.Don

A. speciosa Britton = ***Meriania brittoniana*** Wurdack

A. tovarii Wurdack = ***A. tomentosa*** Cogn.

Benevidezia Saldanha & Cogn. = ***Behuria*** Cham. (Tavares *et al*. 2008)

Caliptrella

C. litoralis Gleason – probable = *Graffenrieda anomala* Triana

Centronia

C. crassiramis (Naudin) Triana = ***Meriania crassiramis*** (Naudin) Wurdack

C. excelsa (Bonpl.) Triana = ***Merania tomentosa*** (Cogniaux) Wurdack

C. grandiflora Standl. = ***Meriania grandifolia*** (Standl.) Almeda

C. lehmannii Cogn. – sp. inédita

C. phlomoides Triana = ***Meriania phlomoides*** (Triana) Almeda

C. subrotundifolia Cogn. – sp. inédita = probable = *Axinaea pauciflora* Cogn.

C. tomentosa Cogn. = ***Merania tomentosa*** (Cogn.) Wurdack

C. tunguraguae S.F.Blake = ***Merania tomentosa*** (Cogn.) Wurdack

Graffenrieda

G. acida Markgr. = ***Meriania acida*** (Markgr.) Wurdack

G. barahonensis Urban – No se encontraron ejemplares, falta de información

G. boliviensis Cogn. – probable= *G. limbata* (Naudin) Triana

G. brevicalcarata Markgr. = ***Miconia jucunda*** (DC.) Triana

G. cordifoia Alain = **Miconia javorkaeana** Borhidi

G. curta Gleason = ***Miconia curta*** (Gleason) Wurdack

G. gentlei Lundell – No se encontraron ejemplares, falta de información

G. ovalifolia Naudin= ***G. weddellii*** Naudin

G. parviflora Triana – No se encontraron ejemplares, falta de información

G. pendulifolia Cogn. – No se encontraron ejemplares, falta de información; probale *Axinaea*

G. phoenicia Markgr. – No se encontraron ejemplares ni el tipo, falta de información

G. stellipilis Gleason= ***Miconia amissa*** Wurdack

G. stenopetala Ule= ***G. intermedia*** Triana

Meriania

M. arborea Triana - probable = *M. quintuplinervis* Naudin

M. barbinervis Naudin = ***M. longifolia*** (Naudin) Cogn.

M. bifrons Naudin= ***M. pupurea*** Sw.

M. candollei Cogn. - probable = *M. longifolia* (Naudin) Cogn.

M. capitata Cogn. - No hay fotos ni ejemplares, no se sabe donde está el tipo

M. colombiana Gleason - probable = *M. quintuplinervis* Naudin

M. cordifolia (Karst.) Cogn. - probable = *M. longifolia* (Naudin) Cogn.

M. dentata Cogn. = ***M. clausenii*** Cogn.

M. grandidens Triana = ***M. longifolia*** (Naudin) Cogn.

M. intonsa Gleason = ***Adelobotrys intonsa*** (Gleason) Wurdack

M. karstenii Naudin = ***M. longifolia*** (Naudin) Cogn.

M. lindenii Cogn. - probable = *M. longifolia* (Naudin) Cogn.

M. oblongifolia Cogn. = ***Axinaea oblongifolia*** (Cogn.) Wurdack

M. obtusifolia DC. = ***M. involucrtata*** Naudin

M. paraensis Ducke = ***M. urceolata*** Triana

M. pergamentacea Cogn. = ***M. robusta*** Cogn.

M. pulcherrima Herzog = ***M. axineoides*** Gleason

M. rosea Tuss. = ***M. leucantha*** (Sw.) Sw.

M. simsiana Gleason= ***Axinaea sessilifolia*** Triana

M. spruceana Cogn. - probable= *M. longifolia* (Naudin) Cogniaux

M. stellata (Gleason) Wurdack– No se encontraron ejemplares, falta de información

M. tetraquetra Triana – No se encontraron ejemplares, falta de información

M. tolimana Cuatrec. – No se encontraron ejemplares, falta de información

M. trianae (Karst.) Cogn. - probable = *M. longifolia* (Naudin) Cogn.

M. umbellata Karst. - probable = *M. longifolia* (Naudin) Cogn.

Pachyloma

P. scandens Ducke = ***P. huberoides*** (Naudin) Triana

P. *nanum* Wurdack = ***P. pusillum*** Wurdack

ISLA DE CALOR Y CAMBIOS ESPACIO-TEMPORALES DE LA TEMPERATURA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ

Por

Laura Ángel[1], Alberto Ramírez[1] , Efraín Domínguez[1]

Resumen

Ángel L, A. Ramírez & E. Domínguez: Isla de calor y cambios espacio-temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (131): 173-183, 2010. ISSN 0370-3908.

El planeta en su conjunto viene experimentando durante los últimos años un proceso de calentamiento cuya principal causa señala a la acumulación de los gases de invernadero en la atmósfera. De otro lado, ha sido ampliamente documentado el hecho de la existencia de islas térmicas al interior de las ciudades producto, principalmente, del cambio de suelos cubiertos por vegetación por otros de índole urbana como asfalto, concreto, ladrillos, etc. Sobre el marco anterior, esta investigación evaluó los cambios en la temperatura media, mínima y máxima ocurridos en la ciudad de Bogotá durante los últimos 40 años y evidenció la presencia de una isla de calor que se extiende por la mayor parte de la ciudad, y que supera en cerca de 3°C a la temperatura media de la periferia. Así mismo, se hicieron evidentes períodos de aumento y disminución de la temperatura de la ciudad, cuyas tendencias seculares no son afectadas por el Fenómeno del Niño y que se manifiestan con mayor fuerza en la periferia.

Palabras clave: islas térmicas urbanas, calentamiento global, ecología urbana, urbanización.

Abstract

The planet Earth, as a whole, has experienced a warming process caused principally by the accumulation of atmospheric greenhouse gases. Otherwise, it has been well demonstrated that thermic islands exist inside of cities, essentially as a result of the replacement of forest areas with urban materials such as asphalt, concrete, bricks, etc. Based on this foundation, this research evaluated the minimum, median and maximum temperature changes that occurred in the city of Bogotá over the last 40 years. This research makes evident the presence of a heat island 3°C over the periphery median temperature in most of the city. There were also periods with increases and decreases in city temperatures, not affected in its main tendency by the Niño Phenomena which in contrast affected the periphery.

Key words: islas térmicas urbanas, calentamiento global, ecología urbana, urbanización.

1 Facultad de Estudios Ambientales y Rurales. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

Introducción

Hace apenas un siglo el 14% de la población mundial vivía en las urbes (**Naciones Unidas**, 2001), en tanto hoy alcanza ya el 50%, si bien en algunos países desarrollados tales cifras se aproximan a 75 y 80%. El crecimiento de la población humana continúa su carrera exponencial a una tasa media de 1% anual, mientras que el crecimiento urbano hace lo propio a una velocidad casi dos veces superior (1,8%) (**Naciones Unidas**, 2004).

Algunas consecuencias de la urbanización incluyen pérdida de áreas verdes, reducción en la captación de gases de carbono, mayor emisión de contaminantes atmosféricos, impermeabilidad de los suelos y almacenamiento de calor en estructuras, superficies y aire, dando origen a las llamadas islas térmicas (**Valor *et al.,*** 2000; **Grimmond,** 2007). La temperatura urbana, no obstante, es afectada no sólo por condiciones antrópicas como la altura y densidad de las edificaciones y el tipo de superficies, sino por variables naturales relativas a vientos, humedad, precipitación y nubosidad (**Givoni,** 1998).

Con respecto a las emisiones de carbono urbanas, éstas son responsables del 97% del CO_2 antropogénico, de los cuales 60% proviene del transporte y la construcción y 40% del sector industrial (**Svirejeva-Hopkins *et al.,*** 2004). Por lo anterior, es un hecho que la urbanización constituye un cambio drástico de la naturaleza y ésta incide en los cambios globales (**IPCC,** 2002; **Foley *et al.,*** 2005).

Como efecto de la contaminación atmosférica de origen antrópico, a partir de 1957 el CO_2 se incrementó de 315 a 362 ppm, lo que representa la principal causa del calentamiento global (**Vitousek *et al.,*** 1997). Con base en diferentes escenarios simulados y teniendo en cuenta las emisiones de 1991 a 2010, se espera que los niveles de estabilización del CO_2 estén entre 450 y 1000 ppmv (**IPCC,** 2002) y, para tales condiciones, la temperatura del planeta podría incrementarse en aproximadamente 2ºC.

De acuerdo con el **IPCC** (2001), el clima de la Tierra está cambiando y la temperatura mundial de la superficie ha aumentando desde finales del siglo XIX; la mayor parte del aumento se ha dado después de 1976, siendo la década de los noventa la más cálida. Este fenómeno aunque global, ha sido más notorio en el hemisferio norte.

En los sistemas urbanos las áreas verdes expresan más sombra, frescura, refugio a la lluvia, humedad y filtración de aire, en contraposición con las edificaciones que son estructuras que almacenan calor (**Oke,** 1989; **Olgyay,** 1998; **Huang *et al.,*** 2007), lo que conduce a la formación de gradientes térmicos entre las áreas urbanas y rurales. Estudios realizados por Oke en la ciudad de Vancouver encontraron que las áreas boscosas son hasta 5,5ºC más frías que las urbanas, mientras que los parques urbanos verdes son 1,1ºC más fríos que las áreas edificadas. Las zonas verdes, por tanto, mitigan los impactos térmicos al interior de las ciudades (**Wong *et al.,*** 2005), en tanto las zonas industriales en primer término, y las comerciales en segundo, generan los mayores incrementos en las temperaturas (**Jusuf *et al.,*** 2007).

Estudios recientes en New York, Calgary, Vancouver, Montreal y otras ciudades de Europa y Norte América, muestran que la temperatura urbana es 4 a 7ºC mayor que la de las áreas rurales vecinas y que hay relación directa (vía exosomática) con el tamaño poblacional. Por demás, se ha incrementado entre 1,5 y 5ºC la temperatura nocturna de las grandes ciudades (**Makar *et al.,*** 2006).

Para la ciudad de Columbia se ha encontrado intensificación y expansión de la isla de calor desde 1967 (**Landsberg *et al.,*** 1981) y, de manera similar, para San Juan de Puerto Rico se encontró que la temperatura de la ciudad ha incrementado 0.06°C por año durante los últimos 30 años, siendo el área comercial de la ciudad la zona más caliente (**Gonzalez, *et al.,*** 2005). Resultados semejantes se han observado en la ciudad de Shenzhen (China) cuyos efectos en la temperatura no sólo son locales sino regionales (**Chen *et al.,*** 2006). De igual modo, en Kuwait cada vez son más frecuentes los casos de temperaturas mayores a 50ºC, con incrementos entre 0,3 y 0,8ºC por año desde 1972, lo que significa no sólo un mayor gasto energético per cápita en aire acondicionado, sino mayor cantidad de equipos que arrojan calor al exterior (**Al-Fahed *et al.,*** 1997).

A consecuencia del incremento de la temperatura, se ha estimado para Hong Kong bajo el supuesto de incremento de la temperatura en 1ºC, que subirá el consumo energético doméstico en 9,2%, el comercial en 3% y el industrial en 2,4%, lo cual representa un costo adicional de HK $1.6 billones por año (**Fung *et al.,*** 2006). Al respecto, **Saylor y Muñoz** (1997) han establecido que el consumo de energía está asociado a la temperatura ambiental, y que más del 80% de la energía consumida en Estados Unidos se relaciona con dicha variable.

La ciudad de Bogotá no ha sido ajena al crecimiento poblacional, a la urbanización y a la contaminación atmosférica, así como a la reducción de sus zonas verdes con pérdida de espacios para recreación, esparcimiento, conservación y menoscabo de beneficios ambientales (**Alcaldía Mayor de Bogotá,** 2000; **Preciado *et al.,*** 2005). Como muchas otras ciudades de Latinoamérica, su desarrollo se dio a partir del centro y con expansión hacia la periferia

siguiendo los desarrollos del ferrocarril y las vías presentes, bajo una continua y manifiesta falta de planeación (**Jiménez,** 2002). La ciudad expone alta contaminación atmosférica, 60% de la cual se atribuye a los vehículos y el restante 40% a las industrias; a su vez, la zona norte de la ciudad muestra mayor cobertura de zonas verdes que el resto de la ciudad (**Alcaldía Mayor de Bogotá,** 2000).

Estudios de evaluación de la temperatura realizados por **Montealegre** (1979) y **León** (1998), encontraron que la temperatura en Bogotá ha venido aumentando, en tanto **Pabón *et al.*** (1998) refieren la presencia de una isla de calor que se viene formando desde 1970 en el centro de la ciudad y que se expande hacia el norte. En tal sentido, esta investigación pretende continuar y actualizar los estudios de temperatura del aire sobre la ciudad de Bogotá, con el propósito de constatar los resultados previamente encontrados, así como evaluar posibles variaciones de éstos, a la luz de los procesos de urbanización y expansión de la ciudad.

Metodología

La ciudad de Bogotá se encuentra ubicada en el sistema orográfico de los Andes a una altitud de 2650 msnm, con variaciones en el perímetro urbano entre 2550 y 2800 msnm (figura 1). Tiene un área de 163575 has, 74% de las cuales son de suelo rural, 24% de suelo urbano y 2% de suelo de expansión (**Alcaldía Mayor de Bogotá,** 2010) y cuenta con una población de 7'881156 habitantes en el área urbana (**DANE,** 2005).

El clima de la ciudad está ampliamente afectado por la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) en la cual convergen las masas de aire de los hemisferios norte y sur en inmediaciones de la línea Ecuatorial, la cual se desplaza latitudinalmente dos veces por año causando un régimen pluvial de precipitación con dos máximos que se registran durante Abril-Mayo y Octubre-Noviembre, así como períodos secos durante Enero-Febrero y Julio-Agosto. La precipitación total anual es cercana a 1000 mm con un gradiente espacial que oscila entre 800 mm en el sur de la ciudad y más de 1000 mm en el extremo nororiental (**Alcaldía Mayor de Bogotá,** 2010). De otro lado, el sistema de vientos predominante en la ciudad muestra corrientes que ingresan por el oriente y el suroriente y que se dirigen al norte y al noroccidente (**Alcaldía Mayor de Bogotá,** 2007).

Para la realización de esta investigación se recabó la información de temperatura media, máxima y mínima de diferentes estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM y de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR. Con base en la cantidad de registros presentes y faltantes de dicha información, se eligieron diez estaciones para el análisis estadístico (Tabla 1).

Figura 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas analizadas.

Tabla 1. Estaciones Meteorológicas y características paisajísticas.

Estación	Ubicación	Características
Aeropuerto de Guaymaral - AtoG	Norte	Urbanización media con gran presencia de áreas verdes a su alrededor; en ocasiones en la periferia.
Instituto Alberto Merani - IM	Norte	
Jardín Botánico - JB	Central	
Aeropuerto P1-2 - Ato	Centro-occidente	
Hda. Las Vegas - HLV	Centro-occidente	
Vivero Venado de Oro - VVO	Centro-oriente	Urbanizada con influencia de los Cerros Orientales.
Doña Juana - DJ	Sur	
Universidad Nacional - UN	Central	Altamente urbanizada hace tres o más décadas.
U. Pedagógica - UP	Central	
INEM Kennedy - IK	Suroccidente	

El análisis de información consistió en pruebas de hipótesis de comparación de promedios (ANOVA) y medianas (Kruskal-Wallis para los casos de heteroscedasticidad), junto con comparaciones múltiples (Tukey) para aquellos resultados con diferencias significativas ($p<0,05$) (**Zar,** 1984; **Sokal y Rohlf,** 2000; **Sheskin,** 2003). Para ello se empleó el programa estadístico Kyplot v.2.0. Estas pruebas se aplicaron tanto entre estaciones (espacial) como décadas (temporal) y los resultados se expresaron gráficamente sobre el mapa para mejor comprensión de los mismos. Los análisis se hicieron por separado para las temperaturas media, máxima y mínima (grados Celsius). De otro lado, se realizaron curvas de diferencias integrales para cada estación (**Druzhinin *et al.,*** 1966) con el propósito de identificar las tendencias históricas en cada una de ellas (Ecuación 1).

$$Y_i = \sum_{i=1}^{n} \left\{ \frac{\frac{X_i}{\overline{X}} - 1}{\frac{S}{\overline{X}}} \right\}$$ Ecuación 1

Donde:

S: desviación estándar

$\overline{X}$: promedio

Adicionalmente, se empleó el análisis de componentes principales (ACP) para caracterizar y ordenar la temperatura media de la ciudad en las diferentes Estaciones (**Kendall,** 1975; **Chatterjee y Price,** 1977; **Johnson y Wichern,** 1982). Por último se recabó información relativa al crecimiento poblacional (**DANE,** 2005) y de viviendas de la ciudad la cual se analizó mediante análisis de regresión lineal (**Drapper y Smith,** 1981).

Resultados y análisis

La figura 2 muestra el comportamiento de la temperatura media mensual para cada una de las estaciones meteorológicas junto con los valores máximos y mínimos para el período 1966-2005. En ellas se observa, por un lado, que la temperatura media prevalece en valores aproximados de 12 a 16 grados según la estación meteorológica, lo que marca una diferencia espacial aproximada de 4ºC, destacándose como las más cálidas IM, UP, UN, IK y JB, y como las más frías DJ, VVO y AtoG.

Por otro lado, se observan variaciones térmicas que responden al ciclo anual con los valores más altos, por lo general, durante los meses de Abril, Mayo y Junio, y los más bajos durante Julio, Agosto y Septiembre, resultado que concuerda ampliamente con lo hallado por **Montealegre** (1979, 1990).

La aplicación del ACP a la media mensual de cada estación vía matriz de covarianza (figura 3), agrupa el 98% de información en el primer componente y alcanza 99% en los dos primeros componentes y las correlaciones entre los meses del año estuvieron todas por encima de 0,937 ($p < 0,01$). Este análisis disoció tres grupos diferentes:

1. Mayor temperatura: corresponde a los valores positivos sobre el eje I e incluye UP, IM, IK, JB y UN, estaciones que fueron previamente referidas como las más cálidas.

2. Menor temperatura: VVO, AtoG, Ato y HLV.

3. Menor temperatura: DJ, esta estación se disoció del grupo anterior por cuanto expresa temperaturas aún más frías durante los meses de Julio y Agosto.

La expresión espacial de estos resultados permite visualizar que los registros de mayor temperatura se localizan en el interior de la ciudad, en tanto las temperaturas menores se localizan en la periferia. Estos resultados sugieren un claro efecto de las construcciones que incrementa la temperatura central de la ciudad y, en contraste, un efecto de refrigeración en los suburbios gracias a la presencia aledaña de extensas zonas rurales. Este patrón expresa un efecto de isla de calor que cumple con las características que dan lugar a éste, el cual ya había sido señalado por **Pabón *et al.*** (1998). Este fenómeno se explica por las interacciones urbano-urbano en el interior de las ciudades, y urbano-rural en la periferia (**Amaya,** 2005), por lo que los cambios en el uso del suelo constituyen una variable sustancial en la explicación de los gradientes espaciales de temperatura en las ciudades (**Bello,** 1995).

Cabe señalar que la estructura del suelo de Bogotá ha sido fuertemente modificada por la expansión del sector terciario por fuera del centro tradicional y por el crecimiento urbano de los municipios aledaños junto con los asentamientos no formales e ilegales en las periferias de la ciudad (**Alcaldía Mayor de Bogotá,** 2000).

De otro lado, los análisis temporales realizados a partir de las curvas de diferencia integral, permiten observar en la figura 4, las tendencias manifiestas en cada una de las estaciones meteorológicas, haciendo la salvedad de que existen diferencias en el número de años involucrados en cada estación. Se reconoce, como primera medida, que la temperatura media tiene un comportamiento no estacionario en todos los casos, lo que significa que ha habido períodos de calentamiento y enfriamiento.

La tendencia general para las estaciones más céntricas, o que exhiben mayor tiempo de urbanización histórica,

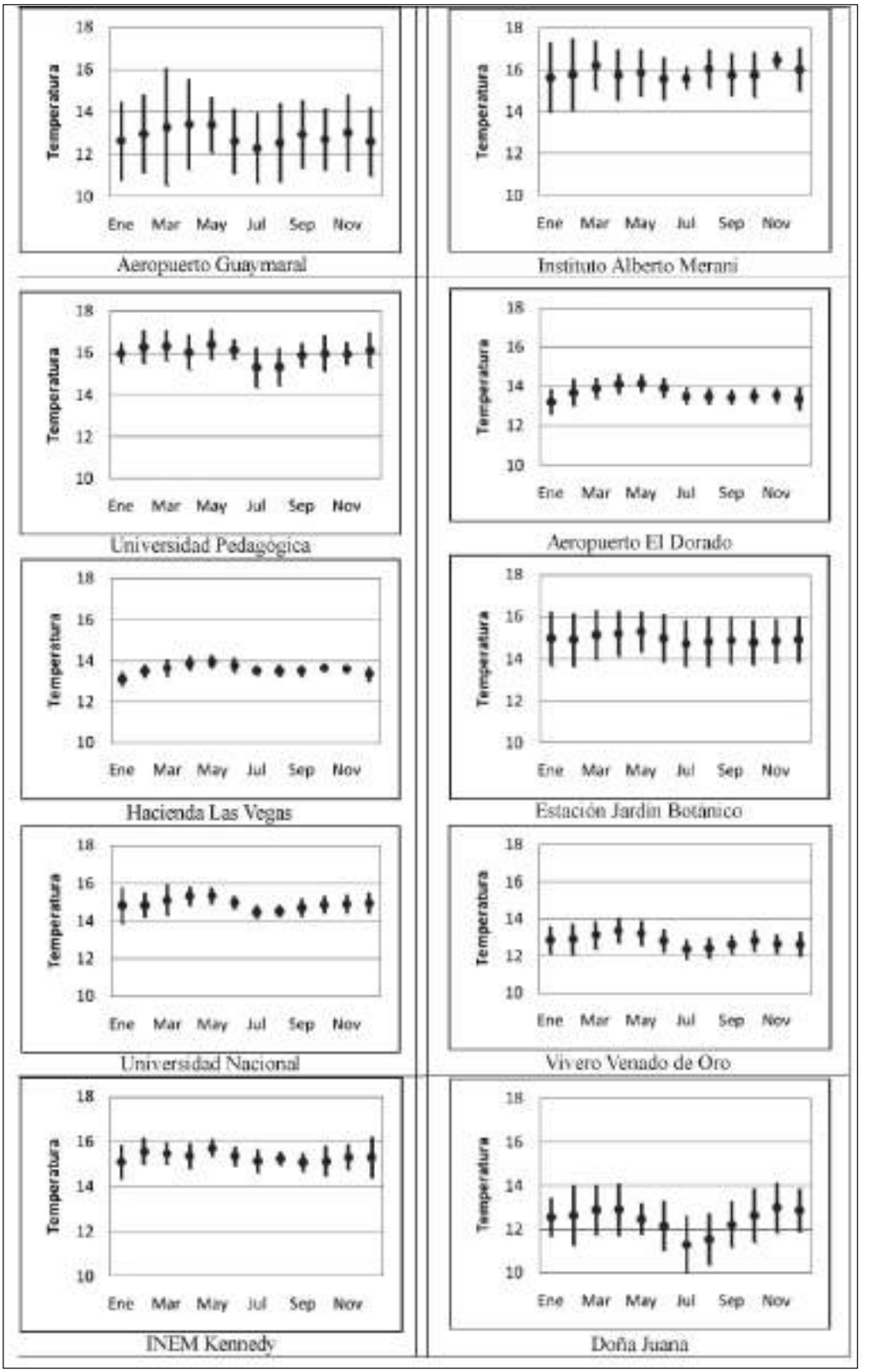


Figura 2. Temperatura media, máxima y mínima mensual para el período 1966-2005.

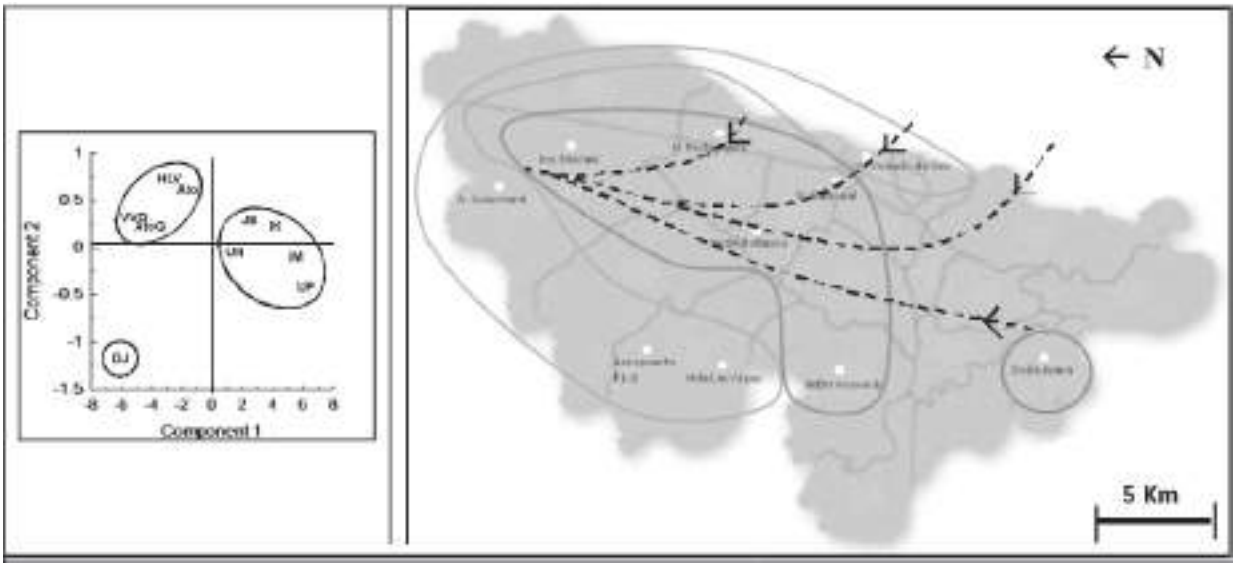


Figura 3. Análisis de componentes principales para las estaciones meteorológicas y espacialización de los resultados (Línea punteada: dirección de los vientos).

muestra reducción de la temperatura durante los 80, estabilidad durante los 90 e incremento durante la década del 2000. Por su parte, en las estaciones sobre los márgenes de la ciudad predomina disminución de la temperatura durante los 80 con incremento o estabilidad durante las últimas dos décadas. En tal sentido, hay más heterogeneidad en lo ocurrido en la periferia respecto al centro de la ciudad y en ello incide la diversidad de patrones climáticos.

Vale notar que para los tres parámetros de temperatura, la mayor cantidad de cambios estadísticamente significativos ocurrieron a finales de los 80 y principios de los 90.

De otro lado, cabe notar que el Fenómeno del Niño genera alteraciones de distinta índole en el clima mundial y en Colombia se manifiesta, de manera particular, con períodos más secos y cálidos que alcanzan hasta 2ºC más que los promedios históricos (**IDEAM,** 2002). La manifestación del Fenómeno del Niño se ha hecho más frecuente, persistente e intensa desde mitad de los años 70 en comparación con períodos de tiempo anteriores (**IPCC,** 2002). Este estudio muestra que hubo incrementos de temperatura durante los años en que se manifestó este Fenómeno, pero que no modificó las tendencias seculares de aumento o disminución de la variable. El Fenómeno del Niño mostró los mayores efectos en incremento de temperatura durante los años 1997-1998 y 1991-1992, el primero de ellos referido por el **IDEAM** (2002) como uno de los años con efectos más fuertes; esta Institución también destaca el período 1982-1983, pero los resultados encontrados en esta investigación no respaldan tal afirmación.

Las pruebas estadísticas señalan que el mayor número de cambios significativos en la temperatura media, mínima y máxima de las estaciones de una década a la siguiente, se ha incrementado gradualmente desde la década de los 60 hasta la fecha (figura 5) y, en particular, con incremento de esta variable. Si bien tales resultados están afectados por el número de registros totales de cada estación, la relación entre los cambios significativos positivos y negativos se incrementa de 5 a 7 en la temperatura media, es estable y ligeramente menor a 2 en la mínima y se incrementa de 2 a 12 para reducir después a 5 en la máxima, lo que denota una tendencia neta de aumento de la temperatura de la primera y la última variable. Los resultados de cada prueba estadística mes a mes, en cada estación y entre décadas se exponen en la tabla 2 para la temperatura media. Las estaciones que por regla general mostraron las temperaturas más frías y más cálidas fueron las siguientes:

Década	Menores	Mayores
1976 – 1985	VVO, Ato	AtoG, JB
1986 – 1995	DJ, VVO, HLV, AtoG	Ato, UN, JB, UP
1996 – 2005	DJ, VVO, HLV, Ato, AtoG	UN, IK, JB, IM, UP

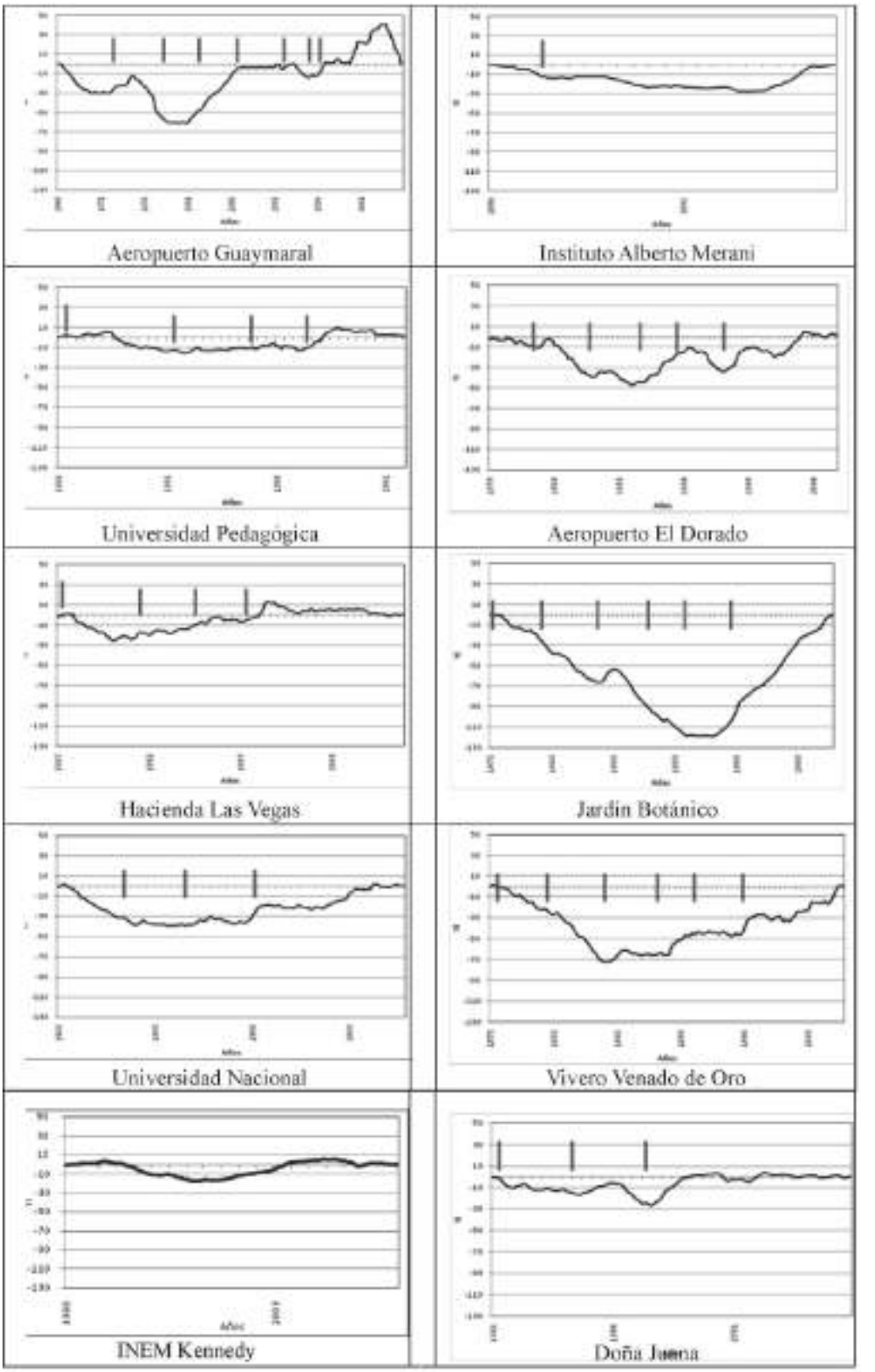


Figura 4. Curvas de diferencia integral para cada estación meteorológica. Las barras verticales señalan presencia del Fenómeno del Niño.

Tabla 2. Cambios significativos entre décadas por estación y mes (temperatura media).

Mes	Estación									
	VVO	**JB**	**Ato**	**UP**	**UN**	**HLV**	**IM**	**IK**	**DJ**	**AtoG**
Ene		76-85 = 86-95 < 96-05	76-85 < 86-95 = 96-05	76-85 = 86-95 > 96-05					76-85 = 86-95 < 96-05	66-75 = 76-85 < 86-95 = 96-05
Feb	76-85 < 86-95 < 96-05	76-85 = 86-95 < 96-05	76-85 < 86-95 = 96-05		76-85 = 86-95 < 96-05					66-75 = 76-85 < 86-95 < 96-05
Mar	76-85 = 86-95 < 96-05	76-85 > 86-95 < 96-05			76-85 = 86-95 < 96-05					66-75 = 76-85 < 86-95 = 96-05
Abr	76-85 < 86-95 < 96-05				76-85 = 86-95 < 96-05					66-75 = 76-85 < 86-95 = 96-05
May	76-85 < 86-95 < 96-05	76-85 = 86-95 < 96-05	76-85 < 86-95 = 96-05	76-85 = 86-95 < 96-05					76-85 = 86-95 < 96-05	66-75 > 76-85 > 86-95; 76-85 > 96-05
Jun	76-85 < 86-95 = 96-05	76-85 < 86-95 < 96-05	76-85 < 86-95 > 96-05			76-85 = 86-95 > 96-05			76-85 = 86-95 < 96-05	66-75 = 76-85 = 86-95 > 96-05
Jul	76-85 < 86-95 = 96-05	76-85 < 86-95 < 96-05	76-85 < 86-95 = 96-05	76-85 = 86-95 < 96-05					76-85 = 86-95 < 96-05	66-75 < 76-85 > 86-95; 76-85 > 96-05
Ago	76-85 < 86-95 = 96-05	76-85 = 86-95 < 96-05	76-85 < 86-95 = 96-05	76-85 = 86-95 < 96-05		76-85 = 86-95 > 96-05				66-75 < 76-85 < 86-95 < 96-05
Sep	76-85 < 86-95 = 96-05	76-85 = 86-95 < 96-05	76-85 < 86-95 = 96-05	76-85 = 86-95 < 96-05						66-75 T° menor al resto de las décadas; 76-85 < 86-95
Oct	76-85 < 86-95 < 96-05		76-85 = 86-95 < 96-05	76-85 = 86-95 < 96-05						66-75 < 76-85 > 86-95; 76-85 < 96-05
Nov	76-85 < 86-95 = 96-05	76-85 = 86-95 < 96-05	76-85 < 86-95 < 96-05	76-85 = 86-95 < 96-05					76-85 = 86-95 < 96-05	66-75 < 76-85 > 86-95; 76-85 < 96-05
Dic	76-85 < 86-95 = 96-05	76-85 = 86-95 < 96-05			76-85 = 86-95 < 96-05					66-75 < 76-85 > 86-95; 76-85 < 96-05

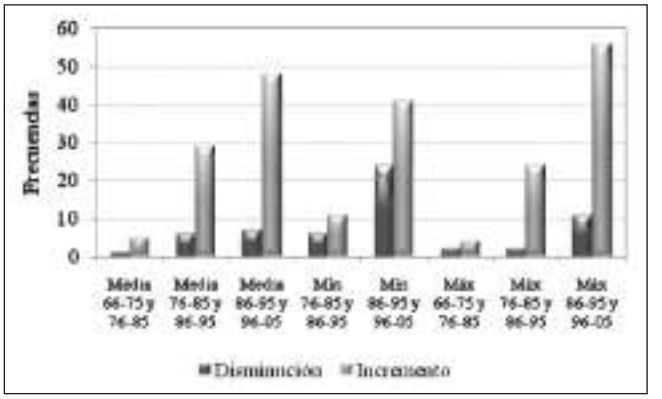


Figura 5. Frecuencia de cambios significativos entre décadas para las temperturas media, mínima y máxima.

De otro lado, para el período de estudio se reconoce un crecimiento importante de la población junto con el del número de viviendas en las diferentes localidades de Bogotá. Tal como se observa en la figura 6, la ciudad ha experimentado un crecimiento poblacional aproximadamente lineal durante los últimos 60 años, con una tasa cercana a 124.000 habitantes por año, mientras que el número de viviendas ha crecido exponencialmente a una tasa anual aproximada de 5,2%. En tanto la primera variable crece de forma constante, la segunda se incrementa cada año respecto al año anterior, condición que denota la fuerte importancia que ha tenido el proceso de urbanización en los cambios del suelo de la ciudad y su periferia.

Cabe notar que las localidades de Suba, Engativá, Fontibón, Barrios Unidos, Santa Fe, Kennedy y Ciudad Bolívar, muestran todas incrementos agudos de la urbanización a partir de 1993, en tanto Chapinero exhibe un proceso relativamente constante desde la década de los 70. Por lo anterior, puede decirse que salvo esta última localidad (con

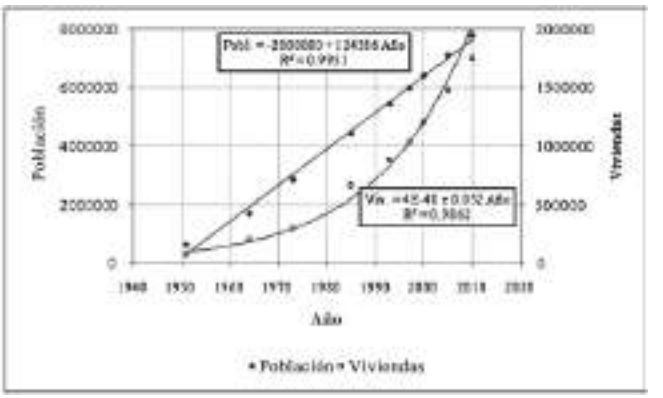


Figura 6. Crecimiento de la población y del número de viviendas durante el período 1951-2010.

presencia de la Estación de la Universidad Pedagógica), el proceso de urbanización se ha dado de forma aproximadamente exponencial en las estaciones meteorológicas restantes, por lo que no hay un factor diferencial incidente de esta variable alrededor de los resultados encontrados.

Conclusiones

Esta investigación ha evaluado de manera rigurosa los cambios de temperatura ocurridos en la ciudad de Bogotá durante cerca de cuatro décadas. La temperatura del aire en la ciudad al igual que en muchas otras ciudades del mundo, muestra gradientes espaciales así como tendencias temporales diversas que incluyen además, ciclos estacionales.

En tal sentido, se ha encontrado que la parte interna de la ciudad exhibe una temperatura aproximada de 3ºC superior a la de la periferia como resultado de la presencia de construcciones e interacciones urbano-urbano en la primera, frente a interacciones urbano-rurales y un mayor componente vegetal en la segunda. Se evidencia entonces, presencia de una isla de calor que se expande no sólo por el centro de la ciudad sino que ha alcanzado el norte y el occidente de la misma.

En lo atinente al tiempo, se reconoce por un lado el ciclo anual que rige a esta variable con los meses más cálidos durante Abril, Mayo y Junio, y los más fríos durante Julio, Agosto y Septiembre; por el otro, se observan tendencias de aumento y reducción de la temperatura que se prolongan por algunos años o incluso décadas y que superan a los efectos del Fenómeno del Niño. Se reconoce de manera particular, incremento en la temperatura del aire durante la última década que no logra explicarse de forma suficiente en el proceso de urbanización, pues éste ha mostrado un comportamiento exponencial a una tasa relativamente constante (5,2%) durante los últimos 50 años, en tanto la temperatura ha mostrado tendencias tanto de aumento como de reducción.

Al respecto, las tendencias positivas y negativas más fuertes en la temperatura del aire se manifiestan en las estaciones meteorológicas ubicadas en la periferia de la ciudad, lo que denota un efecto de amortiguación en las zonas céntricas generado por las propiedades térmicas de los materiales que predominan en vías y construcciones.

Este estudio no llega a dilucidar cuánto del incremento de la temperatura del aire durante la última década, ocurre como resultado de la isla térmica urbana que viene en aumento producto de la re-densificación de la ciudad y cuánto obedece a cambios globales de la temperatura.

Bibliografía

Al-Fahed, S., Al-Hawaj, O., Chakroun, W. 1997. The recent air temperature rise in Kuwai. Renewable Energy, 12(1): 83-90.

Alcaldía Mayor de Bogotá. 2000. Plan de ordenamiento territorial de Bogotá (POT). Departamento Administrativo de Planeación Distrital, Bogotá.

_____. 2007. Red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá D.C. Informe anual de calidad del aire de Bogotá, Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá.

_____. 2010. www.bogota.gov.co.

Amaya, C. 2005. El ecosistema urbano: Simbiosis espacial entre lo natural y lo artificial. Revista Forestal Latinoamericana, 17: 1-16.

Bello, V. 1995. La isla de calor nocturna y los usos del suelo en Alcalá de Henares. Anales de Geografía de la Universidad Complutense, 15: 119-130.

Chatterjee, S., Price, B. 1977. Regression analysis by example. Wiley, New York.

Chen, X. L., Zhao, H.M., Li, P.X., Yin, Z.Y. 2006. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. Remote Sensing of Environment, 104: 133-146.

DANE. 2005. Censos nacionales de población 1973, 1985, 1993 y 2005. Subdirección de Desarrollo Social, Área de Desarrollo Social. Bogotá.

Drapper, N.R., Smith, H. 1981. Applied Regression Analysis. 2a Ed. Wiley, New York.

Druzhinin, I.P., Konovalenko, Z.P., Kukushkina, V.P., Khamianova, N.V. 1966. Escorrentía fluvial y procesos geofísicos (Relaciones, ciclos y predicción). Editor T.L. Zolotarev. Izdatieltsvo Nauka, Moscow.

Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N., Snyder, P.K. 2005. Global consequences of land use. Science, 309: 570-574.

Fung, W.Y., Lam, K.S., Hung, S.W., & Lee, Y.L. 2006. Impact of urban temperature on energy consumption of Hong Kong. Energy, 31: 2623-2637.

Givoni, B. 1998. Climate considerations in building and urban design. John Wiley & Sons, Inc. United States of America.

Gonzalez, J.E., Luvall, J.C., Rickman, D., Comarazamy, D., Picon, A., Harmsen, E., Parsiani, H., Vasquez, R.E., Ramirez, N., Williams, R., Waide, R.W. 2005. Urban heat islands developing in coastal tropical cities. EOS, Transactions, American Geophysical Union, 86: 397-403.

Grimmond, S. 2007. Urbanization and global environmental change: Local effects of urban warming. Environmental Monitoring and Modeling Group, Department of Geography, King's College London, Strand, London WC2R 2LS.

Huang, L., Li, J., Zhao, D., Zhu, J. 2007. A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China. Building and Environment. doi:10.1016/j.buildenv.2006.11.025.

IDEAM. 2002. Efectos naturales y socioeconómicos del Fenómeno del Niño en Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, República de Colombia. Bogotá.

IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. 2001. Cambio climático 2001. La base científica. Tercer informe de evaluación. Ginebra, Suiza.

_____. 2002. Cambio climático y biodiversidad. Documento técnico V del IPCC. H. Gitay, A. Suárez, R.T. Watson, D.J. Dokken (Eds.). Ginebra, Suiza.

Jiménez, A. M. 2002. Crecimiento urbano en Bogotá – Expansión o densificación. Tesis de Grado de la Maestría en Planeación Urbana y Regional. Fac. Arquitectura, Pontificia Universidad Javeriana.

Johnson, R.A., Wichern, D.W. 1982. Applied Multivariate Statistical Analysis. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

Jusuf, S.K., Wong, N.H., Hagen, E., Anggoro, R., Hong, Y. 2007. The influence of land use on the urban heat island in Singapore, Habitat International, 31: 232-242.

Kendall, M.G. 1975. Multivariate analysis. Hafner Press, New York.

Landsberg, H. E. 1981. The urban climate. Academic Press, Nueva York.

León, G. 1998. Variabilidad y tendencia de la temperatura del aire en las cuatro principales ciudades de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM-, Subdirección de Meteorología, Bogotá.

Makar, P.A., Gravel, S., Chirkov, V., Strawbridge, K.B., Froude, F., Arnold, J.,Brook, J. 2006. Heat flux, urban properties, and regional weather. Atmospheric Environment , 40:2750-2766.

Montealegre, J. E. 1979. Análisis estadísticos de algunos parámetros meteorológicos en Bogotá. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras –HIMAT–, Bogotá.

_____. 1990. Pronóstico climatológico del estado del tiempo en Bogotá. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras –HIMAT–, Bogotá.

Naciones Unidas. 2001. World urbanization prospects, The 1999 Revision. New York: United Nations.

_____. 2004. World urbanization prospects: the 2003 Revision. http://www.un.org/esa/population/publications/wup2003/2003wup.htm.

Olgyay, V. 1998. Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Editorial Gustavo Gili, Barcelona.

Oke, T. R. 1989. The micrometeorology of the urban forest. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B, 324: 335-349.

Pabón, J. D., Pulido, S. I., Jaramillo, O., Chaparro, J. 1998. Análisis preliminar de la isla de calor en la Sabana de Bogotá. Revista Cuadernos de Geografía, VII, No. 1-2. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geografía.

Preciado, J., Leal, R., Almanza, C. 2005. Historia ambiental de Bogotá, Siglo XX elementos históricos para la formulación del medio ambiente urbano. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico, Bogotá.

Saylor, D., Muñoz, J. 1997. Sensitivity of electricity and natural gas consumption to climate in the U.S.A.: Methodology and results for eight states. Energy, 10: 987-998.

Sheskin, D.J. 2003. Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures. Chapman & Hall, Florida.

Sokal, R.R., Rohlf, F.J. 2000. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research. Freeman, New York.

Svirejeva-Hopkins, A., Schellnhuber, H.J., Pomaz, V.L. 2004. Urbanised territories as a specific component of the Global Carbon Cycle. Ecological Modelling, 173: 295-312.

Valor, E., Caselles, V., Coll, C., Sánchez, F., Rubio, E., Sospedra, F. 2000. Análisis comparativo del efecto de isla térmica de la ciudad de Valencia con imágenes TM, MUST y AVHRR. Revista de Teledetección, 14.

Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco, J., Melillo, J. M. 1997. Human domination of earth's ecosystems. Science, 277: 494.

Wong, N., Yu, C. 2005. Study of green areas and urban heat island in a tropical city. Habitat International, 29: 547-558.

Zar, J.H. 1984. Biostatistical analysis. Prentice-Hall, USA.

Recibido: mayo 27 de 2010.

Aceptado para su publicación: junio 1 de 2010.

COMPARACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE ESPUMAS CON BASE POLIOLEFINA, OBTENIDOS EN ENSAYOS DE COMPRESIÓN E INDENTACIÓN POR CAÍDA DE DARDO. CURVAS DE AMORTIGUAMIENTO DINÁMICO

Por

O. A. Almanza[*1], J. G. Carriazo[2], M. A. Rodríguez, Pérez[3] & J. A. de Saja[3]

Resumen

O. A. Almanza, J. G. Carriazo, M. A. Rodríguez, Pérez & J. A. de Saja: Comparación del módulo de elasticidad de espumas con base poliolefina, obtenidos en ensayos de compresión e indentación por caida de dardo. Curvas de amortiguamiento dinámico. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (131): 185-192, 2010. ISSN 0370-3908.

Se realizó una serie de experimentos en caída de dardo (impacto) con el objeto de cuantificar la capacidad de absorción de energía, antes de producirse un fallo por fractura, de un conjunto de espumas con base poliolefina. Se determinó la resistencia a la fractura $s_{máx}$, la tenacidad y las curvas de amortiguamiento dinámico, donde se representa el pico de desaceleración G para cada muestra en función del esfuerzo estático aplicado. En estas curvas es posible establecer tres regiones asociadas con explicaciones físicas diferentes, que permiten establecer la zona óptima de trabajo de estos materiales en condiciones particulares de uso. La rigidez de las espumas estudiadas crece con la densidad de los materiales. A partir de los ensayos es posible inferir que el mecanismo que contribuye apreciablemente al módulo de elasticidad obtenido en ensayos de indentación está relacionado con el estiramiento de las paredes de las celdas del material. Los módulos de elasticidad medidos en los ensayos de indentación resultaron ser casi independientes del diámetro del dardo. Los módulos de elasticidad obtenidos en ensayos de indentación son menores que los estimados en ensayos de compresión.

Palabras clave: caracterización de espumas, espumas de poliolefina, propiedades mecánicas de materiales, curvas de amortiguamiento dinámico, indentación.

1 Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

2 Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

3 Departamento de Física de la Materia Condensada, Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid (España).

* A quien la correspondencia debe ser enviada: Correo electrónico: oaalmanzam@unal.edu.co

Abstract

A series of experiments of dart fall (impact tests) were developed in order to quantify the capacity of absorbing energy on a set of foam materials based on polyolefin structure, prior to a fracture failure can be occurred,. Foams were produced by a process of nitrogen dissolution at high pressure. Fracture strength ($s_{máx}$), tenacity and dynamic cushioning curves, representing the deceleration peak (G) for each sample as a function of the applied static stress, have been determined. On these curves it is possible to establish three regions associated with different physical explanations to give the optimal work zone to be used in particular conditions. The rigidity of these foams increases with the density of materials. From the developed tests it is possible to suppose that stretching of cell walls is a determining aspect in the mechanism to obtain the modulus of elasticity observed by the indentation experiments. The elasticity modules measured by indentation almost were independent of the dart diameter. These elasticity modules are lesser than those estimated by compression tests.

Key words: characterization of foams, polyolefin foam, mechanic properties of materials, dynamic cushioning curves, indentation.

1. Introducción

Las espumas poliméricas son ampliamente usadas en aplicaciones de absorción de energía, como en el caso de los sistemas de protección contra accidentes, atenuación de traumas en equipos avanzados de protección balística y de protección contra ondas de explosiones (**Ouellet *et al.,*** 2006). Con el paso de los años, las poliolefinas espumadas han mostrado mayor eficiencia y adaptabilidad a necesidades específicas. Entre ellas, su respuesta a solicitudes mecánicas es esencial en muchas de sus aplicaciones. Por esta razón, una parte de la investigación se ha dirigido hacia el análisis de la respuesta mecánica de estas espumas. Ello se ha realizado, desde el punto de vista experimental, usando dos técnicas diferentes, directamente relacionadas con aplicaciones distintas de estos materiales: experimentos en compresión a bajas velocidades de deformación y los ensayos de impacto por caída de dardo (peso) del cual nos ocuparemos en este artículo.

Las espumas de poliolefinas son materiales viscoelásticos y debido a esa razón sus propiedades mecánicas en general, y su resistencia al impacto en particular, dependen fuertemente de las condiciones de experimentación. Para establecer unas condiciones particulares de medida nos hemos centrado en una de sus aplicaciones de interés tecnológico. Esta ha sido su utilización como material de embalaje (**Ozturk y Anlas,** 2009; **Marsavina y Sadowski,** 2008; **Ruiz-Herrero *et al.,*** 2005; **Lye *et al.,*** 2004; **Lye y Chuchom,** 1997). En esta línea, existen trabajos previos realizados sobre algunas espumas a base de polímeros (**Ozturk y Anlas,** 2009; **Ruiz-Herrero *et al.,*** 2005; **Loveridge *et al.,*** 1991; **Mills *et al.,*** 1989), investigaciones en las que se ha recurrido a un cabezal (dardo) plano instrumentado, para así tener información instantánea de las fuerzas y deformaciones experimentadas por la muestra durante la compresión con el dardo. Es un ensayo interesante que suministra información suficiente en determinadas aplicaciones. No obstante, este tipo de medida no toma en cuenta que los impactos son a menudo causados por un elemento agudo más pequeño que la muestra, donde más que deformación de compresión se debería hablar de indentación.

El objetivo del presente artículo es establecer la resistencia a la fractura $s_{máx}$, la tenacidad K_{IC} y el módulo de elasticidad E_f de un conjunto de espumas con base poliolefina, de interés industrial y comercial, mediante determinación del nivel de esfuerzo trasmitido en cada instante cuando un dardo se deja caer sobre cada una de ellas. Adicionalmente, este artículo constituye un material complementario para el estudio y aprendizaje de las propiedades mecánicas de materiales, dentro del contexto de un curso de Ciencia de Materiales (**Carriazo,** 2009).

2. Aspectos teóricos

Resistencia a la fractura y tenacidad: las propiedades de resistencia al impacto dependen de factores como la velocidad de impacto, la temperatura, la presencia de discontinuidades o entallas, la orientación del polímero base, el grado de cristalinidad, el posicionamiento de las probetas, la historia mecánica, la presencia de aditivos, entre otros. Ello hace, una vez más, que sea muy complejo caracterizar y, sobre todo comprender la denominada **tenacidad**, habilidad de los materiales para absorber energía antes de producirse un fallo por rotura (fractura) (**Velasco *et al.,*** 2000; **Rodríguez-Pérez *et al.,*** 1999; **Velasco *et al.,*** 1998).

La aplicación del denominado análisis estático (**Casiraghi *et al.,*** 1988) permite, a partir de los datos registrados, obtener los valores de resistencia a la fractura y tenacidad de las espumas en estudio. Las ecuaciones base del análisis estático son los siguientes:

$$a(t) = \frac{F(t) - P}{m} \quad (1.a)$$

$$v(t) = v_0 - \int_0^t \frac{F(t') - P}{m} dt' \quad (1.b)$$

$$x(t) = \int_0^t \left(v_0 - \int_0^t \frac{F(t') - P}{m} dt'\right) dt' \quad (1.c)$$

$$E(t) = \int_0^t F(t') \left(v_0 - \int_0^t \frac{F(t') - P}{m} dt'\right) dt' \quad (1.d)$$

En estas ecuaciones F, x, v, a y E representan la fuerza, desplazamiento, velocidad, aceleración y energía en cada al instante, respectivamente. P es el peso y m es la masa efectiva del dardo.

La tenacidad de las muestras, puede ser evaluada como la energía perdida por el dardo hasta que se alcanza la deformación máxima dividida por el volumen principal de muestra involucrado en la fractura (área transversal del dardo multiplicada por el espesor de la muestra) (**Rodríguez-Pérez *et al.,*** 1999), esto es:

$$\text{Tenacidad } (K)_C = \frac{E_{max} - E_0}{\pi r^2 Z} \quad (2)$$

$E_{máx}$ es la energía del dardo cuando la fuerza sobre él es máxima, E_0 es la energía del dardo justo antes de la colisión, su valor depende de la altura de caída del dardo, r es el radio del dardo y Z el espesor de la muestra. Es de reseñar que se ha supuesto que la energía perdida por el dardo hasta que se experimenta la deformación máxima, es igual a la energía absorbida por la espuma en la fractura.

En el mismo experimento es posible obtener la resistencia a la fractura como el valor del esfuerzo máximo obtenido a partir de la ecuación para platos flexados (**Timoshenko y Woinwsky – Krieger,** 1984):

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{Z^2}(1-\nu)\left(0.485 \log\frac{a}{Z} + 0.52\right) \quad (3)$$

expresión en la cual F_{max} es la fuerza máxima, Z el espesor de la muestra, *a* es el radio interno de los anillos de sujeción, y n es el coeficiente de Poisson de la muestra. Se utilizó un valor de n = 0.1 para todas las espumas estudiadas.

Indentación: el fenómeno de indentación tiene lugar cuando colisiona un objeto con menor sección de impacto que el objeto contra el cual impacta. Un modelo de indentación fue esbozado por **Greszczuk** (1982) quien describe el fenómeno de indentación de un pequeño elemento hemisférico sobre un material. Este modelo ha sido utilizado con éxito para analizar la respuesta mecánica de espumas en ensayos de impacto por caída de dardo (**Velasco *et al.,*** 2000; **Rodríguez-Pérez *et al.,*** 1999; **Velasco *et al.,*** 1998). Esencialmente consiste en considerar un dardo hemisférico (impactador) que colisiona contra un material extenso e isotrópico (llamado material blanco o probeta).

Resultados obtenidos por **Rayleigh** (1906), muestran que si el tiempo de contacto entre el impactador y el blanco es muy grande en comparación con sus períodos naturales, las vibraciones del sistema pueden ser despreciadas. En estas condiciones puede asumirse la ley de Hertz (**Hertz y Reine,** 1881):

$$F = n\alpha^{3/2} \quad (4)$$

donde es la profundidad de penetración elástica y el término n viene definido como:

$$n = \frac{4\sqrt{R_1}}{3\pi(k_1 + k_2)} \quad (5)$$

siendo R_1 el radio del impactador o indentador hemisférico y k_1 y k_2 la rigidez del dardo y el blanco respectivamente. Estos dos parámetros son definidos en el modelo como:

$$k_1 = \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1} \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2} \quad (7)$$

ecuaciones en las cuales E es el módulo elástico n el coeficiente de Poisson y los subíndices 1 y 2 se refieren al impactador o dardo y al blanco o probeta respectivamente.

La fuerza máxima soportada por la probeta y el tiempo de contacto entre el dardo y ésta pueden escribirse como:

$$F_{max} = n^{2/5}\left(\frac{5v_0^2}{4M}\right)^{3/5} \quad (8)$$

$$t_o = 2.94\frac{\alpha_0}{v_0} = 2.94\left(\frac{5}{4Mnv_0^{3/2}}\right)^{2/5} \quad (9)$$

Amortiguamiento: por otro lado, cuando un objeto cayendo se mueve hacia la tierra con una aceleración constante (g) debida a la fuerza gravitatoria, para llevar este objeto al reposo, dentro de una distancia menor que la altura desde la cual ha caído, se requiere una aceleración negativa superior a la de la gravedad. Un adecuado material amortiguador es aquel que asegura que haya suficiente distancia para que el objeto sea llevado al reposo y al mismo tiempo suministre la fuerza de desaceleración necesaria para ello (material amortiguador hace referencia al material utilizado para embalar o empacar un objeto; es el material blanco o probeta utilizada en los ensayos de impacto).

La máxima aceleración que puede ser aplicada a un objeto dado sin causarle daño es conocida como factor de fragilidad G; por ejemplo, un objeto con un factor de fragilidad de 50 soportará una desaceleración de 50 veces la debida a la gravedad. El factor de fragilidad de un objeto obviamente debe ser conocido antes de diseñar un embalaje para él. El factor de fragilidad se determinó a partir de la relación:

$$G = F_{máx}/m.g. \quad (10)$$

A título de ejemplo, en la tabla 1 se muestran diferentes valores de G correspondientes a diversos objetos genéricos (**Zotefoams Ltda.,** 1992).

El objetivo entonces de todo material destinado al embalaje o protección, es absorber la energía cinética del objeto empacado mientras mantiene la fuerza trasmitida por debajo del límite del cual le causa daño. Varios esquemas han sido sugeridos para caracterizar la absorción de energía en espumas (**Gibson y Ahsby,** 1988), los cuales dan una guía para hacer la mejor elección de un material particular. Determinaremos aquí las llamadas curvas de amortiguamiento dinámico.

3. Aspectos experimentales

Para ensayos a rotura se cortaron muestras cilíndricas de 8 cm de diámetro y espesor Z (tabla 2). La muestra se fijó mediante un sistema de anillos de 60 y 80 mm de diámetro interno y externo respectivamente Se eligieron condiciones extremas de rotura compatibles con el equipo, es decir la mayor masa de dardo (3.743 kg) y el cabezal de menor diámetro (12.7 mm). La altura de caída fue de 0.99 m, máxima longitud disponible en el equipo.

Con las condiciones previas se alcanza una velocidad de impacto de 4.4 m/s lo que para una muestra de 25mm de espesor equivale a una velocidad de deformación de 168 s^{-1}. En las citadas condiciones se comprobó que el dardo perforaba las espumas, siendo despreciables los efectos dinámicos y el porcentaje de energía perdida por el impactador (inferior al 5%).

Para los ensayos de rebote en indentación se cortaron diez (10) muestras, aleatoriamente distribuidas en cada plancha de espuma, con dimensiones de 8cm x 8cm x Z. Con la muestra situada sobre una placa de acero de igual dimensión que las muestras, se dejó caer el cabezal hemisférico de 12.7 mm de diámetro y masa 0.743 kg. Las alturas ensayadas fueron situadas entre 13 y 30 mm. Estas condiciones experimentales implican velocidades de impacto (v_o) entre 0.5 m/s y 0.77 m/s y velocidades de deformación entre 20 s^{-1} y 30.8 s^{-1}. Los valores característicos del dardo fueron: $k_1 = 1.38\ 10^{-6}$ N/mm^2, $\nu_1 = 0.3$ y $E_1 = 2.1\ 10^5$ N/mm^2. El coeficiente de Poisson de la espuma se tomó $\nu_2 = 0.1$.

Los ensayos para determinar las curvas de amortiguamiento se determinaron con las muestras situadas sobre una placa de acero de igual dimensión que ellas y se realizaron ensayos de impacto con distintas masas de dardo, desde una altura fija de 7.5 cm. La masa del dardo varió entre 0.743 kg y 3.743 kg. Estas masas y la altura de indentación elegida permitieron operar en un rango de energías de impacto de 0.56 J a 2.76 J y un rango de esfuerzo estáticos ($m/\pi R^2$) entre 0.25 y 0.81 kgf/cm^2; R es el radio del dardo y m su masa.

Tabla 1. Factores de fragilidad de algunos objetos genéricos (Zotefoams Ltda., 1992).

Factor de fragilidad G.	Tipo de objetos
Hasta 40g	Portadores de discos duros, equipos electrónicos delicados.
40-60g	Monitores de ordenador, impresoras, máquinas de escribir electrónicas
60-80g	Equipos de audio y televisión, portador de discos suaves (disquetes).
80-100g	Electrodomésticos del hogar y hornos.
100-120g	Radiadores, herramientas para maquinaria, máquinas de coser, equipos industriales en general.

Tabla 2. Características básicas de las espumas ensayadas en impacto. r_f es la densidad de la espuma, ϕ es el tamaño medio de poro. *indica un material obtenido con catalizadores metalocénicos. LDPE = low density polyethylene, LDPE = High density polyethylene, EVA = Ethylene Vinyl Acetate Copolymer. MP = Metallocene low density polyethylene foams.

Espumas	Composición Química	ρ_f (kg/m^3)	Espesor Z (mm)	ϕ(μm)
LD15	LDPE 100 %	16.4	25	296.5
LD18		22.1	25	892.6
LD24		22.3	25	294.8
LD29		30.3	25	448.7
LD33		31.7	25	388.8
LD45		42.7	25	429.3
LD60		55.0	20	545.9
LD70		70.0	12	542.7
HL34	50%LDPE	34.2	25	954.2
HL47	– 50% HDPE	42.9	25	677.2
HL79		80.4	22	1038.4
HD30	HDPE	27.2	23.5	609.1
HD60		51.9	23.5	761.4
EV50	EVA(18%VA)	44.2	25	166.9
VA25	EVA (9%VA)	23.1	25	304.6
VA35		34.2	25	725.8
VA65		59.0	10	356.4
MP24	LDPE*	23.7	25	479.5
MP45		41.8	25	374.2

Todos los ensayos se realizaron en un equipo DARTVIS (CEAST TORINO). Las muestras fueron amablemente suministradas por Z foams ltda y fueron fabricadas mediante un proceso de disolución de nitrógeno a alta presión.

4. Resultados

Fractura y Tenacidad. Una curva típica registrada por el equipo en los ensayos de rotura se muestra en la figura 1. A partir de ella puede determinarse la fuerza máxima soportada por el dardo $F_{máx}$ (aproximadamente igual a la soportada por la espuma), el tiempo en el que la fuerza es máxima ($t_{máx}$) y el tiempo de contacto (t_c). Las ecuaciones del análisis estático 1a-d (**Mills y Hawng,** 1989) permiten obtener las energías del dardo en los tiempos t = 0 (instante de la colisión), $t = t_{máx}$ (el punto de fuerza máxima) y en un tiempo $t = t_c$, así como las correspondientes velocidades en estos tiempos.

A partir de estos datos y de las ecuaciones 2 y 3 se puede determinar la tenacidad de las muestras y la resistencia a la rotura ($\sigma_{máx}$). Los resultados para estas magnitudes están ilustrados en las figuras 2 y 3 en función de la densidad de los materiales.

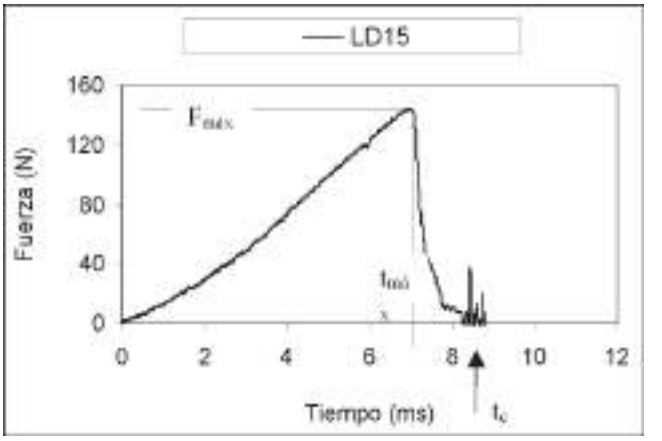


Figura 1. Curva típica registrada por el equipo de impacto cuando se realizan ensayos a rotura. Espuma LD15.

En las figuras 2 y 3 se puede apreciar que para una misma familia de espumas, la resistencia y la tenacidad de las muestras se incrementa con la densidad. Esto puede ser explicado si se tiene en cuenta que las muestras más densas tienen "paredes de celda" (paredes de las cavidades) más gruesas (**Almanza *et al.*,** 2001) y ello ha de implicar un mayor trabajo hasta la rotura. Otros factores como la reología de las muestras y la flexibilidad de la fase amorfa de estos materiales pueden también tener influencia sobre las propiedades a la rotura y tenacidad en las muestras. Las líneas que unes puntos de una misma familia de espuma debe mirarse como una guía óptica y no como una tendencia o interpolación entre puntos.

Las espumas MP (espumas de polietileno de baja densidad, obtenidas con catalizadores metalocénicos) aún cuando están basadas en PE (polietileno) difieren del

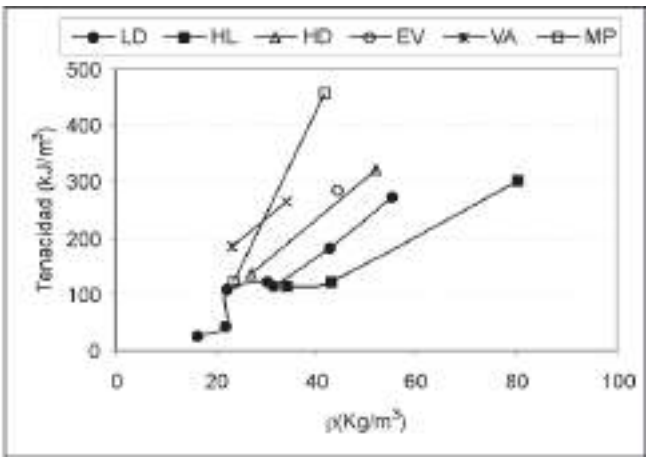


Figura 2. Tenacidad K_{IC} de las espumas estudiadas.

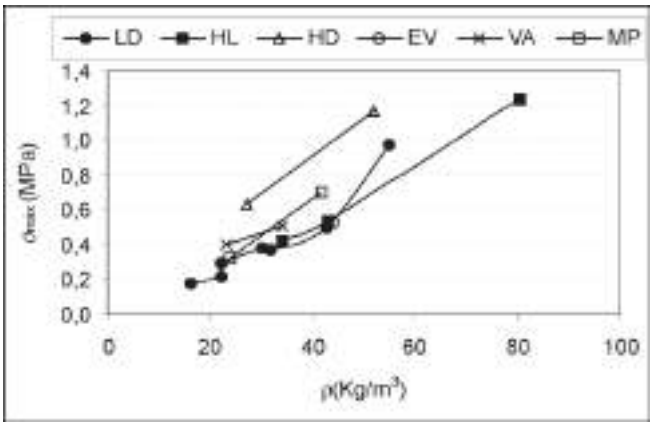


Figura 3. Resistencia a la rotura $s_{máx}$, de todas las espumas estudiadas (LD, HD, HL, EV, VA, MP).

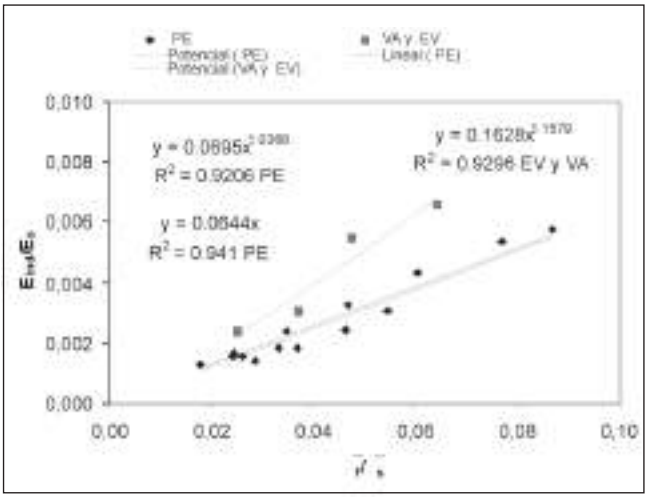


Figura 4. Módulo de elasticidad relativo de las espumas estudiadas frente a la densidad relativa. PE involucra a las espumas LD, MP, HL y HD. E_{ind} es el módulo de elasticidad de las espumas obtenidas en indentación; E_s es el módulo de elasticidad del polímero sólido, r_f es la densidad de la espuma y r_s es la densidad del polímero sólido.

comportamiento de estas últimas. Esto puede deberse al distinto proceso en la obtención de este material (utilizado catalizador metalocénico), que da mayor flexibilidad a sus cadenas moleculares y en consecuencia distintas características al impacto. El comportamiento de las muestras MP al impacto a rotura, se asemeja más al comportamiento de las espumas basadas en EVA, que también parecen seguir un comportamiento lineal con la densidad, aunque con una pendiente distinta.

Indentación. Un ajuste potencial de los valores E_{ind}/E_s con la densidad relativa de los materiales (ρ_f/ρ_s) ha sido representado en la figura 4. A partir de esta figura se puede establecer que el exponente n de la ecuación (11) toma valores iguales a 1.037 y 1.158 para las espumas basadas en PE y las basadas en EVA respectivamente:

$$\frac{E_{ind}}{E_s} = A\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)^n \qquad (11)$$

Estos valores de n son muy similares para los dos conjuntos de espumas, lo que indica que los mecanismos que contribuyen al módulo de elasticidad obtenido en ensayos de indentación, son similares para los dos tipos de materiales químicamente diferentes. Además el valor obtenido para n es próximo a 1, lo que establece una dependencia casi lineal entre E_{ind} y ρ_f/ρ_s. Esto implica que el mecanismo de mayor influencia en el módulo de elasticidad, obtenido en ensayos de indentación, es el estirado de las paredes de las celdas. Lo anterior es una consecuencia de la geometría de los ensayos; el dardo penetra en la espuma y esta se curva localmente formando un arco alrededor del dardo. El ajuste lineal entre E_{ind} y (ρ_f/ρ_s) se muestra en la figura 4.

Cuando se compara el módulo de elasticidad determinados en los experimentos de compresión con los determinados en ensayos de impacto, se observa que estos últimos son de menor magnitud. Lo anterior es debido a que en ensayos en compresión, a bajas velocidades de deformación, tanto el estirado de las paredes como la flexión de las aristas contribuyen a la rigidez del material en forma significativa. No ocurre lo mismo en ensayos en indentación donde ya se dijo que la mayor contribución era debido al estirado de las paredes de las celdas.

Curvas de amortiguamiento dinámico. La figura 5 es una representación de los datos experimentales de amortiguamiento dinámico para la espuma LD18. A partir de esta figura se pueden establecer tres regiones, asociadas con explicaciones físicas distintas.

Cuando un objeto muy liviano se deja caer sobre una espuma (material amortiguador), no aporta la fuerza suficiente como para hacer que la espuma se deforme. Por lo tanto, esta se comportará como una superficie rígida y el objeto experimentará una alta desaceleración, como aparece en el lado izquierdo de la curva de amortiguamiento (figura 4 Zona MN). En esta línea de razonamiento, si un objeto más pesado es dejado caer sobre la misma espuma, causa una gran deformación. En este caso, el choque ocurre durante un mayor tiempo y el objeto experimenta una menor desaceleración; corresponde a la situación representada en la porción central de la curva (Zona NP, es la llamada zona óptima de trabajo de la espuma,). Finalmente,

si un objeto extremadamente pesado se deja caer sobre la espuma, esta se deformará tanto que el objeto continuará hasta tocar con la superficie sobre la cual está apoyada la espuma y el objeto experimentará una alta desaceleración (lado derecho de la curva en la figura 4, Zona PQ).

Para las demás espumas cuando la densidad del material se incrementa el mínimo en la curva se desplaza hacia valores más altos en el esfuerzo. Esto es lógico si tenemos en cuenta las consideraciones físicas explicadas anteriormente y el hecho de que espumas más densas tienen paredes celulares más gruesas y por consiguiente necesitan un mayor esfuerzo para deformarse.

5. Conclusiones

El módulo de elasticidad de espumas con base poliolefinas es mayor cuando este es obtenido en ensayos de compresión que para los obtenidos en ensayos de indentación. Lo anterior es debido a que el único mecanismo de influencia en la deformación de las espumas, en

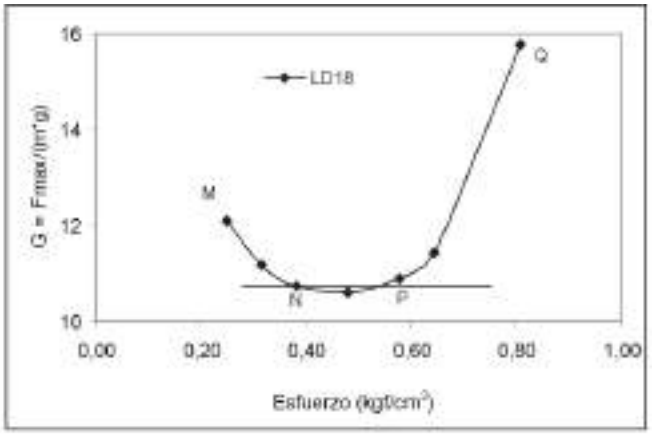


Figura 5. Curva de amortiguamiento para la espuma LD18. La altura de caída del dardo fue de 7.5 cm.

ensayos de indentación, parece ser el estirado de las paredes de las celdas. Lo anterior es importante tener en cuenta cuando se quiera diseñar un embalaje con estos materiales, para una aplicación particular.

Se han determinado las curvas de amortiguamiento dinámico de muestras con base poliolefina.

6. Referencias

Almanza O., Rodríguez-Pérez M. A., de Saja J. A. 2001. The microstructure of polyethylene foams produced by a nitrogen solution process. Polymer, 42, 7117-7126.

Carriazo, J. G. 2009. Introducción a la Ciencia de los Materiales (Código: 1000040)-Programa de asignatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Casiraghi, T., Castiglioni, G., Ronchetti, T. 1988. Fracture mechanics of polymers. Critical evaluation for linear elastic behaviour at high speed testing. J. Matter. Sci., 23, 459-466.

Gibson, L. J., Ahsby, M. F. 1988. "Cellular Solids: Structure and Properties", Pergamon Press, Oxford, p. 217, England.

Greszczuk, L. B. 1982. In "Impact Dynamics", edited by Greszczuk, L. B., Zukas, J. A., Nicholas, T., Swift, H. F.; Curran, D.R.; (John Wiley & Sons, New York), p. 55.

Hertz, H. 1881. On the contact of elastic solids. J. Reine Angew. Math., 92, 156-171. Translated and reprinted in English in Hertz¢s miscellaneous papers: Macmillan & Co., London, 1896.

Loveridge, P., Mills, N.J. 1991. The mechanism of the recovery of impacted high-density polyethylene foam. Cell. Polym., 10, 393-405.

Lye, S. W., Chuchom S. 1997. A neural predictive model for characterising impact cushioning curves. Engng. Applic. Artif. Intell., 10, 639-646.

Lye, S.W., Lee, S.G., Chew, B.H. 2004. Virtual design and testing of protective packaging buffers. Computers in Industry, 54, 209-221.

Marsavina, L., Sadowski, T. 2008. Dynamic fracture toughness of polyurethane foam. Polymer Testing, 27, 941–944.

Mills, N. J., Hwang, A. M. H. 1989. The multiple-impact performance of high density polyethylene foam. Cell. Polym, 9, 259-270.

Ouellet, S., Cronin, D., Worswick, M. 2006. Compressive response of polymeric foams under quasi-static, medium and high strain rate conditions. Polymer Testing, 25, 731-743.

Ozturk, U. E., Anlas, G. 2009. Energy absorption calculations in multiple compressive loading of polymeric foams. Materials and Design, 30, 15-22.

Rayleigh, L. 1906. On the production of vibration by forces of relatively long duration with the applications to the theory of collisions. Phil. Mag., 11[3], 283.

Rodríguez-Pérez, M. A., Velasco, J.I., Arencón, D., Almanza O., De Saja, J. A. 2000. Mechanical characterization of closed-cell polyolefin foams. J. Appl. Polym. Sci.,75, 156-166.

Ruiz-Herrero, J.L., Rodríguez-Pérez, M.A., de Saja, J.A. 2005. Design and construction of an instrumented falling weight impact tester to characterise polymer-based foams. Polymer Testing, 24, 641-647.

Timoshenko, S. P., Woinwsky – Krieger, S. 1984. "Theory of Plates and Shells"; McGraw-Hill: Tokyo, Japan.

Velasco, J. I., Martínez, A. B., Arencón, D., Rodríguez-Pérez, M. A., de Saja, J. A. 1999. Application of instrumented falling dart impact to the mechanical characterization of thermoplastic foams. J. Matter. Sci., 34, 431-438.

Velasco, J. I., Martínez, A. B., Arencón, D., Almanza O., Rodríguez-Pérez, M. A., De Saja, J. A. 2000. Rigidity characterization of flexible foams by falling dart rebound tests. Cell. Polym., 19,115-133.

Zotefoams Ltda. 1992. Cushioning Packaging Guide, Croydon, U. K.

Recibido: abril 19 de 2010.

Aceptado para su publicación: junio 2 de 2010.

¿QUÉ RAYOS SABEMOS?

Por

Horacio Torres-Sánchez*

Resumen

Torres-Sánchez H.: ¿Qué rayos sabemos? Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (131): 193-208, 2010. ISSN 0370-3908.

Este trabajo ha sido elaborado para la presentación como Miembro Correspondiente de la Academia Colombina de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Tiene un enfoque sobre la importancia del entendimiento de los fenómenos naturales como el rayo en las culturas milenarias y específicamente en las precolombinas, las cuales tenían otro lenguaje diferente al científico, pero igualmente válido para conocer y aplicar estos conocimientos. Y un segundo enfoque sobre los aportes que el grupo de investigación PAAS de la Universidad Nacional de Colombia ha hecho al entendimiento del fenómeno del rayo.

Palabras clave: rayos, ciencia, mitos.

Abstract

This work has been elaborated for the presentation as Corresponding Member of the Colombian Academy of Exact, Physics and Natural Sciences. It specifically has an approach on the importance of the understanding of the natural phenomena like the lightning in the millenarian cultures and in the pre-Columbian ones, which had another language different from the scientist, but equally valid to know and to apply these knowledge. And a second focuses on the contributions that the research group PAAS of the National University of Colombia has done to the understanding of the lightning phenomenon.

Key words: lightning, science, mythos.

1. Introducción

Es indudable que el conocimiento de los fenómenos naturales mediante lo que hoy en día llamamos ciencia, ha hecho fundamentales cambios en la vida humana moderna; pero el conocimiento e interpretación de tales fenómenos por culturas milenarias, como por ejemplo las indígenas precolombinas, no pueden ser subestimados a favor de la ciencia moderna. Dan Brown en su más reciente novela de ficción "El símbolo perdido" sostiene que "la clave

* Profesor Titular y Emérito de la UN. Miembro correspondiente de la ACCEFYN. Correo electrónico: htorress@unal.edu.co

de nuestro futuro científico se oculta en nuestro pasado". Nada más verdadero que ello para aplicarlo al conocimiento sobre el fenómeno del rayo. "El ser humano se hallará en el umbral de una nueva etapa cuando vuelva la mirada a la naturaleza y a las antiguas formas de hacer las cosas".

El ser humano ha buscado, a través de los tiempos y en diferentes culturas, transformar la energía disponible en la naturaleza; desde la fricción para obtener fuego, hasta la utilización intrínseca de la materia para obtener energía nuclear o viajar en busca de nuevos mundos. En esa búsqueda ha tratado de conocer la naturaleza y sus fenómenos, expresando ese conocimiento en diferentes lenguajes como el mítico, la iconografía, hasta el moderno de nuestros días llamado científico. En cualquier época sus aportes han sido fundamentales para entender el porque de las cosas de la naturaleza.

Las manifestaciones del fenómeno eléctrico fueron conocidas desde la cultura Acadia y griega con la interpretación del fenómeno del rayo y los escritos de Tales de Mileto sobre la piedra imán, respectivamente. Para la cultura occidental, fueron los trabajos sistemáticos realizados por los "electricistas" del siglo 18 los que dieron las bases para el nacimiento del moderno mito de la electricidad y los usos que hoy conocemos.

2. El fenómeno del rayo en las culturas precolombinas

La riqueza mitológica del fenómeno del rayo en las culturas indígenas precolombinas, está representada ejemplarmente en el libro del Popol Vuh, traducido al español de la lengua autóctona de los indios Quichés de Guatemala por el padre dominico Francisco Ximénez, a principios del siglo 18.

El Popol Vuh constituye una plena realidad viva, donde se encuentran todas las tradiciones milenarias de los Quichés.

Los dioses de la lluvia en la cultura Maya eran los Chacs y se conocían con el nombre de los regadores. Eran ellos quienes producían los relámpagos, los rayos, las tempestades, las tormentas y la lluvia. Cuando iban a llevar las lluvias, los Chacs se reunían en su morada que se llamaba "al pie del cielo", desde donde salían por una puerta llamada "trueno" que empezaba en la capa de las nubes. Con su jefe al frente atravesaban los cielos, cada uno con una calabaza de agua en una mano y en la otra algo parecido a una hacha de piedra bien pulida, la cual una vez lanzada sobre la tierra producía los rayos y los truenos; estos últimos originados por los gritos o los diálogos entre ellos. Los Chacs iban en las cuatro direcciones.

Un análisis moderno del significado de las invocaciones Mayas para la lluvia, muestra el conocimiento que parece ya tenían sobre la diferencia que actualmente se tiene entre rayos de nube a tierra y entre nubes, así como las relaciones no directas que hoy en día conocemos entre número de días con rayos y número de días con lluvia. Había meses y días especiales en que invocaban a los Chacs para la lluvia y en estas invocaciones utilizaban ciertos términos cuyo significado estaba relacionado con las lluvias. Por ejemplo: Lelemcaanchaac, "el dios de la lluvia látigo relampagueante...", Mizencaanchaac, "Rayo que barre el cielo..." y Lelencaanil, "tormenta de muchas nubes y poca agua".

Mediante los códices Mayas se puede apreciar la representación de un perro relámpago que lleva dos antorchas encendidas cuya representación es la tempestad. Estas dos antorchas pueden significar los dos tipos de rayos diferentes que ellos alcanzaban a apreciar.

Para la cultura Inca el dios del rayo era Ilyapa. En Cuzco, capital del imperio, existía el Coricancha, el templo del oro, en donde se encontraban los templos de las principales deidades: El sol Inti, la luna Quilia y el rayo Ilyapa. Y cada templo tenía su propio sacerdote. Sus interpretaciones míticas nos muestran hoy en día el conocimiento claro que tenían sobre la diferencia entre la energía lumínica (relámpago) y la energía audible (trueno) producida por el rayo. Ilyapa era un hombre ataviado con reluciente vestido que llevaba en una mano una porra y en la otra una honda. El relámpago era el fulgor que despedía su vestido al moverse, el trueno la descarga de su honda y el rayo el proyectil de piedra.

Para ellos los dioses vivieron en otros tiempos en la tierra y después subieron al cielo para confundirse con las estrellas. Entre ellas estaban las Pleyadas que representaban para los Incas una divinidad suprema que se manifestaba mediante el rayo y era capaz de devorar el sol o la luna. Durante la conquista española de América hubo ciertos relatos que hicieron que, arrogantemente y sin respeto por el conocimiento, al rayo se le llamara Santiago. He aquí uno de estos:

"Dicen que lo vieron a vista de ojos, avajo el señor Sanctiago, con un trueno muy grande, como rRayo cayo del cielo a la fortalesa de ynga y como cayo en tierra se espantaron los yndios y digeron que abia caydo yllapa, trueno y Rayo del cielo y anci bajo el señor Sanctiago a defender a los cristianos. Desto echo a uir los yndios entonses los yndios al rRayo les llama y le dize Sanctiago porque el sancto cayo en tierra como Rayo yllapa".

Después de la conquista española algunos indios continuaban haciendo culto a Ilyapa, pero esto era prohibido y castigado por los españoles con cárcel o trabajos forzados. Pero aún así, para los indios Ilyapa estaba presente en sus vidas y lo expresaban, por ejemplo en esta bella poesía quechua:

"bella princesa,
tu propio hermano
rompe
el vaso que llevas
entonces
luce un relámpago,
gruñe el trueno,
cae el Rayo.
tu, princesa,
nos das
tu lluvia
también, a veces, el granizo,
y la nieve".

3. Dos lenguajes y una verdad

Si bien la ciencia moderna nos ofrece hoy en día la posibilidad de conocer y entender los fenómenos de la naturaleza, la historia nos proporciona similares interpretaciones en otro lenguaje: el mítico. Un ejemplo de la interpretación de un mismo fenómeno en dos lenguajes diferentes lo encontramos en la creación de la vida en el universo, al comparar la creencia mítica de la ancestral y milenaria cultura Maya con el resultado científico llevado a cabo en nuestro tiempo en la Universidad de Cornell, Estados Unidos, según las cuales el rayo es el detonante de la vida en el universo:

"...El Rey, la Serpiente y el Corazón del cielo, a quien también se dice Juracán, dispusieron en las tinieblas la creación de la vida.

Caculjá Juracán que quiere decir "Relámpago", Chipi Calculjá, cuyo significado es "Rayo pequeño" y Raza Caculjá, sinónimo de "Trueno", constituyen la trinidad del Corazón del Cielo o Juracán...

...Se hicieron los valles. Y al instante brotaron los cipresales y pinares, para la alegría y beneplácito de Gucumatz, quien dijo:

-! Que buena ha sido la presencia del Relámpago, el Rayo pequeño y el Trueno!

Ellos respondieron:

- !Nuestra creación, nuestra obra será terminada!

En efecto, se dividieron las corrientes de agua, los arroyos fluyeron alegremente entre los cerros. Y las aguas quedaron separadas ante la presencia de las montañas y las cumbres.

De esta manera se perfeccionó la Obra".

Los resultados científicos se describen así en el lenguaje científico moderno:

"... En mi laboratorio de la Universidad de Cornell mezclamos y sometimos a chispas los gases de la Tierra primitiva: hidrógeno, agua, amoniaco, metano, sulfuro de hidrógeno. Las chispas correspondían a los Rayos, presentes también en la tierra antigua y en el actual Júpiter. Al cabo de diez minutos de chispas aparece una colección muy rica de moléculas orgánicas complejas, incluyendo a las partes constitutivas de proteínas y ácidos nucleicos..."

Para la cultura occidental las primeras interpretaciones sobre las descargas eléctricas atmosféricas se da a principios de 1700 cuando en Inglaterra se publica la primera especulación en la que se planteaba que los relámpagos y los truenos podían estar relacionados con la luz y el sonido, por las características de la chispa o arco eléctrico. Especulación esta que siglos antes ya había sido interpretada por la cultura Inca, mediante el dios Ilyapa

Anterior a Franklin el inglés Stephen Gray descubrió en 1729 que la electricidad podía ser comunicada a grandes distancias, por medio de contacto, es decir, descubrió la conductividad de los materiales y estableció la diferencia entre cuerpos conductores y no conductores.

Hacia finales del siglo 18, las mediciones precisas llegaron a ser un objetivo importante en los experimentos físicos, entonces el término "fluidos sutiles" ("*subtle fluids*") fue usado para fenómenos que comenzaban a ser reemplazados por leyes cuantitativas, las cuales hacían a los fenómenos físicos más predecibles, o más entendibles.

El concepto de fluido sutil fue un paso necesario en el proceso de cuantificación. Un fluido "sutil" o "imponderable" era una sustancia que poseía propiedades físicas pero no era como una materia ordinaria. Los mejores ejemplos de fluidos sutiles fueron el calor y el fuego eléctrico o la electricidad.

4. Aportes de la investigación en Colombia al entendimiento del fenómeno del rayo

Más de quince parámetros mensurables han sido establecidos por diversos investigadores que han estudiado

la física del rayo. La escala de órdenes de magnitud espacial va desde los fenómenos atómicos que inician la electrificación de la nube de tormenta en una magnitud de 10-13 kilómetros, hasta el movimiento del aire de la nube de tormenta, que completa el proceso de carga, en una escala de decenas o centenas de kilómetros. Temporalmente los órdenes de magnitud van desde los 10-6 segundos que duran los pasos del líder escalonado, hasta la duración total de una tormenta en una escala de horas. El conocimiento de estos parámetros, en sus diferentes escalas, tiene importancia tanto científica como tecnológica. El conocimiento Científico nos facilita entender su comportamiento en el tiempo y en el espacio y sus relaciones con otros fenómenos naturales. En lo tecnológico su conocimiento permite el diseño óptimo y la protección adecuada de seres vivos y de equipo eléctrico y electrónico, así como el oportuno mantenimiento para garantizar una operación confiable, económica y segura.

5. Hipótesis de variación espacial y temporal de los parámetros del rayo

La hipótesis sobre variación espacial y temporal en los parámetros del rayo ha estado implícita en todos los trabajos realizados dentro del Programa de investigación PAAS. La hipótesis se fundamenta en los principios científicos planteados por C.T.R Wilson en 1920 y Whipple en 1929, sobre el Circuito Eléctrico Global y la contribución dominante, por una superposición de efectos, de las tres mayores zonas de Convección Profunda Tropical del planeta: Sur América Tropical, Centro de África y el Continente Marítimo (Sur Este de Asia y Australia).

Si bien las zonas de Convección Profunda Tropical fueron identificadas al principio del siglo XX como de alta actividad eléctrica atmosférica, hasta el presente la mayoría de la información disponible sobre las características y magnitudes de los rayos están basadas en estudios llevados a cabo en zonas semitropicales o templadas , pero muy pocos en Zonas Tropicales.

Con base en los principios de Wilson y Whipple se comenzó a desarrollar la comprobación de la hipótesis con las primeras estimaciones que hicimos del parámetro Nivel Ceráuneo en Colombia en 1982 y posteriormente con mediciones, análisis matemático y revisión bibliográfica de otros parámetros del Rayo.

La hipótesis de investigación puede explicitarse de la siguiente manera: "*las magnitudes de los parámetros de la descarga eléctrica atmosférica utilizados en aplicaciones en ingeniería (Nivel Ceráunico, Densidad de Rayos a Tierra, Polaridad, Corriente de Retorno de Rayo y Rata de Ascenso de la Corriente de Rayo) varían espacial y temporalmente*".

La perspectiva temporal significa que los parámetros del rayo se caracterizan por variar en diferentes escalas de tiempo: diaria, mensual, anual y multianual. Una perspectiva espacial significa que la magnitud de los parámetros del rayo varía global y localmente.

En el idioma inglés existe una diferencia entre los conceptos "climate" y "weather" que depende de las escalas de tiempo involucradas. El tiempo (atmosférico) de un lugar particular comprende las variaciones diarias locales de temperatura, precipitación, humedad y condiciones similares; el clima de un lugar es el promedio de tales parámetros sobre un mayor período de tiempo, meses, años o más. Por ejemplo, de la temperatura diaria (tiempo) medida en Enero para un número de años, se puede estimar el promedio mensual (clima) de Enero, como la sumatoria de todos los datos de temperatura diaria, dividido por el número de días registrados. Esto puede ser realizado para un sitio en particular, para una región específica o para todo el planeta; estas escalas se denominan locales, regionales y globales respectivamente. Se pueden comparar entonces estos promedios y caracterizar el clima de un lugar como, por ejemplo, caliente y seco, frío y seco, o caliente y húmedo. Se puede así proceder a clasificar las diferentes regiones del planeta en distintas categorías.

La Climatología es la ciencia que toma como objeto de estudio el estado físico de la atmósfera, identificando periodos de tiempo en sitios geográficos específicos. Las subdisciplinas de la Climatología pueden trabajar en cualquier escala espacial y sobre cualquier período largo de tiempo, lo suficiente para establecer un registro climático. La escala más pequeña de área, conocida como microclimatología, trata con el clima en un campo individual o alrededor de una edificación particular. Un microclima puede extenderse horizontalmente desde menos de 1 metro hasta 100 metros y verticalmente desde la superficie hasta 100 metros.

Un clima local comprende un número de microclimas dentro de un área de rasgos característicos de superficie, tales como un bosque o una ciudad. El tamaño de un clima local puede extenderse horizontalmente de 100 a 10.000 metros y verticalmente hasta 100 metros. Un mesoclima puede contener un número de tipos individuales de paisajes, sin embargo estos usualmente comparten una componente fisiográfica similar. Es así como, por ejemplo, estados vecinos en grandes planicies como en USA pueden ser parte del mismo mesoclima. La Macroclimatología trata del clima de los continentes y del planeta total.

Revisando la bibliografía sobre el desarrollo histórico de las mediciones y estimaciones de los parámetros del Rayo, se utilizó una metodología similar a la descrita en los párrafos anteriores para comparar promedios y caracterizar regiones. Por ejemplo, los datos de días tormentosos basados en observaciones humanas permitieron la primera comparación cuantitativa de ocurrencia de tormentas para regiones de un país, durante diferentes épocas del año y para diferentes sitios alrededor del mundo. Whipple y Brooks, caracterizaron zonas del planeta de mayor contribución al Circuito Eléctrico Global o, en otras palabras, de mayor actividad eléctrica atmosférica.

Sin embargo, cuando los investigadores en la física del rayo procedieron a clasificar las diferentes regiones de la Tierra, de acuerdo con los diferentes parámetros del Rayo medidos para aplicaciones en ingeniería, solo tuvieron en cuenta los datos de mediciones locales de Latitudes Norte y los generalizaron para todo el planeta.

Es así como hoy en día se tienen curvas de distribución de probabilidad para la Corriente de Retorno y la Forma del Impulso de la Corriente de Rayo, medidas en Europa, que se recomiendan tanto en la literatura especializada como en las normas internacionales, para ser utilizadas en diseño de protecciones contra Rayos, diseño de aislamientos en máquinas eléctricas, diseño de apantallamientos en líneas de transmisión, para cualquier parte del mundo. Esta práctica sería equivalente a clasificar climatológicamente la región Colombiana, según el científico alemán Köppen, como bosque húmedo tropical y, con base en ello, diseñar un equipo de aire acondicionado para un edificio en la ciudad de Bogotá.

Con el parámetro de Densidad de Descargas a Tierra sucede algo similar, la literatura especializada y las normas internacionales recomiendan ecuaciones en función del Nivel Ceráunico que han sido desarrolladas para un sitio específico, pero se pretende generalizarlas para todo el mundo. Adicionalmente, como se analiza en este mismo capítulo, podrían esperarse en el trópico (escala global) valores de Densidad más bajos que en el subtrópico, pero, para propósitos de aplicaciones en ingeniería (escala local), los efectos orográficos locales y posiblemente la geología del lugar, pueden jugar un papel tan importante que las magnitudes de Densidad de Descargas a Tierra llegan a ser muy altas.

Para propósitos de aplicación a la ingeniería de protección contra rayos esta generalización trae como consecuencia diseños y construcciones de equipos y sistemas no apropiados al entorno, ni compatibles electromagnéticamente con las condiciones electromagnéticas locales generadas por la actividad de Rayos. La descarga eléctrica atmosférica y sus parámetros asociados, son un fenómeno meteorológico que, como tal, se manifiesta de una manera aleatoria. En sus aplicaciones en la protección, diseño, operación y mantenimiento de equipos y sistemas eléctricos o electrónicos, es necesario considerar, entonces, la dimensión estadística y la probabilidad de sus valores, es decir, explicitar la condición aleatoria del fenómeno.

6. Variación temporal del nivel ceráunico

Varios siglos antes de Cristo, la cultura Caldea de Babilonia desarrolló un sistema de predicción de clima que incluía el conteo de truenos. En la Europa medieval se tiene conocimiento que hubo gente que rescató la práctica Caldea y crearon calendarios de truenos, que fueron usados para hacer predicciones de clima, basados en registros históricos de truenos oídos en días específicos.

En 1873, el Comité Meteorológico Internacional (IMC[1]), reunido en Viena adoptó una unidad que denominó "Día con trueno oído"[2], mediante una resolución que rezaba:

"*Para obtener resultados que permitan comparación, se recomienda contar solamente como días de tormenta aquellos en los cuales un trueno es oído y un relámpago es observado"*[3].

El relámpago sin trueno fue excluido para prevenir el registro de tormentas muy lejanas.

Hacia finales del siglo 19 se comenzaron a elaborar mapas donde, mediante líneas, se conectaban sitios en los cuales el primer trueno de una tormenta era oído. Estas líneas se llamaron líneas de igual número de truenos. El término Isoceráunico[4] se comenzó entonces a usar hacia 1920 y se refería a una línea o isograma de igual frecuencia de días tormentosos.

Los datos de días tormentosos basados en observaciones humanas permitieron la primera comparación cuantitativa

1 *International Meteorological Committee.*

2 *Day with Thunder Heard* en inglés.

3 La versión en inglés reza: *"In order to obtain results which admit of comparison, it is recommended to enumerate only Days of Thunderstorm...Only days on which both thunder and lightning are observed should be counted as days of thunderstorm."*

4 El término significa igual número de truenos y relámpagos.

de ocurrencia de tormentas para regiones de un país, durante diferentes épocas del año y para diferentes sitios alrededor del mundo.

7. Variación espacial del nivel ceráunico por latitudes

Estudios locales sobre la actividad de rayos han sido realizados en diferentes países. Una recopilación de estos estudios, cuyos resultados se representan mediante mapas, permiten inferir que el nivel ceráunico es mayor en latitudes tropicales que en latitudes templadas[5], lo cual es coincidente con los resultados de los trabajos de Whipple y Brooks [1], [2].

El Trópico de Cáncer[6] señala el límite septentrional y el Trópico de Capricornio[7] señala el límite meridional de la llamada Zona Intertropical, comprendida entre estas dos latitudes. Si bien estos límites son astronómicos, no climáticos, la zona intertropical presenta unas características climáticas especiales que la diferencian de las otras cuatro zonas geoastronómicas (las dos zonas templadas y las dos zonas polares).

Veamos algunos de estos mapas comenzando por la zona templada.

En Francia, por ejemplo, el nivel ceráunico promedio multianual es alrededor de 20. Es mayor a 25 al sur, en las áreas montañosas de los Alpes en frontera con Suiza y mayor a 30 en los Pirineos en frontera con España y en frontera con Italia y menor de 15 al norte, en las áreas costeras que bordean el Mar del Norte. La figura 1 presenta el mapa de niveles ceráunicos de Francia con una presentación por sectores centrados en las estaciones de observación pertenecientes a la Compañía Eléctrica de Francia[8]. Los franceses consideran que es más apropiado este tipo de presentación para calcular el riesgo de descarga eléctrica atmosférica que la usual presentación en la forma de curvas isoceráunicas.

En 1924, Alexander [5] presentó un mapa de Niveles Ceráunicos promedios de los Estados Unidos para un período entre 1904 y 1923. La figura 2 presenta el mapa de niveles ceráunicos promedio de los Estados Unidos, según los datos del Departamento de Comercio [3]. Estos dos mapas son muy similares, a pesar de tener datos distantes más de 40 años.

El mapa de la figura 2 presenta altos niveles ceráunicos, entre 70 y 90 días tormentosos año, para la región semitropical en el estado de la Florida, mientras que las regiones más templadas, hacía el polo norte, en frontera con Canadá, el nivel ceráunico es bajo, similar a los valores de esta misma latitud en Francia, 10 días tormentosos/año.

Los valores de nivel ceráunico en zona semitropical, latitud sur, son similares a los de zona semitropical latitud norte (Florida, USA), entre 80 y 100 días tormentosos año, como se puede apreciar en el mapa de niveles ceráunicos del estado de Minas Gerais, Brasil.

Figura 1. Mapa Niveles Ceráunicos Francia. Adaptado de [3].

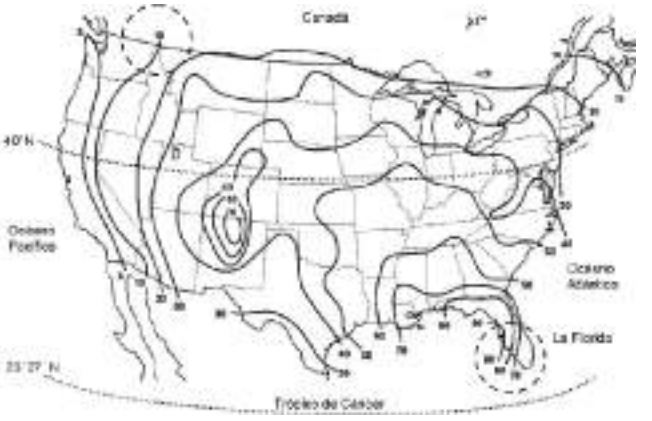


Figura 2. Mapa Niveles Ceráunicos Estados Unidos. Adaptado de [4].

5 Las zonas norte y sur del planeta a niveles de latitud media se conocen como zona templada.

6 Ubicado en la latitud 23° 27′ N.

7 Ubicado en la latitud 23° 27′ S.

8 *Electricité de France.*

Figura 3. Mapa Niveles Ceráunicos, Minas Gerais, Brasil.

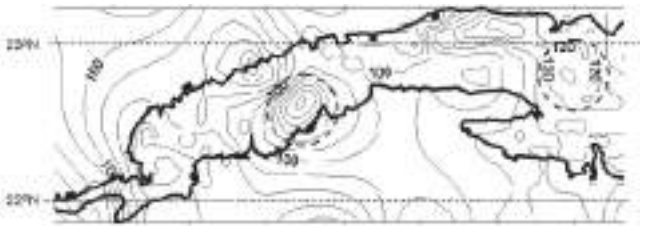


Figura 4. Mapa de Niveles Ceráunicos de Cuba.

A continuación se presentan los mapas de Cuba y Colombia (promedio multianual 1997-2001), representativos de la región tropical, los cuales permiten inferir que el nivel ceráunico es mayor en latitudes tropicales que en latitudes templadas.

A nivel espacial las influencias meteorológicas de tipo sinóptico en Colombia, como la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) y la incidencia de los sistemas de vientos alisios del Noreste y Sudeste (asociados con la ZCIT), repercuten sobre las condiciones locales originando, por ejemplo, mayor nubosidad en áreas extensas y determinando en algunas regiones los periodos de mayor y menor incidencia de actividades de tormenta eléctrica atmosférica. También la actividad convectiva, por condiciones especiales de inestabilidad atmosférica, producto de factores térmicos y de la formación de lluvias por el factor orográfico, contribuye al aumento de la probabilidad de formación de tormentas.

Figura 5. Mapa Niveles Ceráunicos de Colombia (promedio multianual 1997-2001).

En Colombia, el estrechamiento de las cadenas montañosas, principalmente en las Cordilleras Oriental (Noroeste de Cundinamarca y Sudoeste de Boyacá) y Central (Noreste de Caldas, Sudeste de Antioquia), y los vientos que se aproximan a ellas, marcan la principal influencia en la definición del mayor o menor nivel ceráunico y por tanto de la mayor actividad eléctrica atmosférica, como puede apreciarse en los gradientes más altos de Nivel Ceráunico en los pie de montes de las cordilleras.

Alrededor de la Sierra Nevada de Santa Marta, en el Mar Caribe, se presenta un fuerte gradiente con niveles iguales o superiores a 90 días tormentosos/año. La parte media del Valle del Río Magdalena (o mejor conocido como Magdalena Medio) se caracteriza por la presencia de un sistema de alto nivel ceráunico, con valores promedio entre 120 y 160, en la región conocida como Catatumbo en zona limítrofe con Venezuela.

La actividad de rayos en esta región llevó a Humboldt a llamar este fenómeno como el "rayo del Catatumbo"[9]. El naturalista y explorador alemán Alexander von Humboldt lo describe como "*explosiones eléctricas que son como fulgores fosforescentes...*", siendo reseñado luego por el

9 El origen de este fenómeno está en el efecto orográfico de estas cordilleras que encierran los vientos alisios del noreste, produciéndose nubes de gran desarrollo vertical, concentradas principalmente en la cuenca del río Catatumbo.

geógrafo Agustín Codazzi como un "*relámpago continuado que parece surgir del río Zulia y sus alrededores*". El primer escrito donde se mencionó al "rayo del Catatumbo" fue el poema "La Dragontea" de Lope de Vega en 1597.

Una primera conclusión de las anteriores observaciones es la amplia variación espacial de la actividad eléctrica atmosférica en el mundo, desde valores promedios multianuales de 10 hasta más de 160 días tormentosos/año.

Una segunda conclusión es la alta actividad eléctrica atmosférica promedio multianual que, en términos generales presenta la zona tropical respeto a regiones de latitudes templadas, es decir, que podría afirmarse que los países ubicados geográficamente en zona tropical terrestre, presentan alta actividad eléctrica atmosférica. Esta afirmación corrobora la hipótesis planteada por Whipple en 1929, y Gish y Wait en 1950, sobre distribución no homogénea del Circuito Eléctrico Global y la contribución dominante de las tres mayores zonas de Convección Profunda Tropical del planeta.

Sin embargo, desde una perspectiva espacial - local, existen áreas en países tropicales donde la actividad eléctrica atmosférica es muy baja.

Esto nos conduce a una tercera conclusión: plantear la necesidad de diferenciar espacialmente los análisis y por ende las aplicaciones, de acuerdo con el objetivo buscado. Con lo expuesto anteriormente es viable afirmar que el nivel ceráunico en zona tropical es mayor que en latitudes semitropicales o templadas. Sin embargo, si el objetivo es diseñar un sistema de protección contra rayos en una localidad definida, los datos anteriores no necesariamente son validos y se requiere entonces estimar la magnitud de los parámetros del rayo del sitio en cuestión.

8. Variación temporal de la actividad de rayos

El conocimiento de la variación temporal de los parámetros del rayo tiene importantes implicaciones en el diseño, mantenimiento y operación de sistemas eléctricos y electrónicos. Si un diseño de protección contra rayos se realiza, por ejemplo, para un año determinado, es posible que unos años más tarde este mismo diseño pueda estar técnicamente sub o sobre dimensionado. Al conocerse su comportamiento multianual, el ingeniero de diseño puede tener en cuenta la variable tiempo y ajustar la protección para evitar sobrecostos en el diseño o problemas de fallas técnicas en el futuro.

Con base en el conocimiento de la variación temporal de la actividad eléctrica atmosférica, el ingeniero de mantenimiento o el personal de operación, por ejemplo, pueden hacer una programación con altos márgenes de seguridad por incidencia de rayos para el personal o buenos índices de confiabilidad en la operación de un sistema de potencia, que se traducen en una alta calidad de la energía eléctrica. Un ejemplo de esta afirmación se muestra en la figura 6, en la cual se presenta una serie de tiempo de 31 años (1970-2001) del nivel ceráunico en la ciudad de Bogotá, Colombia. En este caso ilustrativo es detectable un ciclo; sin embargo, la confirmación de un patrón determinado debe ser hecha sobre la base de más años de observaciones.

Las figuras 7 a y b ilustran el comportamiento multianual mensual de la actividad eléctrica atmosférica en dos ciudades tropicales: Bogotá, Colombia, ubicada en la zona tropical andina continental y la Habana, Cuba, ubicada en el mar Caribe, zona tropical.

Esta figura muestra dos comportamientos complementarios: bimodal, en el caso de Bogotá y monomodal en el

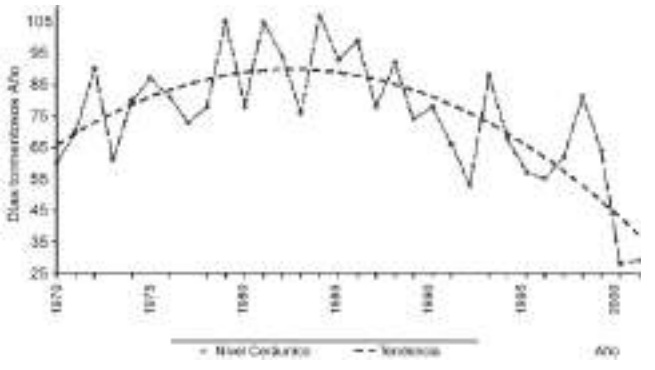


Figura 6. Comportamiento multianual del nivel ceráunico en Bogotá, Colombia.

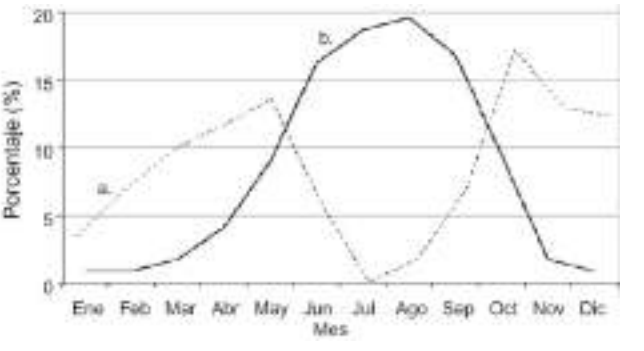


Figura 7. Comportamiento multianual mensual de la actividad eléctrica atmosférica: a. Bogotá, Colombia, b. La Habana, Cuba.

caso de la Habana, Cuba. El comportamiento bimodal en el caso de Bogotá tiene su explicación en el desplazamiento de la zona de confluencia intertropical ZCIT. En la ZCIT confluyen dos masas de aire con baja presión relativa; se sitúa aproximadamente paralela al Ecuador y está ubicada entre dos núcleos de alta presión atmosférica.

En Colombia la ZCIT se desplaza, aproximadamente, entre 0º de latitud, posición más sur en la que se encuentra en los meses de enero-febrero y 10º de latitud norte, posición más norte que se puede alcanzar en los meses de julio-agosto, coincidente con la época de huracanes en el mar Caribe.

El desplazamiento de la ZCIT ocasiona que en la zona andina de Colombia (caso Bogotá) se presente, durante el año, un comportamiento bimodal de actividad de rayos. Es decir, la ZCIT pasa por el centro de Colombia (zona andina) dos veces al año: una primera vez, entre abril y mayo, cuando se desplaza hacia el norte y ocasiona la primera temporada de rayos, que va acompañada de alta pluviosidad y un pequeño descenso de las temperaturas medias, con una disminución de las temperaturas máximas y un aumento de las mínimas. Una segunda temporada de rayos, entre septiembre y octubre, cuando regresa de su posición mas norte, alcanzada en julio-agosto, y se dirige al sur, originando el segundo período de rayos y lluvias que es el más fuerte y que también se acompaña de un descenso de las temperaturas medias, disminución de las temperaturas máximas y aumento de las mínimas.

Complementario al comportamiento bimodal, la zona Caribe, representada, por ejemplo, por La Habana, Cuba, solo tiene una temporada de rayos entre los meses de julio, agosto (ver figura 7 b), coincidente con la época de huracanes, cuando la ZCIT se encuentra en la zona más norte.

Otro análisis temporal tiene que ver con el comportamiento multianual horario, es decir, la hora del día en las que se presenta la actividad de rayos. Las figuras 8 y 9 ilustran 2 casos representativos de la zona tropical: La Habana, Cuba y 2 ciudades colombianas: Bogotá y Puerto Berrio.

El comportamiento horario de la actividad de rayos en Bogotá y la Habana es típico de la formación de nubes de tormenta por convección. La convección involucra la transferencia de enormes cantidades del calor absorbido por el agua; forma nubes de gran desarrollo vertical típicas portadoras de tormentas eléctricas. Si bien la gran mayoría de tormentas tienen formación por convección, las montañas modifican el flujo atmosférico a gran escala, cambiando el curso y la evolución de los sistemas de tormentas, generando su propio patrón de circulación de aire y alterando la distribución de la formación de nubes y el comportamiento horario de los rayos, como en el caso de la ciudad de Puerto Berrio, Colombia, donde la mayor actividad de rayos se presenta entre las 10 de la noche y las 2 de la madrugada.

9. Modelo bipolar tortuoso y ramificado

El inicio del rayo negativo se debe a la formación de penachos dentro de la nube, en la región inferior de carga negativa, a causa de los altos campos eléctricos allí presentes (de 0.1 a 1 MV/m) [6][7][8]. La propagación de estos penachos lleva a la recombinación de cargas en la base de la nube y a la formación de un canal eléctrico a partir del cual comienza a desarrollarse el líder del rayo. Aún no hay total

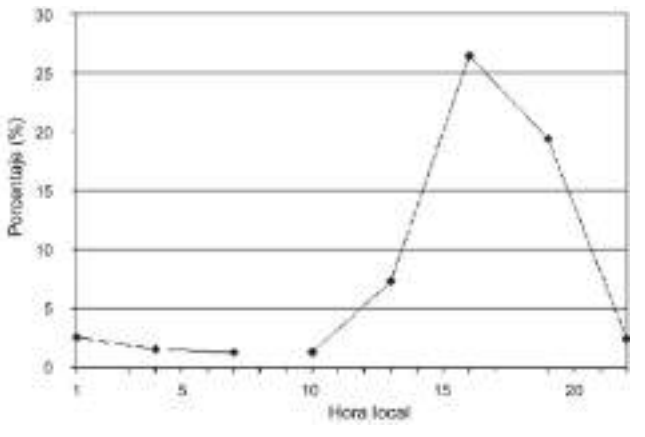


Figura 8. Comportamiento multianual horario de la actividad de rayos en la Habana, Cuba.

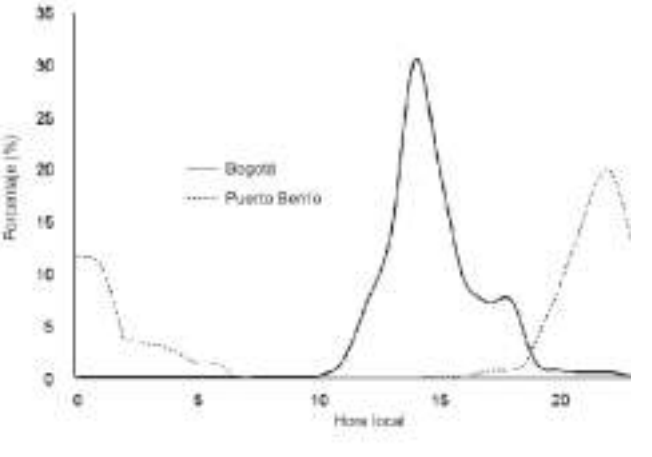


Figura 9. Comportamiento multianual horario de la actividad de rayos en Bogotá y Puerto Berrio, Colombia.

claridad de la forma exacta como se producen estos penachos dentro de la nube, ya que existen teorías diversas que se basan en la precipitación de hidrometeoros, en la interacción de gotas de agua y en la creación de electrones energéticos a causa de rayos cósmicos [7][8]. Sin embargo, la mayor discusión y controversia se concentra en la forma como se propagan, con dos principales modelos conceptuales existentes: el unipolar y el bipolar.

El concepto unipolar fue propuesto inicialmente por Schonland en 1938 [7], [9] y ha sido el más ampliamente usado en ingeniería. Asume que el rayo es iniciado por el desarrollo de penachos unipolares, se genera un líder unipolar y unidireccional que surge del centro de carga de la nube hacia tierra (ver figura 10 a) y por lo tanto, la carga eléctrica es transferida de la nube al canal del líder; sin embargo, no existe una explicación física para este mecanismo de transferencia de carga.

El concepto bipolar fue planteado por Kasemir en 1950 [7], [10], [11] y considera que el rayo es iniciado por penachos bipolares con carga neta cero y cuya fuente de energía es el campo electrostático. Ver figura 10 b. Posteriormente, Loeb aseguró que el rayo se iniciaba por la auto-propagación simultánea de penachos positivos ascendentes y negativos descendentes [12], es decir como penachos bipolares acorde con la teoría de Kasemir.

El concepto bipolar tiene más sentido físico y es una mejor aproximación del fenómeno real, ya que su mecanismo de propagación ha sido verificado con mediciones de campo usando cohetes para el inicio artificial de la descarga[10] y en mediciones con aeronaves.

Con el fin de contribuir al modelamiento del líder del rayo y al estudio de protección contra rayos, se desarrolló un trabajo doctoral en la Universidad Nacional de Colombia [13], utilizando un modelo electrostático del canal del líder para descargas negativas nube-tierra. Este modelo, que es aplicable tanto al líder escalonado (con tortuosidad y ramificaciones) como al líder dardo, aporta al mejor entendimiento físico del fenómeno del rayo y su aplicación a los sistemas de protección externa, teniendo en cuenta por primera vez en la investigación mundial sobre rayos, la tortuosidad y sus ramificaciones. Complementario al modelo del canal se describe el modelamiento de las estructuras en tierra y el proceso de enlace[11], con base en diversos estudios previos y pruebas de laboratorio. La validación de cada una de estas etapas de modelamiento se hizo contrastando sus resultados con

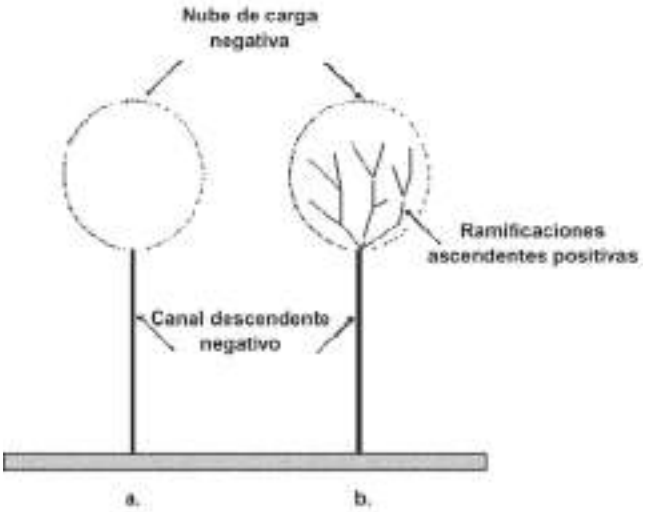


Figura 10. Modelos conceptuales del canal del líder (adaptado de [8]): a. unipolar / unidireccional, b. bipolar / bidireccional.

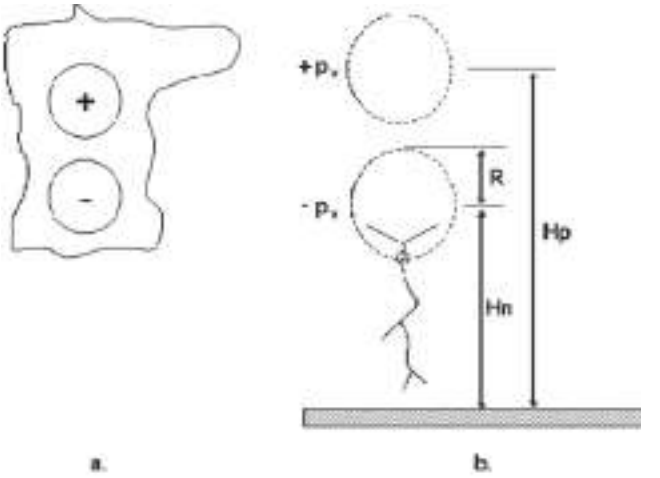


Figura 11. Modelo Bi-Líder: a. nube de tormenta, b. esquema general del modelo Bi-Líder donde el círculo representa el punto de inicio de la descarga.

observaciones y mediciones de campo y laboratorio, encontrando excelentes resultados concordantes entre ellos.

El modelo se desarrolló con base en una aproximación electrostática; aunque en la realidad el proceso es dinámico, esta suposición se considera valida debido al avance escalonado del líder descendente y a su baja velocidad de propagación con respecto a la luz, alrededor de 1000 veces menor. Lo anterior hace razonable asumir que durante cada paso el proceso de distribución de carga en el canal sea

10 *Triggered lightning* en idioma inglés.

11 *Attachment process* en idioma inglés.

Tabla 1.6. Los 10 sitios de más alta Densidad de Descargas a Tierra del mundo.

Rango	Lugar	País	Latitud [N]	DDT [rayos/km^2-año]
1	Kamembe	Ruanda	-1,250	82,7
2	Boende	R. Dem. del Congo	0,250	66,3
3	Lusambo	R. Dem. del Congo	-4,750	52,1
4	Kananga	R. Dem. del Congo	-5,750	50,3
5	Kuala Lumpur	Malasia	3,250	48,3
6	Calabar	Nigeria	5,250	47,4
7	Franceville	Gabón	-2,250	47,1
8	Posadas	Argentina	-27,750	42,7
9	Ocaña	Colombia	8,250	39,9
10	Concepción	Paraguay	-23,250	37,0

electrostático y conforme al campo eléctrico del ambiente. El modelo es válido para descargas negativas nube-tierra.

Partiendo de la estructura eléctrica de la nube de tormenta, ésta se representó mediante dos regiones esféricas de carga, una positiva en la parte superior de la nube y otra negativa en la parte baja, como un dipolo, cada una con la misma densidad volumétrica de carga, (ver figura 11). El canal del líder se modeló con base en el concepto bipolar/bidireccional, asumiendo de esta manera que los canales se extienden con polaridad y dirección opuesta a partir de un punto de inicio y que la carga neta es igual a cero. Por lo tanto, el líder descendente negativo avanza hacia tierra mientras que ramas ascendentes positivas penetran en la nube, (ver figura 11). El canal del líder se consideró perfectamente conductor, teniendo en cuenta que su canal de plasma posee una muy alta conductividad [6], [8][14], y el punto de inicio se estableció en la parte inferior del centro de carga negativo.

10. Densidad de Descargas a Tierra - DDT

El concepto de nivel ceráunico es muy rudimentario y débil para ser capaz de dar una medida utilizable de la severidad de las tormentas y para dar información sobre la existencia de áreas locales que son especialmente propensas a los rayos. Un concepto más riguroso de actividad eléctrica atmosférica, puede ser provisto por la severidad tormentosa, mediante el parámetro Densidad de Descargas a Tierra por kilómetro cuadrado - año - DDT.

Este parámetro ha sido determinado tradicionalmente por dos métodos:

- Mediante mediciones directas con equipos contadores de rayos, sistemas localizadores o, más recientemente, mediante sistemas satelitales y
- Mediante ecuaciones empíricas que relacionan la Densidad de Descargas a Tierra con el nivel ceráunico.

El método de relacionar la DDT con el nivel ceráunico ha sido trabajado por investigadores de diferentes partes del mundo, encontrándose diferentes ecuaciones empíricas de relación nivel ceráunico, densidad de rayos a tierra.

Al comparar la medición directa con estas ecuaciones empíricas muestran variaciones de más del 100% entre ellas, lo cual lleva a concluir que son válidas para los sitios donde fueron desarrolladas. Para este estudio, la ecuación desarrollada dentro del Programa PAAS de la Universidad Nacional de Colombia es la que mejores resultados presenta con errores relativos despreciables.

Estos resultados llevaron a proponer en el comité de normalización de la IEC TC81 que la ecuación propuesta para la norma IEC62305-2, 2006 (DDT = 0.1NC) solo fuera válida para zona templada. Propuesta que fue aceptada y quedó explícita en la norma. La propuesta para zona tropical es utilizar las siguientes ecuaciones [15], [16], cuando no se tenga el dato de DDT obtenido de un sistema localizador o un equipo contador de rayos:

$DDT = 0.024.NC1.12$ (México)
$DDT = 0.030.NC1.12$ (Brasil)
$DDT = 0.0017.NC1.56$ (Colombia)

La similitud entre las ecuaciones encontradas en México y Brasil puede ser atribuida a la localización similar en términos de latitud, México: 16 a 28° N y Minas Gerais, Brasil: 18 a 22° S. Mientras que la ecuación encontrada en Colombia (2 a 10° N) está más cerca al ecuador, que presenta un comportamiento diferente.

Para el caso colombiano esta ecuación se obtuvo para áreas de 30x30 km2, por tanto es una aproximación gruesa

si se requiere diseñar un sistema de protección contra rayos, que generalmente se encuentra en áreas de algunos metros cuadrados; sin embargo esta aproximación es mejor cuando no se tiene dato alguno a disposición.

La distribución geográfica de la Densidad de Descargas a Tierra es, en general, cualitativamente concordante con la distribución climatológica del nivel ceráunico. El valor pico medio anual fue estimado por mediciones satelitales en más 80 rayos/km2-año en la zona tropical africana en Kamembe, Ruanda, un sitio con un promedio de 221 días tormentosos por año, localizado en una latitud de 1,29° S [17].

En estas latitudes, mediante mediciones satelitales, las Densidades de Descargas a Tierra más altas del mundo fueron encontradas en las regiones tropicales de África y al norte de los andes colombianos [17], en zonas de convergencia como la ZCIT, coincidentes con la hipótesis de Wilson sobre las 3 principales zonas de convección profunda: Suramérica tropical, África y el Continente marítimo (Sureste de Asia y norte de Australia). La tabla 1.6 presenta los 10 sitios de más alta DDT del mundo [17].

11. La lógica difusa aplicada a la Densidad de Descargas a Tierra

La lógica difusa se basa en lo relativo de lo observado. En la lógica clásica una proposición sólo admite dos valores: verdadero o falso. Por ello se dice que la lógica usual es bivalente, mientras que la lógica difusa admite además múltiples valores de verdad[12]. La lógica difusa permite representar de forma matemática conceptos o conjuntos imprecisos, tales como la DDT.

Con base en los conceptos de lógica difusa, Younes [18] propuso la Densidad de Descargas a Tierra difusa, la cual consiste en definir una región difusa M alrededor de un punto c de coordenadas (C_x, C_y) para el cálculo de la densidad en ese punto.

Aunque el valor de la DDT difusa resultante es un número *crisp*[13], se adoptó el nombre de DDT difusa debido a que se utilizan técnicas difusas para calcularlo.

El método para el cálculo de la DDT difusa parte definiendo M como un círculo con una frontera difusa mediante la definición de un radio difuso. Luego se trabaja una función de pertenencia μ_{rR} trapezoidal para el radio difuso determinada por un radio menor r y uno mayor R, el cual al rotar genera un cono truncado como el mostrado en la figura 12.

El cálculo de la densidad difusa no es más que una estrategia de suavización de los valores de densidad. Como toda técnica de suavizado es posible abusar de ella hasta perder el detalle deseado de los datos originales. En general un suavizado excesivo tiende a homogeneizar los valores. Esto significa adicionalmente una reducción de los valores pico de densidad.

Por otra parte, un suavizado deficiente tampoco permite reconocer los patrones importantes y genera valores pico de densidad más altos.

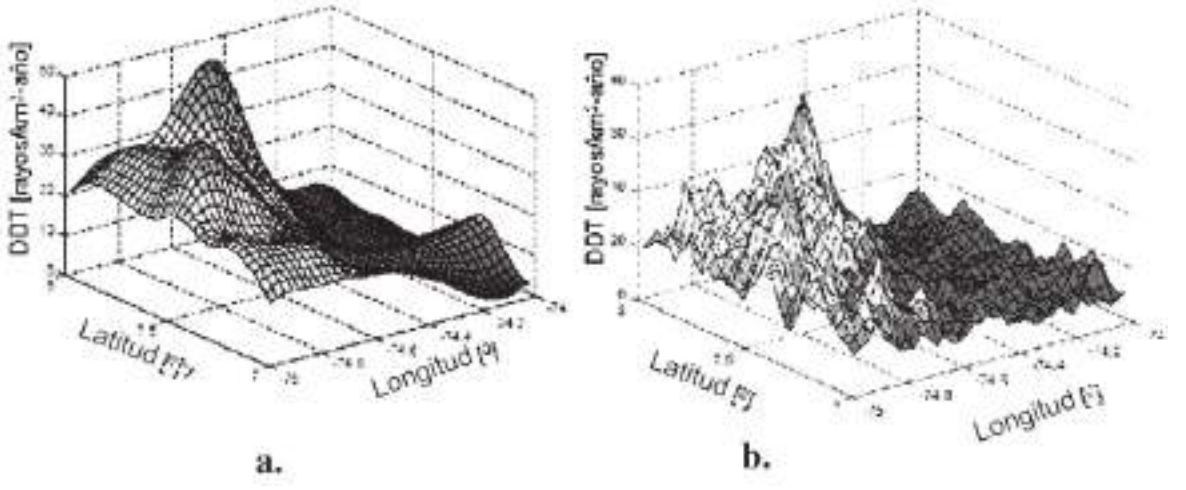


Figura 12. Superficies generadas con datos de: a. densidad difusa y b. densidad concreta (o *crisp*) en la región de mayor DDT en Colombia.

12 Conocida en la literatura especializada como *lógica multivaluada.*

13 Sinónimo de valor numérico "tradicional"; se contrapone al valor numérico expresado de acuerdo con la teoría de conjuntos fuzzy, donde al valor numérico se le asocia un grado de pertenencia.

De lo anterior se deduce que los criterios para la selección de los radios interno y externo deben estar ligados al grado de detalle con el que se espera representar el fenómeno.

Como reglas generales se sugiere [18]:

- Seleccionar un radio exterior mayor que la distancia máxima que pueda tener un punto en el plano al punto de la grilla en que se calcula la densidad más cercano a él.
- Seleccionar un radio interno mayor o igual que la exactitud en la localización estimada para el sistema de medición.
- Seleccionar un radio externo menor que el mínimo nivel de detalle que se desee representar.

La razón por la cual se adoptó esta función de pertenencia, tiene que ver con los estudios realizados sobre la exactitud en la localización de los parámetros del rayo, que arrojó resultados cercanos a 3 km,. Adicionalmente, los 15 Km. de acción del radio, están relacionados con los parámetros del rayo en si, donde a más de 15 Km. es poco probable escuchar un trueno, por lo que en ésta área se define el parámetro de nivel ceráunico.

Con el fin de mostrar los resultados de aplicar el concepto de densidad difusa se tomaron los datos *crisp* de densidad en el área de mayor actividad de rayos sobre el territorio colombiano, se tomó un cuadrado de 1° de latitud (111.11 Km.) cuyo punto central está ubicado en las coordenadas (-74.5°W, 7.5°N)[14]. La función de pertenencia utilizada fue un trapecio, cuya área asociada es un círculo difuso con radio menor de 3 km y radio mayor de 15 km.

La razón por la cual se utilizaron los valores descritos anteriormente como radio menor y radio mayor está relacionado con la eficiencia en la detección de la red colombiana de medición de rayos, la cual está estimada en 3 Km. [19]. La figura 12 muestra las superficies generadas con los datos de densidad difusa y densidad concreta (o crisp). Se puede observar que la figura 12 a representa mucho mejor el fenómeno bajo estudio.

Las superficies generadas con el concepto de densidad difusa es mucho más adecuado, especialmente para problemas de ingeniería, como por ejemplo para la evaluación de riesgo por rayo o el diseño de sistemas de protección contra rayos. Cuando se usa el valor concreto (o *crisp*) de densidad es posible que se sobreestime o se subestime la magnitud del parámetro. Como se puede observar en la figura 12 a, se presentan fuertes variaciones entre puntos cercanos de la grilla, mientras que con el método difuso el comportamiento de la densidad alrededor del punto que se analice es más suavizado.

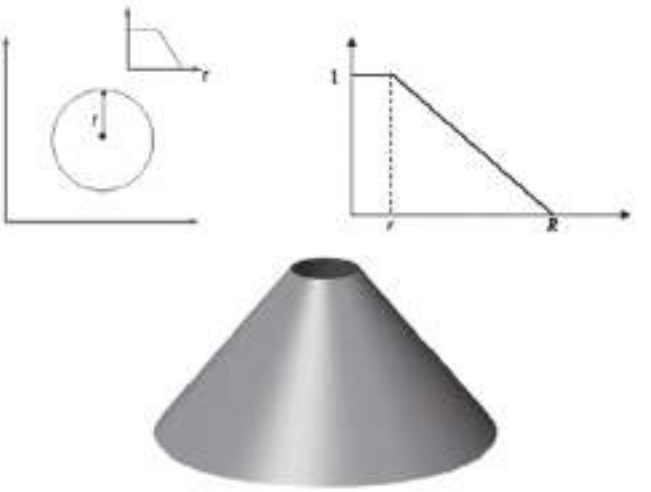


Figura 13. Funciones de pertenencia para el círculo difuso, $\mu_{rR}(z)$ y $\mu_M(x, y)$ y cono truncado generado por las mismas.

12. Amplitud de la corriente de retorno del rayo

La amplitud de la corriente de retorno del rayo es, frecuentemente referida, como el parámetro más importante para aplicaciones en ingeniería.

La descarga de retorno es la etapa del fenómeno que tiene mayor aplicación en la ingeniería del diseño y protección contra rayos de sistemas eléctricos y electrónicos, ya que presenta las mayores magnitudes de corriente eléctrica entre el centro de carga de la nube y tierra. Además, es el suceso ópticamente más brillante, visible y audible del rayo, donde se produce el mayor calentamiento del canal (aprox. 28.000°C) generando un fuerte gradiente térmico entre éste y el aire que lo circunda, produciendo la onda de choque que normalmente se escucha en una tormenta y que se conoce como trueno. Además, la descarga de retorno tiene un espectro electromagnético típico, el cual es usado en los sistemas de medición y localización.

Al igual que el parámetro DDT, la amplitud de la corriente de retorno del rayo puede ser estimada mediante

14 La población más cercana a este sitio es la población de Nechí, Departamento de Antioquia, con una DDT estimada con mediciones del sistema colombiano de localización de rayos en áreas de 3x3 km^2 de más de 50 rayos/km^2-año.

modelos matemáticos en función del campo eléctrico o magnético medido y la distancia o mediante mediciones directas.

El modelo matemático más aceptado por la comunidad internacional es el modelo modificado de línea de transmisión [20]:

$$i(t)=\frac{2\pi cr}{\mu_0 v}B_\varphi(\tau+\frac{r}{c})t<t_0$$

Donde:

ε_0 : Permitividad del espacio libre [F/m]

v : Velocidad efectiva de la descarga de retorno [m/s]

c : Velocidad de la luz [m/s]

r : Radio de impacto de la descarga [m]

t, τ : Tiempo [s]

Como la corriente y el campo eléctrico tienen la misma forma de onda durante los primeros microsegundos de la descarga, la ecuación puede emplearse para calcular la corriente a partir de mediciones remotas de campo magnético radiado (B_φ) o a partir de campo eléctrico a través de la relación

$$\frac{E_z}{B_\varphi}=c$$

A partir de los trabajos experimentales realizados por Rakov [21] con cohetes induciendo rayos, es razonable estimar la corriente de retorno pico del rayo a partir de mediciones de campo eléctrico E a una distancia D:

$$I= 1.5–0.037\ D.E$$

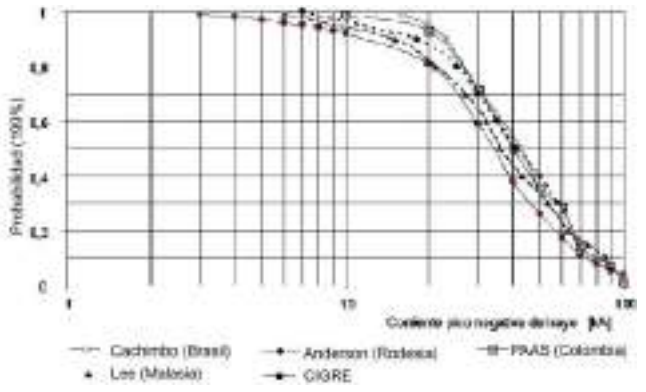


Figura 14. Probabilidad de la corriente de retorno pico de rayo para diferentes latitudes.

13. Magnitudes de corriente de retorno del rayo en diferentes latitudes

A partir de los primeras mediciones de magnitud de corriente de rayo realizadas en Europa en la década de 1950, Berger concluye que las medianas obtenidas en el monte San Salvatore en Suiza (30 kA) y en las chimeneas altas en Checoslovaquia (28 kA), son tan cercanas que los rayos incidiendo sobre las torres de televisión de la montaña Suiza pueden ser comparables con los rayos incidiendo en estructuras altas en campo abierto [22].

Las medianas obtenidas en las tres investigaciones son similares, alrededor de 30 kA, y aparentemente se podría concluir que la corriente pico presenta una amplitud similar en diferentes partes de la tierra. Sin embargo, se debe considerar que todas ellas se hicieron en regiones templadas de latitud norte (Checoslovaquia, Suiza e Italia) y ninguna en regiones tropicales.

Los primeros registros de magnitud de corriente de retorno pico de rayo para un área tropical fueron realizados por Lee et al. [23]. Las mediciones se realizaron en Kuala Lumpur, Malasia, por medio del método de antena aérea en campo abierto. En esta investigación se desarrollo un modelo teórico para la obtención de las corrientes de la primera descarga de retorno pico del rayo, a partir de los datos de campo magnético obtenidos; en total se registraron 194 medidas de campo magnético de la primera descarga de retorno presentes en 11 tormentas. Con base en estos datos se estableció la distribución de probabilidad acumulada del valor pico de la corriente de retorno y se obtuvo una probabilidad del 50% de que se presente un valor de corriente pico mayor a 36 kA; así mismo, la rata de ascenso de la corriente, obtenida entre el 10% y el 90% del valor pico, es típicamente entre 4 y 6 kA/μs para esta zona.

Tabla 1.8. Medianas del valor de la corriente de retorno pico del rayo en diferentes zonas del planeta. Adaptado de Lee et. al. [21]

País	Mediana (kA)
Estados Unidos	23
Suiza	30
Suecia	30
Polonia	31
Malasia	36
Brasil (1)	45,3
Rodesia	42
Colombia (2)	42,9

(1) Minas Gerais, Brasil [27]
(2) Valor estimado mediante mediciones de campo eléctrico a menos de 100 km. y aplicando el modelo de línea de transmisión [28]

Posteriormente, Lee et al realizaron una comparación de los resultados obtenidos, con base en la distribución de probabilidad acumulada, de Kuala Lumpur, con mediciones de otras partes del mundo; en la tabla 1.8 se muestran las medianas del valor pico de corriente para estas investigaciones. De acuerdo con esta comparación, Lee et al concluyen que, en general, existe una buena concordancia entre los resultados, aunque las medidas fueron hechas por diferentes métodos. En particular se presenta bastante concordancia entre los resultados obtenidos en Malasia y los obtenidos por Anderson en Rodesia, regiones tropicales con características climáticas y geográficas similares.

Otras investigaciones llevadas a cabo en Estados Unidos, [24], [25], indican que los niveles de corriente pico de retorno de rayo están en el rango de 10 a 40 kA. El valor medio reportado en esta investigación está en el rango de 15 a 20 kA; solo el 6% de las corrientes estaban por encima de 60 kA y menos del 2% por encima de 100 kA. Sin embargo, la magnitud de la rata y de la corriente pico de rayo varía de acuerdo con la localización geográfica como lo sostiene la norma norteamericana [26].

La figura 14 presenta los resultados de probabilidad comparativos entre los valores dados por CIGRE en 1979[15] y adoptados por las normas internacionales como la IEC, de registros tomados en latitudes templadas y los estimados en cuatro países tropicales: Brasil (Estación Cachimbo, Estado de Minas Gerais, 1996 [27]), Rodesia (Anderson, et. al., 1954 [29]), Malasia (Lee, et. al, 1979 [21]) y Colombia (Torres, et. al., 1995 [28]).

Los datos sobre parámetros del rayo presentados en los párrafos anteriores, con base en una rigurosa revisión bibliográfica, muestra los amplios rangos de magnitud que tienen todos y cada uno de ellos. Para propósitos de normalización los comités técnicos nacionales e internacionales deben analizar todos estos estudios, definir y recomendar aquellos que deben ir en la norma.

Sin embargo, una premisa fundamental para definir y recomendar estos parámetros debe ser, además de la rigurosidad científica de las investigaciones, el aspecto temporal de estos, pues en toda actividad de ciencia y tecnología es demostrable que no hay verdades absolutas sino certezas temporales. Un ejemplo de ello han sido, precisamente, los parámetros del rayo medidos por Berger entre la década de 1950 y 1970, que han servido como base para el desarrollo de las grandes investigaciones de rayos en el mundo y en normalización internacional, que hoy son cuestionados con rigurosidad por mediciones directas de parámetros del rayo [30] en la misma zona templada donde fueron medidos hace 50 años y por mediciones en zona tropical [27], [15]. Para estimar la corriente pico de rayo, Torres et. al [31] realizaron 167 mediciones de campo eléctrico con antenas de placa y el sistema de localización de rayos instalado en Colombia. Los resultados concluyen que existe "evidencia preliminar sobre la magnitud media de la corriente pico de rayo, la cual es mayor en zonas tropicales como Colombia que en otras latitudes. Visacro et. al. [27] encontraron que el valor medio de la corriente pico de rayo (45,3 kA para la primera descarga de retorno y 16 kA para las descargas subsecuentes) son mayores que otros valores en otras referencias internacionales.

El futuro de la investigación sobre rayos

En el fututo próximo la investigación sobre rayos se concentrará en la predicción de los mismos que permitirán la reducción de riesgos y protección en los diferentes sectores productivos.

Con base en el conocimiento adquirido sobre el fenómeno del rayo, hemos desarrollado recientemente en Colombia, con trabajos de maestría y doctorado, equipos que permiten predecir la actividad con 20 minutos de antelación. Estos equipos y su software implícito se conocen como molinos de campo eléctrico. Actualmente existen 4 redes de molinos de campo eléctrico que se estudian en forma experimental para ofrecer monitoreo y predicción de tormentas en Bogotá, Medellín, Manizales y La Palma – Cundinamarca. Estos sistemas pueden ofrecer predicciones de alta confiabilidad (90%), sin embargo tienen una cobertura relativamente limitada (20 km) y su funcionamiento aún es aislado del de otros sistemas de información. Parte de las soluciones pueden lograrse mediante un mayor estudio de los datos proporcionados por estos sistemas y su integración en algoritmos de seguimiento de tormentas y predicción.

Con base en la medida hecha por los molinos de campo se han desarrollado metodologías de predicción. El principal reto para la operación de estos equipos en Colombia es que los umbrales de campo eléctrico que deben usarse para la predicción varían de una región a otra y con el tipo de tormenta, por tanto, los umbrales entre 1 y 2 kV/m comúnmente recomendados por la literatura deben ser revisados mediante la experimentación.

15 Valores que aún siguen vigentes en todo el mundo, para aplicaciones en ingeniería.

Referencias

[1] **Whipple, F.J.W.** "On the association of the diurnal variation of electric potential in the weather with the distribution of thunderstorms over the globe", Quart. J. Roy. Met. Soc., vol. 55, pp 1-17, 1929.

[2] **Brooks, C.E.P.** "The distribution of thunderstorms over the globe", Geophys. Mem. London, vol 24, pp 147-164, 1925.

[3] **Gary, C.** "La foudre", Ed. Masson, Paris, pp 208, 1994.

[4] Electrical Transmission and distribution reference book", Westinghouse Electric Corporation, Pennsylvania, USA, pp. 824, 1964.

[5] **Alexander W.H.** "The Distribution of Thunderstorm in the United States." Monthly Weather Review, American Meteorological Society, Vol. 52, No. 7, pp. 337-343, July 1924.

[6] **Rakov, V., Uman, M.** "Lightning: physics and effects" Cambridge University Press. ISBN 0 521 58327 6. Cambridge, UK 2003.

[7] **MacGorman, D., Rust, W.** "The Electrical Nature of Storms" Oxford University Press. New York, New York. 1998.

[8] **Cooray, V.** "The lightning flash" Institution of Electrical Engineers. ISBN: 0-85296-780-2. London, UK. 2003.

[9] **Schonlad, B.** "Progressive lightning" IV Proc. Roy. Soc. Lond., A., 164. 1938.

[10] **Kasemir, H.W.** "Qualitative Ubersicht über Potential -, Field -, und Ladungsverhaltnisse bei einer Blitzentlandung in der Gewitterwolke" In das Gewitter, H. Israel, Akad. Verlags. Ges. Geest and Portig K. –G., Leipzig. 1950.

[11] **Kasemir, H.W.** "A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge" J. Geophys. Res. 65, 643 1873-1878. 1960.

[12] **Loeb, L.** "The mechanisms of Stepped Leader and Dart Leader in Cloud to Ground Lightning Strokes" JGR 71. pp. 4711-4721. 1966.

[13] **Vargas, F.M.** "Nuevo modelo integral del canal de la descarga eléctrica atmosférica y su enlace con estructuras en tierra" Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2006.

[14] **Lalande, P., Bondiou-Clergerie, A., Bacchiega, G., Gallimberti, I.** "Observations and modeling of lightning leaders" C.R. Physique 3 (2002) pp. 1375-1392. 2002.

[15] **F. de la Rosa, K. Cummins, L. Dellera, G. Diendorfer, A. Galván, J. Husse, V. Larsen, C.A. Nucci, F. Rachidi, V. Rakov, H.** Torres and M.A. Uman. "Characterization of lightning for applications in Electric Power Systems" Journal Electra - Technical Brochure No. 172, CIGRE WG. 33.01.02, December 2000.

[16] **Torres H.** "Ground Flash Density: definition of the appropriate grid size and a proposal of relationship Ng vs. Td for Tropical zones" Activity Report of TF.C4.01.02-B. Working Group C4.01 "Lightning". CIGRE Dallas, Tx., USA, September 2003.

[17] **Christian H. J., et al.** "Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector" JGR, vol. 108, no. D1, 4005, 2003.

[18] **Younes, C.** "Metodologías para la correlación de Parámetros del rayo con características Geográficas y meteorológicas. Caso colombiano" Tesis de doctorado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2006.

[19] **Younes, C.** "Lightning parameters evaluation in the Colombian highest atmospheric activity zone" Proc. of ICLP 2004, 2004.

[20] **Nucci, Carlo Alberto et al.** "On Lightning Return Stroke Models for LEMP Calculations". Proceedings 19th ICLP. Graz: April 1988.

[21] **Rakov, V.A.** 1992. Data acquired with the LLP lightning locating systems. Meteor. Gidrol. No. 7: 105-114.

[22] **Golde, R.H.** "Lightning Vol. 1: Physics of Lightning" Academic Press. New York, New York. 1977.

[23] **Lee, S. C. et al.** "Determination of Lightning Current Using Frame Aerials". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PAS-98, No. 5, Sept./ Oct. 1979. p. 1669-1675.

[24] **Key, T. S. and Martzloff, F. D.** "A consensus on powering and grounding sensitive electronic equipment," IEEE/IAS Annual Conference, pp. 1-7, Sept. 1986.

[25] **Lewis, W. W. and Foust, C. M.** "Lightning investigation on transmission lines," AIEE Transitions, vol. 64, pp. 107–115, 1945.

[26] IEEE Std C62.72 - 2007 "Guide for the Application of Surge-Protective Devices for Low-Voltage (1000 V or Less) AC Power Circuits".

[27] **Visacro, S., Soares, A.** "Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo station" JGR, Vol. 109, D01105. 2004.

[28] **Loeb, L.** "the kinetic theory of gases", Wiley, New York, 1963.

[29] **Anderson, R., Eriksson, A.** "Lightning Parameters for Engineering Application" Electra No. 69, pp. 65-102, 1980.

[30] **Diendorfer et. al.** "Statistical of lightning current parameters measurement at the Geisberg Tower", ILDC, 2004, Ref 64.2

[31] **Torres, H., Rondon, D., Briceño, W., Barreto, L.** "Lightning peak current estimation analysis from field measurements in tropical zones", Proceedings 23rd. ICLP, Florence, Italy, Sep.1996.

[32] **F. de la Rosa, K. Cummins, L. Dellera, G. Diendorfer, A. Galván, J. Husse, V. Larsen, C.A. Nucci, F. Rachidi, V. Rakov, H. Torres and M.A. Uman.** "Characterization of lightning for applications in Electric Power Systems" Journal Electra - Technical Brochure No. 172, CIGRE WG. 33.01.02, December 2000.

Recibido: febrero 10 de 2010.

Aceptado para su publicación: abril 12 de 2010.

UNA REVISIÓN SOBRE EL ESTUDIO DE MOVIMIENTOS EN MASA DETONADOS POR LLUVIAS

Por

Edier Aristizábal[1], Hernán Martínez[2], Jaime Ignacio Vélez[3]

Resumen

Aristizábal E., H. Martínez & J. I. Vélez: Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (131): 209-227, 2010. ISSN 0370-3908.

El presente artículo pretende dar una mirada detallada a los avances y retos asociados al estudio de los movimientos en masa detonados por lluvias, los cuales son característicos y comunes en ambientes tropicales como Colombia. Los movimientos en masa constituyen una de las causas más frecuentes de desastres alrededor del mundo. Las pérdidas económicas asociadas son millonarias y aumentan debido a la expansión urbana sobre áreas montañosas de estabilidad precaria. Los avances más importantes en esta materia alrededor del mundo han sido aplicados en los últimos años en la determinación de umbrales críticos, definidos a partir de modelos físicos o estadísticos, combinados con pronósticos de lluvias y monitoreo en tiempo real como parte integral y fundamental de los sistemas de alerta temprana. Los procesos de remoción en masa tienen múltiples causas, tales como las condiciones geológicas, geomorfológicas y la intervención antrópica; sin embargo, un solo factor como la precipitación, es considerado el estimulo externo que puede generar una respuesta casi inmediata de movilizar los materiales que conforman la vertiente, sea por el rápido incremento de los esfuerzos o por la reducción de la resistencia. La lluvia como factor detonante en la ocurrencia de movimientos en masa ha sido estudiada por numerosos autores, algunos de estos estudios han abordado esta problemática utilizando la estadística, definiendo umbrales críticos que relacionan generalmente la intensidad y la magnitud de la lluvia con la ocurrencia de los movimientos. Igualmente son explorados modelos físicos basados en patrones geotécnicos e hidrológicos que relacionan lluvias, presión de poros y estabilidad de vertientes.

Palabras clave: movimientos en masa, lluvia, modelos estadísticos, modelos físicos.

1 Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Calle 41 No. 53-07, Medellín, Colombia. Correo electrónico: edier.aristizabal@metropol.gov.co

2 Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Ingeniería Civil, Cra. 80 No. 65-223, Medellín (Colombia). Correo electrónico: hemartinezca@unal.edu.co

3 Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Geociencias y Medioambiente, Cra. 80 No. 65-223, Medellín (Colombia). Correo electrónico: jivelezu@unal.edu.co

Abstract

This article attempts to give a very detailed perspective to the challenge and advances associated to rainfall-triggered landslides, which are characteristic and very common in tropical environments, such as Colombia. Landslides are one of the most common hazards around the world. Economic losses caused by landslides are huge, and are often exaggerated due to urban sprawl. Recent findings in this topic around the world have been applied for determining critical thresholds by physical or statistical models, combined with rainfall forecasting and near real time monitoring as fundamental component of an early warning system. Landslides are caused by several phenomena, including geological, geomorphologic and anthropogenic dynamics; however, one variable - precipitation - has a uniquely strong capability to cause rapid, intense slope failure. A review of several studies of rainfall-triggered landslides is presented some of who have used statistical tools that define critical thresholds based on intensity and duration rainfall. Other authors have focused upon physical based models combining hydrological and geotechnical aspects of rainfall, water pore pressure and slope stability.

Key words: landslides, rainfall, statistical models, physical models.

1. Introducción

Los movimientos en masa constituyen una de las causas más frecuentes de pérdidas humanas y económicas alrededor del mundo (**Schuster,** 1996; **Sidle & Ochiai,** 2006), por lo que la evaluación de la amenaza por movimientos en masa y la capacidad de predecir dichos movimientos ha sido un tema de gran interés para la comunidad científica (**Aleotti & Chowdhry,** 1999; **Chacón *et al.,*** 2006). En ambientes tropicales, caracterizados por perfiles de meteorización profundos y alta pluviosidad, un número importante de investigadores se ha concentrado en entender la lluvia como factor detonante en la ocurrencia de estos movimientos en masa (**Caine,** 1980; **Montgomery & Dietrich,** 1994; **Finlay *et al.,*** 1997; **Crosta,** 1998; **Terlien,** 1998; **Crozier,** 1999; **Polemio & Petrucci,** 2000; **Iverson,** 2000; **Larsen,** 2008).

Pérdidas humanas y económicas generadas por movimientos en masa se presentan cada año en todos los países del mundo, sin embargo el nivel de impacto varía considerablemente de acuerdo con las condiciones geológicas locales y la vulnerabilidad socio-económica (**Alcantara - Ayala,** 2002; **Harp *et al.,*** 2009). Datos presentados por **Sidle & Ochiai** (2006) señalan al continente asiático con el de mayor número de víctimas, donde Nepal sobresale con 186 víctimas mortales por año, seguido por Japón y China, con 170 y 140-150 respectivamente; en Latinoamérica, Brasil ocupa el primer lugar con un promedio de 88 personas muertas por año. En términos económicos Japón es la nación más afectada por movimientos en masa, con un estimado de pérdidas de 4 mil millones de dólares anuales; seguido por Italia, Estado Unidos e India con pérdidas que varían entre 1 a 2 mil millones de dólares al año (**Cruden *et al.,*** 1989; **Schuster,** 1996; **Schuster & Highland,** 2001; **Sidle & Ochiai,** 2006).

Aunque los movimientos en masa representan modificaciones del terreno dentro del ciclo geomorfológico natural y continuo (**Scheidegger,** 1998) su ocurrencia en las últimas décadas ha estado íntimamente ligada al crecimiento de la población mundial y consecuente expansión urbana sobre laderas susceptibles a este tipo de procesos. La población urbana de los países en vía de desarrollo se ha incrementado por 5 en tan sólo 40 años y continuará aumentando rápidamente (ONU, 1994; UNFP, 2007), donde las mayores pérdidas se presentan en países de la región circunpacífica, conocida como el Cinturón de Fuego (**Alcantara - Ayala,** 2002), estimativos realizados por **Varnes** (1981) indican que el 89% de las muertes a causa de movimientos en masa se localizan en estos países.

Aunque los movimientos en masa han golpeado a Colombia durante su historia reciente, no se cuenta hasta el momento con una base de datos sistemática que permita hacer un inventario y valoración de las pérdidas económicas y humanas ocurridas. Algunos esfuerzos regionales se realizan para la implementación del Software DesInventar desarrollado por la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina -La Red-, sin embargo faltan aun acciones más decididas al respecto desde el nivel nacional (**Saldarriaga,** 2003; **Aristizábal & Goméz,** 2007). Para el caso del Valle de Aburrá, una de las áreas más afectadas en Colombia por este tipo de eventos y que concentran un total de 3.4 millones de habitantes, los movimientos en masa corresponden a 3 de cada 10 desastres que ocurren en la región y dejan como saldo trágico el 75% de la totalidad de victimas anuales. Sólo los movimientos

en masa le han reportado a la región 1390 personas fallecidas y pérdidas económicas superiores a los 21 mil millones de pesos en el periodo 1880-2007 (**Aristizábal & Gómez,** 2007). Para Colombia, estudios recientes han estimado que el 70% de la red vial nacional se ve afectado por la ocurrencia de movimientos en masa (**Montero,** 2005). De acuerdo a la Base de Datos Internacional sobre Desastres (EM-DAT por sus siglas en inglés) elaborado por la Universidad Católica de Louvain (www.emdat.be), en Colombia se han reportado durante el último siglo 36 desastres generados por movimientos en masa de magnitud considerable, el más catastrófico corresponde a Villatina, ocurrido el 27 de septiembre de 1987 en la ciudad de Medellín, con un estimado de 640 personas muertas.

Debido a esta grave problemática numerosos estudios se han adelantado en los últimos años, que han permitido entender las causas que involucran dichos procesos morfodinámicos. **Sidle & Ochiai** (2008) presentan una excelente revisión al respecto. Sin embargo debido a la complejidad que envuelve este tipo de eventos aún existe gran incertidumbre específicamente en la predicción de su ocurrencia. Diferentes acercamientos se realizan al respecto. La determinación de umbrales críticos, definidos a partir de modelos físicos o estadísticos, combinados con pronósticos de lluvias y monitoreo en tiempo real ha sido aplicada en los últimos años como parte integral y fundamental de los sistemas de alerta temprana.

En Colombia se han adelantado pocos estudios acerca de la precipitación como factor detonante de los movimientos en masa. Sobresalen los estudios realizados por van **Westen *et al.*** (1994) y **Terlien** (1997) en la cuenca del Río Chinchiná y en la ciudad de Manizales respectivamente, donde evalúan la estabilidad de las vertientes integrando un modelo hidrológico que evalúa la posición y fluctuación del nivel freático de acuerdo a la precipitación. Dicho análisis revela que movimientos superficiales son detonados por lluvias diarias superiores a los 70 mm, mientras movimientos profundos son detonados por lluvias acumuladas antecedentes sobre 200 mm en 25 días, combinadas con lluvias diarias las cuales se reducen cuando la lluvia antecedente incrementa. Para el departamento de Antioquia **Moreno *et al.*** (2006) estudian la relación entre lluvia y movimientos en masa para el periodo 1929-1999, y proponen umbrales de acuerdo a la lluvia antecedentes de 15 días y la lluvia precedente de 3 días, con valores de 150 mm y 75 mm respectivamente. Recientemente **Suarez** (2008) analiza los datos históricos registrados hasta el año 2005 para la ciudad de Bucaramanga, y propone niveles de alerta por movimientos en masa utilizando un árbol de decisiones, a partir del cual obtiene como umbrales críticos de lluvia acumulada de 150 mm para 15 días, 55 mm para lluvias antecedentes de las 24 horas y magnitudes de 120 mm para un solo evento.

2. Características y mecanismos de los movimientos en masa detonados por lluvias

Los movimientos en masa son el producto de diversos elementos, donde la configuración morfológica y evolución de las laderas juegan un papel determinante (**Brunsden,** 2002; **Griffiths *et al.,*** 2002; **Hutchinson,** 1995). La definición más simple y ampliamente aceptada es la dada por **Cruden** (1991), quien define el término como el movimiento de una masa de roca, escombros o tierra a lo largo de una ladera. Bajo esta definición existe una gran variedad de movimientos en masa. Algunos son lentos, pequeños e imperceptibles, en tanto otros involucran grandes volúmenes de material y alcanzan altas velocidades con una gran poder destructivo (GEMMA, 2007). La clasificación de movimientos en masa más ampliamente conocida y aceptada es propuesta por **Varnes** (1978) y actualizada por **Cruden & Varnes** (1996). Estos autores emplean como criterio principal para la clasificación, el tipo de movimiento y el tipo de material. Los tipos de movimientos definidos por estos autores son caídas, volcamientos, deslizamientos, flujos, y propagación lateral. En tanto los materiales los dividen en suelo y roca. Una gran complejidad de movimientos puede surgir de la combinación de estos criterios sencillos.

Los movimientos en masa son el producto del debilitamiento progresivo de las propiedades mecánicas de los materiales de las vertientes por procesos naturales tales como meteorización, levantamientos tectónicos y actividades humanas que activan movimientos lentos, generalmente imperceptibles (**Costa & Baker,** 1981; **Soeteres & van Westen,** 1996), sin embargo, un solo factor, comúnmente la precipitación o un sismo, es considerado como el estimulo externo que puede generar una respuesta casi inmediata de movilizar los materiales que conforman la ladera, sea por el rápido incremento de los esfuerzos o por la reducción de la resistencia (**Wang & Sassa,** 2006).

De esta forma los factores que controlan la ocurrencia y distribución de los movimientos en masa pueden dividirse en dos categorías: las variables cuasi-estáticas o condicionantes y las variables dinámicas o detonantes. Las variables cuasi-estáticas, tales como las propiedades de los suelos, la topografía contribuyen a la susceptibilidad de las vertientes y definen la distribución espacial de los movimientos en masa. En tanto, las variables dinámicas, tales como el grado de saturación del suelo y la

cohesión controlan los factores detonantes de laderas susceptibles. La climatología, los procesos hidrológicos, y las actividades humanas controlan a su vez las variables dinámicas, y caracterizan el patrón temporal de los movimientos en masa (**Crosta & Fratiini,** 2003).

Los movimientos en masa detonados por lluvias, generalmente denominados deslizamientos superficiales planares o *soil slip*, se caracterizan por su pequeño espesor (0,3-2 m) mucho menor a la longitud del movimiento, superficie de falla sub paralela a la pendiente y escarpe de área reducida (**Anderson & Sitar,** 1995). Estos movimientos son generados durante eventos intensos de lluvia por el aumento rápido de la presión de poros o por la pérdida del componente de cohesión aparente (**Wang & Sassa,** 2003; **Terlien,** 1998; **Crosta,** 1998; **Crosta & Frattini,** 2003). Posteriormente el material desplazado, por procesos de licuefacción o reducción rápida de la resistencia al cortante en condiciones no drenadas (**Anderson & Sitar,** 1995), se convierte en un flujo que se propaga ladera abajo erodando y trasportando sedimentos del canal, incrementando el volumen de material inicial desplazado (**Wang & Sassa,** 2003; **Wieczorek *et al.,*** 2000). Para suelos parcialmente saturados, **Li *et al.*** (2005) describen dicho proceso como el resultado de la infiltración de lluvia que reduce la succión de la matriz de los suelos en la ladera, esa reducción reduce a su vez la resistencia al cortante del material. Una vez el suelo está completamente saturado, la succión desaparece completamente, y un nivel freático colgado con presión de poros positiva se desarrolla. Esta presión de poros positiva reduce aun más la resistencia al cortante aumentando la probabilidad de ocurrencia de un movimiento.

Gostelow (1991) e **Iiritano *et al.*** (1998) consideran que la lluvia puede actuar de dos formas diferentes en la estabilidad de las laderas: (1) eventos de lluvia muy intensos que causan una reducción de la resistencia al cortante por reducción de la cohesión aparente generando movimientos inicialmente superficiales y (2) eventos de lluvia de larga duración que causan el incremento en la presión de poros sobre una superficie de falla potencial generando movimientos de masa mucho más profundos y frecuentemente a lo largo de superficies de cizalla pre-existentes. Los movimientos superficiales son usualmente detonados por lluvias cortas e intensas (**Crosta,** 1998), en tanto que los movimientos profundos están más relacionados con la distribución y variación de la lluvia en periodos largos (**Aleotti,** 2004).

Wilson & Wieczorek (1995) sugieren que la precipitación puede inducir la generación de una zona saturada con el incremento lógico del nivel freático, especialmente para perfiles poco profundos; y por otro lado, **Rahardjo *et al.*** (1995) sugieren que un nivel freático colgado y temporal se forma en perfiles de suelo profundos, entre la superficie del terreno y el frente húmedo, reduciendo la presión de poros negativa e iniciando un flujo paralelo a la ladera que contribuye a la inestabilidad de la vertiente (**Crosta,** 1998). Estas consideraciones permiten evaluar la presión de poros generada por el aumento de una capa saturada sobre una superficie de falla crítica predefinida, o por el contrario evaluar el desarrollo de la presión de poros a partir del avance de un frente húmedo.

Collins & Znidarcic (2004) proponen dos distintos mecanismos de falla generados por la infiltración. En el primer mecanismo la falla ocurre el aumento en la presión de poros positiva originando licuefacción del material, en tanto el segundo mecanismo la falla ocurre en presiones de poros negativas donde el material está aun en estado no saturado y la falla ocurre por reducción de la succión y la masa se comporta similar a un cuerpo rígido. Suelos de grano fino y baja infiltración no tienden a desarrollar presiones de poros positivas y la falla ocurre generalmente por reducción de la resistencia al cortante causada por pérdida de succión. En general los movimientos en masa superficiales están asociados con el desarrollo de presiones de poros positivas mientras movimientos más profundos están asociados a pérdida de succión (**Collins & Znidarcic,** 2006).

Las propiedades del suelo y la intensidad de la lluvia (I) son un factor primario que controla la inestabilidad de los taludes; la magnitud y rata de reducción en el factor de seguridad (FS) es directamente proporcional a la magnitud de la intensidad de lluvia, a mayor intensidad más rápidamente decrece el factor de seguridad (**Rahardjo *et al.,*** 2007). Adicionalmente pequeñas variaciones en la conductividad hidráulica (k) controlan la localización de la ocurrencia de movimientos en masa, lo que explica de cierta forma el carácter aleatorio en la distribución de los movimientos sobre una misma ladera aparentemente homogénea (**Reid,** 1997). **Cho & Lee** (2001) y **Cho & Lee** (2002) estudian los mecanismos de falla en taludes conformados por suelos residuales no saturados donde encuentran que el campo de los esfuerzos es modificado por la distribución de la presión de poros (ψ), la cual es controlada por las variaciones espaciales de la conductividad hidráulica durante la infiltración de la lluvia. Y aunque el talud es homogéneo texturalmente, la conductividad hidráulica tiene una distribución no homogénea ya que es una función del contenido de agua o de la succión.

3. Variables de los movimientos en masa detonados por lluvias

La complejidad en encontrar las probabilidades de alcanzar una profundidad de saturación crítica y por lo tanto pronosticar la ocurrencia de movimientos en masa detonados por lluvias es función de una gran cantidad de parámetros involucrados e íntimamente relacionados (ver Figura 1). El flujo de agua que entra al suelo (In) es función de las propiedades del suelo, la lluvia (P) y la morfología de la ladera (ML); las características hidráulicas y la succión (ψ^-) son propiedades dominantes del suelo; mientras la intensidad de la lluvia (I) y su duración (D) son condiciones externas que inciden en la saturación del suelo (**Crosta,** 1998; **Wang & Shibata,** 2007; **Rahardjo *et al.,*** 2007). Otros factores que controlan la duración y cantidad de la precipitación crítica son el contenido de humedad del suelo (θ) y la lluvia antecedente. En conclusión la mecánica, las propiedades físicas e hidráulicas de los suelos, el espesor del perfil de meteorización (Z) , y la cobertura vegetal (V) contribuyen a la resistencia de los suelos y las condiciones de flujo sub-superficial, induciendo condiciones variables de inestabilidad como respuesta a los patrones de lluvia (**Crosta,** 1998).

Pocos estudios han investigado la influencia de la permeabilidad o conductividad hidráulica (k) en la ocurrencia de movimientos en masa superficiales detonados por lluvias (**Pradel,** 1993; **Wang & Sassa,** 2003; **Li *et al.,*** 2005; **Setyo & Liao,** 2008). La permeabilidad es una propiedad básica del suelo, e indudablemente juega un papel esencial desde el punto de vista del balance que debe existir entre la generación de la presión de poros y su disipación, lo cual es fundamental para la inicialización del movimiento (**Wang & Shibata,** 2007). Laderas conformadas por suelos homogéneos con bajo coeficiente de permeabilidad saturado ($k_s \leq 10^{-6}$ m/s) son más seguras ante lluvias de corta duración ($T_r \leq 24$ h) sin importar la intensidad de la lluvia, en tanto para taludes de suelos homogéneos con valores altos del coeficiente de permeabilidad saturado ($k_s \geq 10^{-5}$ m/s) la estabilidad de los taludes es fuertemente afectada por lluvias de corta duración y alta intensidad, esto significa que el efecto de la lluvia antecedente es más crítico para suelos homogéneos con bajos valores de k_s. Algunos autores explican la necesidad de lluvias de larga duración o lluvias antecedentes para que fallen los taludes con baja permeabilidad en el hecho de que el tiempo requerido para que la lluvia infiltre la ladera con baja permeabilidad es muy largo y la recuperación del factor de seguridad después de una lluvia es muy lento, adicionalmente la presión de poros con respeto a la lluvia en perfiles superficiales empieza a cambiar en tiempos mucho menores que para perfiles profundos (**Hengxing *et al.,*** 2003; **Rahardjo *et al.,*** 2007; **Setyo & Liao,** 2008). En perfiles con baja permeabilidad la presión de poros disminuye lentamente y se mantiene en valores altos, incluso después de terminar la lluvia, en los perfiles con alta permeabilidad la presión de poros se reduce rápidamente al mismo tiempo que la lluvia (**Hengxing *et al.,*** 2003). Esta situación también explica que los mecanismos de falla para laderas de suelos homogéneos con altos k_s y bajos k_s no son similares. Bajo lluvias intensas, laderas con altos k_s usualmente falla por la acumulación del nivel freático, mientras taludes con bajos k_s fallan por la reducción de la succión; para laderas con altos k_s, la mayor parte del agua se infiltra dentro del suelo y causa que falle por aumento del nivel freático, de otra forma para laderas con bajos k_s, las lluvias de corta duración no causan el aumento del nivel freático sin importar la intensidad de la lluvia ya que el resto de agua se convierte en escorrentía (**Tsaparas *et al.,*** 2002; **Rahardjo *et al.,*** 2007).

Aunque es conocida la lluvia antecedente como un factor importante que predispone las condiciones de inestabilidad de una ladera, su influencia es difícil de cuantificar, ya que depende de diferentes factores, entre ellos la heterogeneidad de los suelos y las variaciones regionales del clima. Algunos autores aun mantienen un debate sobre el papel de la lluvia antecedente y el factor detonante; diferentes trabajos alrededor del mundo han obtenido conclusiones diferentes. Mientras varios investigadores consideran que la importancia de la lluvia antecedente es igual a la intensidad de la lluvia y depende de la permeabilidad del suelo (**Guzzettti *et al.,*** 2005; **Rahardjo *et al.,*** 2007), **Brand *et al.*** (1984) encuentra que la lluvia antecedente no incide en la ocurrencia de los movimientos superficiales en Hong Kong, lo cual Rahardjo ***et al.,*** 2001 explican por la alta permeabilidad local de los suelos, que genera una mayor posibilidad para que los suelos drenen reduciendo el incremento en la presión de poros. En general existe consenso en que para suelos de baja permeabilidad la lluvia antecedente juega un rol muy importante, ya que reduce la succión del suelo, causando que el coeficiente de permeabilidad incremente, lo que traduce en una mayor permeabilidad a la infiltración en el suelo, como resultado, la resistencia al cortante (τ) se reduce y consecuentemente, el factor de seguridad también se reduce durante la lluvia (**Hengxing *et al.,*** 2003; **Rahardjo *et al.,*** 2008). Para ambientes tropicales de alta montaña, **Terlien** (1998) encuentra que la diferencia en el número de días de lluvia antecedente depende de la profundidad de la superficie de falla, donde movimientos detonados por altas precipitaciones diarias son superficiales con profundidades

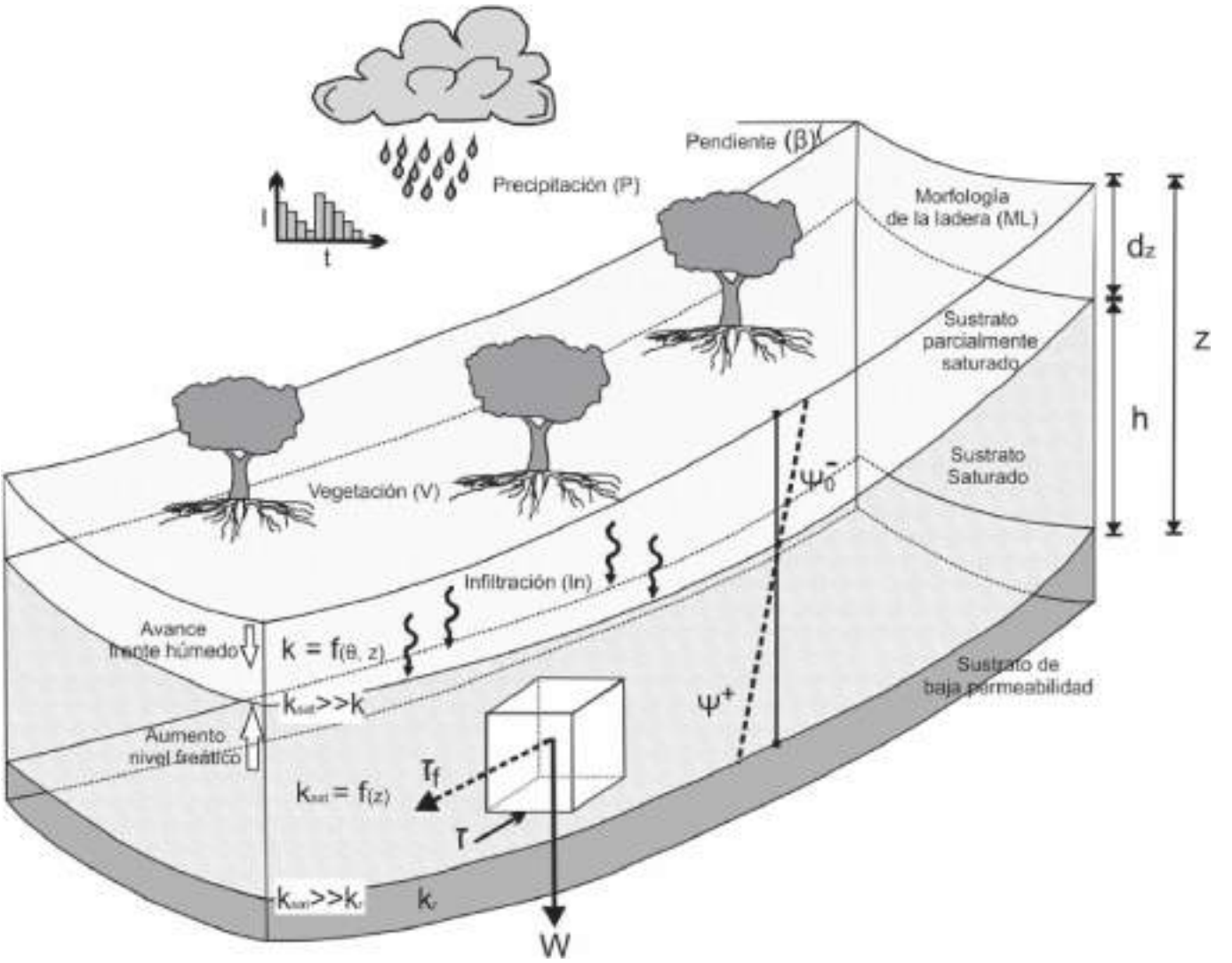


Figura 1. Representación esquemática tridimensional del perfil de meteorización sobre una ladera de morfología (ML) convergente bajo lluvia (P) y las variables hidrológicas - geotécnicas que influyen en la ocurrencia de movimientos en masa: intensidad de la precipitación (I), contenido de agua volumétrico (θ), presión de poros positiva (ψ^+) y negativa o succión (ψ^-), permeabilidad (k), peso del suelo (W), vegetación (V), infiltración (In), pendiente de la ladera (β), resistencia al cortante (τ), profundidad (Z), espesor suelo saturado (h).

menores a 2 m, y movimientos detonados por lluvias antecedentes tiene superficies de falla profundas con superiores a los 6 m.

Suelos con alta porosidad efectiva presentan una mayor capacidad para mantener y almacenar agua, y por lo tanto retrasan la infiltración en el sub suelo. Consecuentemente el incremento en la presión de poros (ψ) también se retrasa afectando positivamente la estabilidad de la ladera. Para tormentas no muy intensas, no se presentan movimientos superficiales cuando existen altos valores de porosidad efectiva. Sin embargo estos altos valores tienden a aumentar el contenido de agua de la masa desplazada, lo que genera finalmente movimientos más rápidos y que recorren mayores distancias, además de depositarse sobre áreas más extensas. Estas tres condiciones le dan características mucho más destructivas a estos movimientos en suelos con alta porosidad efectiva (**Mukhlisin *et al.,*** 2006).

La succión (ψ^-) es uno de las variables más importantes de esfuerzos en la teoría de suelos no saturados (**Fredlund & Morgerstern,** 1977; **Fredlund & Rahardjo,** 1993; **Huat**

et al. 2006). Para suelos no saturados el coeficiente de permeabilidad es función del grado de saturación o succión debido a la distribución heterogénea de los poros y el agua o contenido de agua (θ) y succión dentro de la masa de suelo. La cantidad de agua almacenada depende también de la succión de la matriz y la retención de humedad característica de la estructura del suelo (**Ng & Shi,** 1998). Con el incremento del contenido volumétrico de agua (θ), la succión y consecuentemente la conductividad hidráulica decrecen, debido al número menor de poros conectados dentro de la estructura del suelo que decrece el número de canales disponibles para el flujo de agua (**Collins & Znidarcic,** 2004). La existencia de succión incrementa la resistencia del suelo. Movimientos en masa superficiales ocurren en suelos residuales de fuertes pendientes después de fuertes o prolongadas lluvias, donde el agua empieza a infiltrarse en el suelo, la succión en los horizontes superficiales se reduce lentamente y se convierte en cero cuando el suelo alcanza la condición saturada (**Huat *et al.*** 2006). Es ampliamente conocido que la lluvia induce un aumento en el nivel freático y un incremento en la presión de poros que genera la falla de la ladera. Sin embargo en numerosos casos no se encuentran evidencias de un aumento suficiente del nivel freático como para detonar dichos movimientos, en estos casos se atribuye la falla al avance del frente húmedo en el perfil de suelo hasta que alcanza una profundidad que detona el movimiento, esta situación se presenta por la reducción de la resistencia al cortante generada por la reducción de la succión (**Rahardjo *et al.*** 1995). **Gofar *et al.*** (2008) estudian la respuesta de la distribución de la succión a la infiltración de la lluvia de dos taludes con dos suelos diferentes, uno de tamaño fino y el otro de tamaño grueso. Los resultados muestran que la distribución de la succión del suelo grueso es mas influenciada por lluvias cortas e intensas, mientras que la succión en el suelo fino es gobernada por la duración de la lluvia.

Pocos estudios se han realizado sobre el efecto de la vegetación (V) y el desarrollo de sus raíces sobre la ocurrencia de los movimientos en masa. Entre los estudios más reportados se encuentran **O´Loughlin** (1984), **Gray** (1995), **Wu & Sidle** (1995), **Abe** (1997) y **Ziemer** (1981), **Normaniza & Barakban** (2006), **Tosi** (2007) y **Normaniza *et al.*** (2008). En general la mayoría de autores han evaluado el efecto mecánico que generan las raíces de las plantas en la estabilidad de las laderas, atribuido principalmente al incremento en la resistencia al cortante de los suelos. Este incremento se le atribuye al anclaje de las raíces formando una red dentro de los horizontes de suelos más superficiales. Sin embargo es conocido que la vegetación influencia la estabilidad de las laderas en dos formas esencialmente: (1) removiendo la humedad del suelo por evotranspiración; y (2) generando cohesión por las raíces en el manto del suelo (**Sidle & Ochiai,** 2006). El primero de ellos no se considera particularmente importante en regiones para movimientos en masa superficiales que se generan en periodos lluviosos, excepto posiblemente en los trópicos y subtrópicos donde la evotranspiración es alta durante todo el año. Las raíces, por su parte, son reconocidas como un factor más importante en la estabilidad de las vertientes, las cuales pueden responder a la fuerza de corte en tres diferentes formas: estirándose, deslizándose o rompiéndose (**Tosi,** 2007). Trabajos de laboratorio recientes han arrojado resultados interesantes que demuestran que el efecto de las raíces afecta significativamente la cohesión pero no el ángulo de fricción (**Normaniza *et al.,*** 2008) y que el pico adicional de la resistencia al cortante que genera las raíces se incrementa notablemente con el incremento del contenido de humedad (**Chia-Cheng & Chih-Feng,** 2008).

Otra línea de investigación es la utilización en trabajos recientes del periodo de retorno para umbrales intensidad – duración (I-D) , sin embargo es necesario tener en cuenta que dichos periodos de retorno corresponden a una simplificación que debe ser realizada con cuidado, debido a que los periodos de retorno intensidad – duración tienen probabilidades de recurrencia diferentes de acuerdo a las condiciones de humedad inicial del suelo (**Crosta & Frattinni,** 2008; **Borga *et al.,*** 1998; **Iida,** 1999, **Iida,** 2004; **Hennrich & Crozier,** 2004; **D´Odorico *et al.,*** 2005). La forma del hietograma afecta el valor de la cabeza de presión, para determinadas lluvias, hietogramas con picos al final de la tormenta genera picos de presión más altos que para hietogramas uniformes, reduciendo el periodo de retorno de tormentas que generan movimientos en masa (**D´Odorico *et al.,*** 2005).

Una de los más recientes e importantes avances que permite considerar todas estas variaciones de las propiedades de los suelos, la morfología de las vertientes, así como el patrón de lluvias ha sido el uso de modelos físicos e hidrológicos distribuidos (**Borga *et al.,*** 1998; **Crosta,** 1998; **Burton & Bathurs,** 1998; **Griffiths & Collison,** 1999; **Frattini *et al.,*** 2004). A la escala de cuenca, los modelos distribuidos representan un acercamiento que incorpora la heterogeneidad espacial de la lluvia y de aspectos que afectan la producción de escorrentía y la estabilidad de la ladera e integran el gran potencial de los SIG (**Wu & Sidle,** 1995; **Vélez *et al.,*** 2004). Un problema fundamental en el uso de modelos físicos distribuidos es el cómo parametrizar las propiedades del suelo y las consideraciones necesarias que por ende influyen en la calidad de los resultados (**Casadei *et al.,*** 2003).

4. Modelos para la evaluación de la amenaza y pronóstico de movimientos en masa detonados por lluvias

Una gran variedad de técnicas han sido desarrolladas para la evaluación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa (**Varnes,** 1984; **Soeters & van Westen,** 1996; **Barredo *et al.,*** 2000; **Dai & Lee,** 2001; **Guzzetti *et al.,*** 1999; y **Hutchinson,** 1995). En esencia, estas metodologías pueden ser agrupadas en: (1) métodos heurísticas basados en el entendimiento de los procesos geomorfológicos que actúan sobre el terreno; y (2) métodos estadísticos basados en predicciones estadísticas por combinación de variables generadoras de deslizamientos en el pasado, y (3) métodos determinísticos basados en modelos de estabilidad, los cuales gracias al desarrollo de los sistemas de información geográfica han venido siendo utilizados en zonificaciones regionales.

En general ninguna de estas metodologías tienen en cuenta las variables dinámicas o detonantes del sistema, al igual que los comportamientos en el corto y largo plazo de estas variables (**Crosta & Fratiini,** 2003; **van Beek & van Asch,** 2004), por lo que dichos análisis en sí tan solo reflejan la susceptibilidad de las laderas a la ocurrencia de movimientos en masa. Caracterizar la amenaza por movimientos en masa requiere una evaluación tanto de la susceptibilidad de la ladera a fallar como de la probabilidad de ocurrencia del movimiento en términos de tiempo (**Crosta & Fratiini,** 2003). Para el caso de la amenaza es necesario convertir en términos de frecuencia y magnitud los factores detonantes, en este caso lluvias, donde estos parámetros son muy específicos y dinámicos para el sitio de ocurrencia (**van Westen *et al.,*** 2006).

En la práctica, la incorporación de los factores dinámicos o detonantes se realiza por métodos estadísticos o físicos. Los métodos basados en consideraciones estadísticas definen umbrales críticos que relacionan generalmente la intensidad y la magnitud de la lluvia con la ocurrencia del evento. Estos estudios dependen en gran medida de la calidad de los datos, tanto del inventario de movimientos en masa como historial de lluvias. Por otro lado un grupo importante de investigadores, han enfrentado este problema desde el punto de vista matemático, desarrollando modelos físicos basados en patrones geotécnicos e hidrológicos que relacionan lluvias, presión de poros y estabilidad de vertientes; estos modelos tienen la capacidad de evaluar la actividad espacial y temporal de la inestabilidad de las vertientes pero depende fuertemente de las variables de entrada y condiciones de frontera (**Crosta & Frattini,** 2003; **Aleotti,** 2004; **van Beek & van Asch,** 2004). De esta forma, cuantificar el mecanismo detonante es un paso esencial hacia el pronóstico de la amenaza por movimientos en masa, por lo cual el reto actual se enfoca en cuantificar los procesos físicos relacionados con la infiltración de la lluvia, la recarga de los flujos sub-superficiales y consecuentemente la ocurrencia de los movimientos (**van Westen *et al.,*** 2006).

Estos métodos, estadísticos y físicos, han permitido definir *umbrales*, los cuales son definidos como el mínimo o máximo nivel crítico de alguna cantidad necesaria para que un proceso ocurra (**Reichembach *et al.,*** 1998). El umbral mínimo corresponde al valor inferior por el cual no se registran movimientos, en tanto el umbral máximo representa el umbral de lluvia sobre el cual los movimientos en masa siempre ocurren (**Glade *et al.,*** 2000). Para establecer umbrales de lluvia crítica adecuados es entonces necesario considerar las condiciones especificas de cada área, estableciendo la relación entre las condiciones locales y regionales de lluvia con las características de los suelos y morfología de la vertiente (**Crosta,** 1998).

5. Métodos estadísticos para la definición de umbrales críticos de lluvia

Cuando los movimientos son superficiales (< 3m) y series continuas de lluvias están disponibles, pueden ser establecidas correlaciones entre intensidad, duración de lluvias y eventos por movimientos en masa. Los umbrales estadísticos pueden ser agrupados en tres categorías 1) umbrales que combinan medidas de precipitación obtenidas para eventos específicos 2) umbrales que incluyen las condiciones antecedentes y 3) otros umbrales que incluyen umbrales hidrológicos (**Guzzetti *et al.,*** 2008).

Los parámetros investigados más comunes son: (1) lluvia total (acumulada), (2) lluvia antecedente (pre-evento); y (3) duración e intensidad de lluvia, o la combinación de estos. Partiendo de dicha información los umbrales son definidos considerando: (1) intensidad de la lluvia, (2) la relación duración e intensidad, (3) la duración sobre un nivel de intensidad predefinido, (4) la lluvia acumulada en un cierto periodo, (5) la relación entre lluvia antecedente y lluvia diaria, (6) la relación entre la lluvia del evento y la lluvia anual promedia, (7) la relación entre lluvia diaria y lluvia de exceso antecedente (**Guzzetti *et al.,*** 2005).

Las primeras discusiones acerca de umbrales críticos de lluvia como detonantes de movimientos en masa fueron presentadas por **Campbell** (1975) y **Starkel** (1979), sin embargo **Caine** (1980) fue el primero en utilizar relaciones empíricas entre la ocurrencia de movimientos en masa y

las características de precipitaciones (intensidad y duración de lluvia), proponiendo como umbral:

$$\mathbf{I}=14{,}82\mathbf{D}^{-0{,}39}$$

Recientemente **Guzzetti *et al.*** (2008) proponen un nuevo umbral Intensidad-Duración a nivel mundial, menor al propuesto por Caine, soportado en una base de datos de 2.626 eventos detonados por lluvias:

$$\mathbf{I}=2{,}2\mathbf{D}^{-0{,}44}$$

Otro importante número de trabajos se han realizado en este sentido con el fin de generar pronósticos de ocurrencia de movimientos en diferentes partes del mundo (**Reichenbach *et al.,*** 1998; **Crozier,** 1999; **Chleborad,** 2000; **Glade *et al.,*** 2000; **Dai & Lee,** 2001; **Chleborad,** 2003; **Jakob & Weatherly,** 2003; **Gabet *et al.,*** 2004; **Guzzetti *et al.,*** 2005; **Cannon,** 2005; **Godt *et al.,*** 2006; **Giannecchini,** 2006). Sin embargo es necesario tener en cuenta que estos umbrales no consideran condiciones antecedentes, y no son aplicables para movimientos de superficies profundas o detonadas por precipitaciones continuas de baja intensidad o donde complejas condiciones asociadas a flujos subterráneos se presentan dentro de las vertientes o taludes.

Recientemente **Jaiswal & van Westen** (2009) proponen un método para determinar la probabilidad temporal de la ocurrencia de un movimiento en masa superficial utilizando la probabilidad de excedencia de un umbral de lluvia critico de acuerdo al modelo de probabilidad de Poisson y la probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa de acuerdo a un umbral de lluvia determinado. Los umbrales de lluvia fueron establecidos basados en la relación de la lluvia antecedente con la lluvia diaria.

Se debe tener en cuenta finalmente que las lluvias no son la causa directa de inestabilidad. Los movimientos son generados por el incremento de la presión de poros en el suelo. Asumir que a mayor intensidad de lluvia, mayor es la probabilidad de falla no siempre se cumple (**Reichenbach *et al.,*** 1998).

6. Métodos físicos para la definición de umbrales críticos por lluvia

En términos generales los métodos físicos explican generalmente la ocurrencia de los movimientos en masa combinando análisis geotécnicos para determinar presiones de poro críticas y análisis hidrológicos para evaluar la cantidad de lluvia que es requerida para aumentar tales presiones de poro críticas (**Terlien,** 1998). Los modelos físicos definen umbrales relacionando la cantidad de lluvia medida a nivel regional y local con las características del terreno, y son calibrados usando eventos de lluvia para los cuales la cantidad de lluvia detonante, la localización y el tiempo de los movimientos en masa generados son conocidos (**Guzzetti *et al.,*** 2005).

6.1. Análisis hidrológico en los métodos físicos

Modelos conceptuales que expliquen la respuesta hidrológica para la iniciación de flujos son diversos y se han planteado desde hace varias décadas. El modelo probablemente más reconocido se basa en la idea del incremento de la densidad y la disminución de la conductividad hidráulica (k) del regolito con la profundidad (Z), en donde la tasa de lluvia excede la tasa de percolación en profundidad, creando un nivel freático colgado en el regolito y asumiendo que el flujo en la zona saturada es paralelo a la vertiente. En este modelo la situación más crítica para la estabilidad de la ladera se considera cuando la zona saturada alcanza la superficie de la ladera y la presión del agua en los poros (ψ) está limitada por su altura (h) (**Anderson & Sitar,** 1995).

Existen consideraciones simples que consideran la hidrología de la ladera como un flujo sub superficial en estado estático y evalúan el control topográfico en la presión de poros (**Montgomery & Dietrich,** 1994), los cuales tienen una tendencia a sobre estimar espacialmente la amenaza dependiendo de la calidad de los datos topográficos (**Crosta & Frattinni,** 2008), y modelos hidrológicos para vertientes inicialmente no saturadas que consideran flujos dinámicos transitorios, que evalúan la amenaza por movimientos en masa para tormentas específicas; la presión de poros que se desarrolla en los suelos, en estos casos, ocurre como un proceso transitorio de acuerdo al movimiento de infiltración vertical en el perfil de suelo, adicionalmente la resistencia al cortante depende del grado de succión o presión de poros negativa (**Sharma & Nakagawa,** 2005; **Huat, Ali & Low,** 2006; **Collins & Znidarcic,** 2004). La escala sub horizontal de las vertientes es del orden de cientos de metros, mientras el espesor del suelo es usualmente de algunos pocos metros, por lo que el flujo no saturado paralelo a la ladera ocurre en escalas de tiempo mayores a la infiltración, y su efecto sobre la variabilidad de la presión de agua puede ser despreciable en la escala de tiempo con respecto a la infiltración vertical (**D´Odorico *et al.,*** 2005).

Diferentes modelos han incorporado la geometría de las laderas para describir el comportamiento hidrológico de un punto dado en una cuenca, los más utilizados son: TOPOG (**O´Loughlin,** 1986); TAPES (**Moore *et al.,*** 1988), los cuales ignoran el flujo a través de zona no saturada; y

modelos como el TOPMODEL (**Beven & Kirkby,** 1979), el cual asume que el flujo a través de zona no saturada ocurre como un flujo vertical de magnitud igual a la precipitación (**Torres *et al.,*** 1998). En general estos modelos se fundamentan en que bajo un estado hidráulico estático, los niveles colgados de agua subterránea están directamente relacionados con el denominado índice topográfico:

$$\lambda \log Ac/\tan \beta$$

Donde ***Ac*** es el área de contribución aguas arriba y ***tanβ*** es el gradiente de pendiente local. Áreas con valores altos de **λ** son más propensas a ser saturadas durante lluvias. El índice topográfico refleja la tendencia del agua a acumularse en cualquier punto en la cuenca (en términos de Ac) y la tendencia de las fuerzas gravitacionales de mover el agua hacia abajo (expresado en términos de *tanβ* como un gradiente hidráulico aproximado) (**Quinn *et al.,*** 1991).

Lanni *et al.* (2009) estudian los efectos del flujo de agua lateral y normal en la ocurrencia de los movimientos en masa y su relación con las condiciones de humedad del suelo antecedentes y la intensidad y duración de la lluvia, utilizando un modelo hidrológico distribuido llamado GEOtop. Los resultados de la simulación numérica sugieren que para condiciones de humedad antecedente, baja intensidad y larga duración de lluvias el efecto del flujo de agua lateral tiende a amplificarse. Para estos casos los modelos hidrológicos basados en un flujo unidimensional (perpendicular a la ladera) puede presentar limitaciones. Para condiciones de humedad del suelo antecedente seca, cortas duraciones de lluvia y suelos de grano fino, la falla depende de la redistribución de presiones en la dirección normal a la ladera, donde el flujo lateral es insignificante hasta que la falla ocurre. Pero para casos de larga duración de la lluvia o suelos más permeables, el efecto lateral se convierte en más relevante incluso durante el evento. En este caso las formas unidimensionales y bidimensionales de las ecuaciones de Richards dan resultados divergentes. El efecto en dos dimensiones causa un incremento más rápido en la cabeza de presión en el fondo de la ladera y una pérdida en las condiciones de inestabilidad la cual no es detectada por análisis unidimensionales.

Algunos autores consideran que el concepto de flujo subterráneo en estado estático no es apropiado para evaluar las causas detonantes de los movimientos en masa, debido a los cortos periodos de respuesta de la cabeza de presión en algunos suelos (**Matsushi *et al.,*** 2006; **Chiang & Chang,** 2009). Al asumir la lluvia en estado estático consecuentemente se está eliminando el efecto de la redistribución de la presión del agua en el suelo perpendicular a la pendiente asociada a la infiltración de lluvia transitoria, por lo que dichos modelos no pueden predecir la respuesta temporal de los movimientos en masa a patrones variables de lluvia (**Iverson,** 2000). **Borga *et al.*** (2002b) consideran poco realista la asunción de un estado estático para los índices de humedad, ya que estos modelos suponen que el flujo sub superficial en cualquier punto del paisaje depende del área de drenaje aguas arriba, lo cual es válido sólo si la recarga al nivel colgado ocurre por el período de tiempo requerido por cada punto para alcanzar el equilibrio del drenaje sub superficial y genere drenaje desde la totalidad de su área de contribución aguas arriba; sin embargo debido a la baja velocidad del flujo sub superficial esta suposición es muy difícil de cumplir, en general sólo se recibe contribución de una pequeña porción del total de área de drenaje.

Sin embargo los controles topográficos del flujo subsuperficial afectan los patrones de humedad en el largo plazo dentro de una cuenca y determinan la cabeza de presión anterior al inicio de una tormenta. Por lo tanto la cabeza de presión de agua dentro de la columna puede ser expresada como la suma de dos componentes, la cabeza producida por la rata de infiltración a largo plazo en estado estático, y la respuesta de la cabeza de presión en el corto plazo originado por una tormenta dada (**Iverson,** 2000; **D´Odorico *et al.,*** 2005).

Otros modelos en estado estático basados en hidrología de onda cinemática han sido usados para vertientes con laderas saturadas en un gran número de trabajos (**Troch *et al.,*** 2002; **Paniconi *et al.,*** 2003; **Rezzoug *et al.,*** 2005). Los cuales utilizan en general la ecuación de Boussinesq para Capacidad de Almacenaje en Laderas formulada en términos de la ecuación de Darcy y continuidad en términos de capacidad de almacenaje de agua en el suelo como variable dependiente (**Troch *et al.,*** 2003).

Uno de los modelos hidrológicos dinámicos más ampliamente conocido y utilizado a nivel mundial fue desarrollado por **Iverson** (2000), quien considera un régimen de flujo transitorio y suelo parcialmente saturado a partir de las ecuaciones de **Richard** (1931), requiriendo como datos de entrada la intensidad-duración de la precipitación y una característica de difusividad hidráulica. Iverson considera diferentes estados y consideraciones, específicamente para un comportamiento a largo y corto plazo. Encontrando para un comportamiento a largo plazo el modelo de flujo de agua estático utilizado por **Montgomery & Dietrich** (1994); advirtiendo que un estado estático y flujo de agua paralelo a la vertiente sobre una capa impermeable, se cumple sólo si la duración de la lluvia es muy larga, la profundidad es relativamente pequeña, la intensidad de la lluvia es muy

baja y el componente de conductiva hidráulico perpendicular a la pendiente excede en gran medida el componente paralelo a la vertiente.

Iverson (2000) propone para periodos cortos en suelos parcialmente saturados y flujo transitorio, la variación de la cabeza de presión del agua en el suelo en función del tiempo, de la difusividad hidráulica máxima, la pendiente de la ladera, y la profundidad vertical del perfil de suelo. En el modelo de Iverson, la capacidad de infiltración es asumida como equivalente a la conductividad hidráulica saturada. Sin embargo la capacidad de infiltración debe variar de acuerdo a la duración de la lluvia, y la rata de infiltración está significativamente relacionada con la capacidad de infiltración variable. Para evitar valores de cabeza de presión no reales, Iverson emplea la corrección de la línea beta, especificando que las presiones dadas deben ser ajustadas por debajo de dicha línea. **Tsai & Yang** (2006) demuestran que dichas presiones no realistas se deben a la sobrestimación de las ratas de infiltración inducidas por asumir que la capacidad de infiltración es igual a la conductividad hidráulica saturada, y proponen un modelo de Iverson modificado que evita dicha situación.

Baum *et al.* (2002) desarrollan un programa en Fortran denominado TRIGRS basado en un modelo de infiltración vertical transitorio unidimensional con un modelo de estabilidad de laderas simple, de acuerdo a los desarrollos de **Iverson** (2000), asumiendo condiciones saturadas o muy cercanas al saturamiento. Este modelo encuentra que los resultados son muy sensibles a las condiciones iniciales, particularmente el componente estático del flujo y la profundidad inicial del nivel freático. Dicho modelo ha sido posteriormente utilizado y modificado por otros investigadores (**Lan *et al.,*** 2005; **Salciarini *et al.,*** 2008; **Godt *et al.,*** 2008. Alguna críticas al modelo propuesto por Iverson se fundamentan en la no consideración de la dirección del flujo en la ladera, la morfología y los niveles de infiltración (**Montgomery & Dietrich,** 2002).

Amaral *et al.* (2009) aplican un modelo de repuesta transitoria distribuido para análisis de estabilidad de laderas, el cual combina un análisis de estabilidad de laderas infinita con una solución de la ecuación de Richards para infiltración del agua vertical en estado cuasi saturado del suelo. La validación de dicho modelo se realizó en dos escalas, la primera de ellas a la escala de una ladera para un caso especifico ocurrido en el Valle del río Quente en las isla de Azores, y la segunda para una escala de cuenca utilizando una base de datos de movimientos en masa de la zona y generalizando los parámetros del suelo. Los resultados obtenidos para la escala de ladera fueron muy precisos, y fue posible predecir el tiempo de ocurrencia del evento para este punto. Para la escala de ladera los resultados fueron conservativos, incluso el modelo predijo la totalidad de eventos cartografiados.

Otro modelo de infiltración vertical ampliamente conocido es el modelo de Green-Ampt, el cual se define como un modelo de infiltración simple con resultados muy consistentes con las ecuaciones de Richard (**Ekanayabe & Phillips,** 1999; **Xie *et al.,*** 2004; **Qiu *et al.,*** 2007). Originalmente este modelo fue desarrollado para la infiltración de agua sobre superficies horizontales donde se presenta encharcamiento, por lo que para su utilización en superficies inclinadas son necesarias algunas modificaciones (**Setyo & Liao,** 2008); en el modelo de infiltración Green-Ampt se asume que se cumple las siguientes condiciones (**Setyo & Liao,** 2008; **Qiu *et al.,*** 2007; **Xie *et al.,*** 2004):

a. La superficie del suelo se mantiene constantemente humedad por encharcamiento en la superficie.

b. La cabeza de succión en el frente húmedo es constante.

c. El déficit del contenido de agua volumétrica es uniforme antes y después de la humedad.

d. El coeficiente de conductividad hidráulico es constante e igual a la conductividad hidráulica saturada.

Estas condiciones significan que el suelo está completamente saturado desde la superficie hasta el frente húmedo, mientras por debajo del frente húmedo presenta un grado de saturación igual al inicial. Los modelos de avance de frente húmedo se basan en el movimiento gravitatorio de la humedad, lo que no es enteramente cierto. En realidad el frente húmedo tiene una distribución de la humedad variable y depende en gran medida de las características del suelo y de la intensidad de la lluvia (**Sharma & Nakagawa,** 2005).

Múltiples variaciones y ajustes se han realizado al modelo **Green & Ampt. Pradel & Raad** (1993) desarrollaron un método basado en el modelo de Green & Ampt para estimar las probabilidades de falla de una ladera bajo prolongadas lluvias, el cual tiene en cuenta la intensidad y duración de la lluvia para varios periodos de retorno. El método requiere que se cumplan dos condiciones, que la intensidad de la lluvia se mayor que la capacidad de infiltración del suelo, y segundo, que la lluvia sea mayor que el tiempo crítico necesario para saturar el suelo a una profundidad crítica. **Cho** (2009) utiliza un modelo unidimensional de infiltración y un análisis de estabilidad infinita para determinar la influencia de la infiltración en la

estabilidad de una ladera considerando dos horizontes. Para esto utiliza el modelo de infiltración de Moore, el cual es basado en el modelo de Green & Ampt, pero a diferencia cubre una situación más general, incluyendo cuando el agua se mueve desde el perfil hacia arriba por la formación de un nivel freático colgado generado por una reducción de la permeabilidad del horizonte inferior. Algunos autores incluso como **Cho & Lee** (2002) han modificado del método de Pradel & Raad tomando en cuenta la intensidad y duración de la lluvia para varios periodos de retorno con el objeto de evaluar las probabilidades de falla para un evento de lluvia particular.

Crosta & Frattini (2003) comparan tres modelos hidrológicos para una misma área: modelo de estado estático (**Montgomery & Dietrich,** 1994), modelo de frente húmedo transitorio (**Grenn & Ampt,** 1911) y el modelo difusivo transitorio (**Iverson,** 2000). Los tres modelos son combinados con un análisis de estabilidad de pendiente infinita unidimensional. Los resultados de dicha comparación arrojaron que el modelo difusivo transitorio trabaja mejor que los otros, arrojando polígonos o áreas más pequeñas inestables, pero sin incrementar el error. El modelo en estado estático, aunque presentó unos niveles alto de predicción, arrojó grandes áreas como inestables, sobrestimando la amenaza, lo cual explica los altos niveles de predicción. El modelo difusivo, aun teniendo en cuenta las dificultades en la calibración, especialmente para el valor de difusión, al cual el modelo es muy sensible, al parecer es capaz de simular correctamente los procesos que se generan durante una lluvia que detona los movimientos en masa superficiales.

Finalmente existen algunas consideraciones, aplicables tanto a modelo hidrológicos estáticos o dinámicos, que no han sido incorporadas en los análisis hidrológicos, tales como la influencia de la reducción de la porosidad con la profundidad del suelo y el control del flujo lateral a través de rutas preferenciales denominadas *pipes* o macro poros (**Vélez *et al.,*** 2004). Algunos estudios empíricos han encontrado que el flujo lateral a través de *pipes* controla la respuesta de las vertientes lo que trae serios problemas en la aplicación de los modelos hidrológicos que asumen condiciones isotrópicas, homogéneas y de constante permeabilidad (**Sidle & Ochiai,** 2006).

6.2. Aspectos geotécnicos de los métodos físicos

Los modelos geotécnicos por movimientos en masa detonados por lluvias generalmente utilizados son de pendiente constante y longitud infinita, suponiendo la superficie de falla paralela a la superficie del terreno y que la longitud de falla es mucho mayor que el espesor de la capa desplazada (**Borga *et al.,*** 2002). Dichos análisis se basan en que los esfuerzos cortantes (τ_f) sobre la ladera no deben superar la resistencia al cortante (τ) del material, por lo tanto el factor de seguridad de la ladera puede ser definido en términos de los esfuerzos efectivos, por la relación entre τ / τ_f(**Brunsden & Prior,** 1984).

Aunque la gran mayoría de modelos utilizan las propiedades de los suelos para calcular el factor de seguridad basado en análisis de estabilidad de laderas infinitas, difieren en el método en el cual la presión de poros es calculada como se discutió anteriormente. Existen modelos físicos como el SINMAP (**Pack *et al.,*** 1998); SHALSTAB (**Montgomery & Dietrich,** 1994), LISA (**Hammond *et al.,*** 1992), los cuales asumen un estado estático, flujo saturado paralelo a la ladera y usan la Ley de Darcy para estimar la distribución espacial de la presión de poros; excepto en LISA que requiere solamente la profundidad del nivel freático. El modelo de estabilidad de **Iverson** (2000), a diferencia, considera un flujo no saturado transitorio para estimar la respuesta de la presión de poros a profundidad.

Uno de los modelos físicos más reconocido es propuesto por **Montgomery & Dietrich** (1994) y **Montgomery *et al.*** (1998), denominado SHALSTAB. Este modelo emplea un modelo hidrológico TOPOG (**O´Loughlin,** 1986) para estimar la altura de la porción saturada de suelo, el cual asume que el control dominante de la distribución espacial de los movimientos está dado por la topografía, la cual define las pendientes y a los flujos sub-superficiales que convergen. Estos autores definen para su análisis un índice de saturación del suelo el cual es utilizado para predecir el nivel freático en función del flujo del agua en el suelo y la intensidad de la lluvia. El modelo de estabilidad propuesto utiliza el criterio de Mohr-Coulomb, en el cual por simplificación asumen la cohesión igual cero. De esta forma combinando el modelo geotécnico con el modelo hidrológico definen la ecuación:

$$\frac{h}{z} = \frac{q}{T}\,\frac{a}{b\,\mathrm{sen}\beta}$$

Donde ***q*** es el caudal unitario por unidad de área de drenaje ***a*** y ancho unitario ***b***; T es la transmisividad del suelo; y ***h***/***z*** es la relación entre el espesor de suelo permeable y espesor del suelo saturado. El radio hidrológico ***q***/***T*** captura la magnitud del evento de lluvia, representado por ***q***, en relación a la capacidad subsuperficial de dirigir el flujo aguas abajo, por lo que entre mayor sea *q* con respecto a *T* existen mayores probabilidades que el terreno se sature y mayores serán las áreas que se convertirán inestables en una zona. En cuanto al índice topográfico ***a***/***bsen*β** captura el efecto

esencial de la topografía en el flujo superficial. La diferencia de este radio con el definido por el modelo TOPOG, es que este último utiliza la $Tan\beta$ representando la pendiente de la superficie de falla, en lugar de $sen\beta$ que representa el gradiente de cabeza total que origina el flujo subsuperficial (**Montgomery *et al.,*** 1998).

A partir de los trabajos de **Montgomery & Dietrich** (1994) y **Montgomery *et al.*** (1998) algunos investigadores han demostrado que la movimientos de masa superficiales están fuertemente controlados por la topografía superficial (ML), la cual afecta la convergencia del flujo sub-superficial, incrementando la saturación de suelo y reduciendo la resistencia al cortante (**Guimaraes *et al.,*** 2003; **Pellenq *et al.,*** 2003; **Rosso *et al.,*** 2006; **Fernández *et al.,*** 2004); no solo la pendiente sino la forma de ésta (concavidad y convexidad) son factores que controlan la ocurrencia de los movimientos superficiales (**Talebi *et al.,*** 2008; **Borga *et al.,*** 2002; **Iida,** 1999). Bajo estas consideraciones tres vertientes hidro-geomorfológicas básicas son útiles para evaluar la estabilidad (1) divergentes; (2) planas; y (3) convergentes. Las geoformas divergentes son generalmente más estables en terrenos pendientes, seguidas por las geoformas planas y las cóncavas o convergentes, las cuales son menos estables (**Berne *et al.,*** 2005). En las laderas divergentes o de forma convexa el flujo sub-superficial es disperso, lo que permite que un nivel freático colgado sea poco común y las presiones de poros sean típicamente mucho más bajas que en laderas con otras geoformas (**Berne *et al.,*** 2005; **Sidle & Ochiai,** 2006). **Talebi *et al.*** (2008) examinan la estabilidad de 9 geoformas posibles de la vertiente, combinando el perfil longitudinal o curvatura del perfil (cóncavo, recto, y convexo) y el perfil perpendicular o plano de curvatura (convergente, paralelo y divergente). Estos autores consideran que la curvatura del perfil controla el cambio de la velocidad del flujo de masa de agua hacia abajo de la ladera, en tanto el plano de curvatura define la convergencia topográfica, la cual es un control importante de la concentración del flujo sub-superficial. Los perfiles convexos son generalmente más estables que perfiles cóncavos o planos, en cuanto a los planos de curvatura la estabilidad incrementa cuando el plano cambia de convergente a divergente, especialmente para perfiles convexos.

El método SINMAP corresponde a un programa computarizado que predice el potencial de estabilidad para movimientos en masa, numéricamente similar al SHALTAB, ya que utilizan la misma ecuación del factor de seguridad y Ley de Darcy para flujos saturados. La diferencia con el SHALTAB es que este último no tiene en cuenta la cohesión. Con respecto al método LISA (por sus siglas en inglés Level I Stability Analysis) éste fue desarrollado por la USDA, para suelos con similar topografía y geología. El LISA es un desarrollo bajo un análisis probabilístico basado en el factor de seguridad, considerando la carga de los árboles y el espesor vertical del suelo húmedo. Los valores para cada parámetro en la ecuación son definidos por una función de distribución de probabilidades y los resultados son presentados en un histograma mostrando la distribución del factor de seguridad calculado usando el método de Monte Carlo (**Morrisey *et al.,*** 2001).

Finalmente **Iverson** (2000) propone evaluar el factor de seguridad, durante un evento de lluvia, como función de la profundidad y el tiempo, reflejando la respuesta de la presión de poros. El método asume que la ladera está inicialmente humedad y que el área de la cuenca es mucho mayor al espesor del movimiento en masa. **Iverson** (2000) considera que el factor de seguridad varía como función de la profundidad y el tiempo, por lo que divide el factor de seguridad en un componente estático $\mathbf{Fs_0}$ y un componente que varía con el tiempo **FS´**.

Morrissey *et al.* (2001) comparan tres métodos diferentes métodos, SINMAP, LISA, e Iverson, encontrando que el método de Iverson es preferible ya que este considera la respuesta transitoria y espacial de la presión de poros en el cálculo de la estabilidad de la ladera. El método SINMAP y LISA son similares y utilizan funciones de distribución probabilística para ciertos parámetros, sin embargo el LISA permite el uso de valores distribuidos para todos sus parámetros.

La principal desventaja de los modelos infinitos de ladera es que no tienen en cuenta los esfuerzos producidos por el flujo sub superficial y la topografía en direcciones diferentes a la perpendicular de la vertiente. Algunos trabajos han demostrado que desviaciones del flujo paralelo a la vertiente, especialmente en suelos profundos, afectan considerablemente la resistencia al cortante (**Borga *et al.,*** 2002). **Crosta & Dal Negro** (2003) encuentran que adicionalmente a la infiltración vertical la convergencia de agua sub superficial en el sentido longitudinal también es relevante, y que estos efectos se magnifican en sectores cóncavos, donde los flujos laterales se concentran.

7. Futuras investigaciones

Existen aun grandes incertidumbres para un adecuado entendimiento de la lluvia como detonante de movimientos en masa. Uno de los elementos aun por investigar se basa en que los parámetros para los modelos hidrológicos en suelos no saturados, tales como difusividad, curvas de humedad del suelo, la distribución de la profundidad del perfil

de suelo y el contenido de agua inicial son generalmente desconocidos, con el agravante que se conoce con certeza la gran sensibilidad de los modelos a estos parámetros (**Crosta & Frattini,** 2008). En este mismo sentido conocer las condiciones de humedad previa al inicio del evento de lluvia es tan importante como el conocimiento de las condiciones de lluvia en sí mismo, por lo que es necesario evaluar el papel del efecto de la lluvia antecedente para diferentes ambientes, lo que aun continua muy incierto (**Hennrich & Crozier,** 2004; **Crosta & Frattini,** 2008).

En los análisis geotécnicos es necesario reconsiderar la generalización que se asume al utilizar modelos de estabilidad de pendiente infinita que limita los análisis a movimientos superficiales sobre laderas planas; cuando en realidad estos movimientos se presentan generalmente en geoformas convergentes donde la contribución de esfuerzos laterales puede ser considerable (**Crosta & Frattini,** 2008). A esto se suma que los modelos en 1D se combinan con DEM de alta resolución, lo que genera confusiones y errores en la aplicación, ya que al introducir el DEM no se cumple la consideración esencial de pendientes y espesores de suelo constantes sobre las vertientes que exige el modelo; es necesario por lo tanto analizar mecanismos de falla diferentes al modelo de Coulomb, donde se incluya análisis de licuefacción estática, cambios rápidos en la presión de poros, y la influencia de condiciones no saturadas (**Crosta & Frattini,** 2008).

La incorporación de datos de lluvia transitorios, tales como la duración y la intensidad horaria, en los modelos físicos para el pronósticos de movimientos en masa es una línea a desarrollar en futuras investigaciones, ya que una de las deficiencias en la gran mayoría de modelos es la resolución espacial de la lluvia, lo cual gracias a nuevos avances como los radares ha sido mejorado considerablemente (**Chiang & Chang,** 2009).

Finalmente un campo importante de aplicación de modelos estadísticos y físicos para la predicción de movimientos en masa detonados por lluvias son los sistemas de alerta temprana. El análisis de la recurrencia temporal de las catástrofes naturales han demostrado que las afectaciones generadas por dichos eventos presentan una frecuencia mayor a la capacidad de recuperación que tiene la sociedad y la economía, por lo que nuevos enfoques se centran en el desarrollo e implementación de sistemas de alerta temprana y regulación de suelos que minimicen la pérdida de vidas humanas e infraestructura (IEWP, 2005; **Guzzetti & otros,** 2005). Las autoridades locales y quienes toman decisiones con respecto a la evacuación de persona están interesadas tanto en la determinación del momento donde ocurrirá el movimiento en masa, como en su probable localización, es decir el cuándo y el dónde; y es precisamente allí donde la investigación y desarrollo de modelos físicos y estadísticos para la implementación de sistemas de alerta temprana tiene una gran potencial de aplicación en nuestro país, lo que seguramente en un futuro cercano nos permitirá reducir las cuantiosas pérdidas anuales asociados a este tipo de fenómenos, como lo han hecho ya un gran número de países (IEWP, 2005).

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su ms sincero agradecimientos al Área Metropolitana del Valle de Aburrá, La Universidad Nacional de Colombia y al Fondo Corrigan de la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo por el apoyo brindado para el desarrollo de la presente investigación.

Referencias

Abe, K. 1997. A method of evaluating the effect of trees roots on preventing shallow-seated landslides. Bull. Forest. For. Prod. Res. Inst. No. 1 (373), 1105-1181.

Alcantara-Ayala, I. 2002. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. Geomorphology 47. Pág. 107-124.

Aleotti, P. 2004. A warning system for rainfall-induced shallow failures. Engineering Geology 73. Pág. 247-265.

Aleotti P.; Chowdhury R. 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Volume 58, Number 1. Pág. 21-44.

Amaral, P., Marques, R., Queiroz, G., Zezere, J.L., Marques, F. 2009. Distributed transient response modeling of rainfall-triggered shallow landslide for susceptibility assessment in Ribeira Quente valley (S. Miguel Island, Azores). En Landslide Processes: from geomorphologic mapping to dynamic modeling. France. Pág. 89-94.

Anderson S.A., Sitar N. 1995. Analysis of rainfall-induced debris flows. Journal of Geotechnical Engineering. Pág. 544-552.

Aristizábal, E., Gómez, J. 2007. Inventario de emergencias y desastres en el Valle de Aburrá: originados por fenómenos naturales y antrópicos en el periodo 1880-2007. Revista Gestión y Ambiente, Vol. 10 No 2. Pág. 17-30.

Barredo J. I., Benavides A., Hervas H., van Westen C.J. 2000. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Titajana basin, Gran Canaria Island, Spian. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 2, Issue 1, 9-23.

Baum R.L., Savage W.Z., Godt W. 2002. TRIGRS-a fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. Open file report 02-424 USGS.

Berne, A., Uijlenhoet, R., Troch, A. 2005- Similarity analysis of subsurface flow response of hillslopes with complex geometry. Water Resources Research 41. 10-1029/ 2004WR003629.

Beven, K. J. and Kirkby, M. J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, Hydrol. Sci. B., 24, 43-69.

Borga, M., Dalla Fontana, G., Daros, D., Marchi, L. 1998. Shallow landslide hazard assessment using a physically based model and digital elevation data. Environmental Geology 35 (2-3). Pág. 81-88.

_____., Gregoretti, C., Marchi, L. 2002a. Assessment of shallow landsliding by using a physically based model of hillslope stability. Hydrological Processes 16, 2833-2851.

_____., Cazorzi F. 2002b. Analysis of topographic and climatic control on rainfall-triggered shallow landsliding using a quasi-dynamic wetness index. Journal of Hydrology 268. Pág. 56-71.

Branb E.W., Premchitt, J., Phillipson, HB. 1984. Relationship between rainfall and lanslides in Hong Kong. Proceed. IV Int. Symp. Landslides, Toronto, v. 1, 377-384.

Brunsden, D. 2002. The fifth Glossop Lecture. Geomorphological roulette for engineers and planners: some insights into a old game. Quart. J. of Engng. Geol. 35, 101-142.

Brunsden, D., Prior, D. 1984. Slope instability. John Wile & Sons. 620 pág.

Burton, A., Bathurst, J.C. 1998. Physically based modeling of shallow landslide sediment yield at a catchment scale. Environmental Geology 35 (2-3). Pág. 89-99.

Caine, N. 1980. The rainfall intensity – duration control of shallow landslides and debris flows. Geografiska Annaler, 62A (1-2). Pág. 23-27.

Campbell, R.H. 1975. Soil slips, debris flows and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California, USGS professional Paper 851. 51 pág.

Cannon, S.H. 2005. A NOAA-USGS Demonstration flash-flood and debris-flow early warning system: U.S. Geological Survey fact Sheet 2005-3104.

Casadei, M., Dietrich, W. E., Millar, N. L. 2003. Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes. Earth Surf. Process. Landforms 28. Pág. 925-950.

Chacón, J., Irigaray, C., Fernandez, T., El Hamdouni, R. 2006. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Volume 65, Number 1. Pág. 341-411.

Chleborad A.F. 2000. Preliminary method for anticipating the occurrence of precipitation-induced landslides in Seattle, Washington. U.S. Geological Survey Open-file report 00-469.

_____ 2003. Preliminary evaluation of a precipitation threshold for anticipating the occurrence of landslides in the Seattle, Washington, Area. U.S. Geological Survey Open-file report 03-463.

Chia-Cheng Fan, Chih-Feng Su. 2008. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content. Ecological Engineering 33. Pág. 157-166.

Chiang S-H., Chang K-T. 2009. Application of radar data to modeling rainfall-induced landslides. Geomorphology 103. Pág. 299-309.

Cho, S.E. 2009. Infiltration analysis to evaluate the surficial stability of two layered slopes considering rainfall characteristics. Engineering Geology -02910. Doi 10.1016. 12 Pág.

_____, Lee S.R. 2001. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration. Computers and Geotechnics 28. Pág. 185-2008.

Cho S.E., Lee S.R. 2002. Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics. Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, Vol. 128, No. 9. Pág. 756-763.

Collins B.D., Znidarcic D. 2004. Stability analyses of rainfall induced landslides. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Pág. 362-371. Vol. 130, No. 4

Costa, J.E., Baker, V.R. 1981. Surficial Geology. Bulding with the Herat. John Wiley, New York.

Crozier, M. 1999. Prediction of rainfall-triggering landslides: a test of the antecedent water status model. Earth surface processes and landforms 24. Pág. 825-833.

Crosta, G. 1998. Regionalization of rainfall threshold: an aid for landslide susceptibility zonation. Enviromental Geology, 35, (2-3), 131-145.

Crosta, G., dal Negro, P. 2003. Observations and modeling of soil slip-debris flow initiation processes in pyroclastic deposits: the Sarno 1998 event. Natural Hazards and Earth System Sciences 3. Pág. 53-69.

Crosta, G., Frattini, P. 2003. Distributed modeling of shallow landslides triggered by intense rainfall. Natural Hazard and Earth System Sciences 3. Pág. 81-93.

_____. 2008. Rainfall-induced landslides and debris flows. Hydrological Processes 22, 473-477.

Cruden, D. M., Varnes D. J. 1996. Landslides types and processes In: Landslides investigation and mitigations. Transportation Research Board Special Report 24 (Turner and Schuster Eds), pág. 36-75.

Cruden D. M. 1991. A simple definition of a landslide. Bull Inter Assoc Engng Geol 43, 27-29.

Cruden, D.M.S., Thomson, B.D., Bomhold, J-Y., Locat, J., Evans, J.A., Heginbottom, K., Moran, D.J., Piper, R., Powell, R., Prior, D., Qugley, R.M. 1989. Landslides: extent and economic significance in Canada, en Landslides: extent and economic significance,editado por Brabb E.E: y Harrod B.L., Proc. 28th Intl. Geol. Congr. Symp. On Landslides, Wash. D.C: Pág. 1-23.

Dai, F.C., Lee, C.F. 2001. Frecuency – volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. Engineering Geology 59. Pág. 253-266.

D´Odorico, P., Fagherazzi, S., Rigon, R. 2005. Potential for landsliding: dependence on hyetograph characteristics. Journal of Geophysical Research 110. 10 pág.

Ekanayake J.C.; Phillips C.J. 1999. A model for determining thresholds for initiation of shallow landslides under near-saturated conditions in the East Coast region, New Zealand. Journal of Hydrology 38 (1): Pág. 1-28.

Finlay, P., J., Fell, R., Maguire, P., K. 1997. The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. Can. Geotech. Journal 34. Pág. 811-824.

Fernandes, N.F., Guimaraes, R.F., Gomes, R.A.T., Vieira, B.C., Montgomery, D.R., Greenberg, H. 2004. Catena 55. Pág. 163-181.

Frattini, P., Crosta, G., Fusi, N., Dal Negro, P. 2004. Shallow landslides in pyroclastic soils: a distributed modeling approach for hazard assessment. Engineering Geology 73. Pág. 277-295.

Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. 1977. Stress state variables for unsaturated soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE 103. Pàg. 447-466.

Fredlund, D.G., Rahardjo, H. 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Gabet, E., Burmank, D., Putkonen, J., Pratt-Sitaula, B., Ojha, T. 2004. Rainfall thresholds for landsliding in the Himalayas of Nepal. Geomorphology 63. Pág. 131-143.

Glade, T., Crozier, M., Smith, P. 2000. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical Antecedent Daily rainfall model. Pure applied geophysics 157. Pág. 1059-1079.

Giannecchini, R. 2006. Relationship between rainfall and shallow landslides in the southern Apuan Alps (Italy). Natural Hazard Earth System Science 6. Pág. 357-364.

Godt, J.W., Baum, R.L., Chleborad, A.F. 2006. Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA. Earth Surface Processes and Landforms 31. Pág. 97-110.

Godt J.W., Baum R.L., Savage W.Z., Salciarini D., Schulz W.H., Harp E.L. 2008. Transient deterministic shallow landslide modeling: requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework. Engineering Geology 102. Pág. 214-226.

Gofar, N., Lee, L.M:, Kassim, A. 2008. Response of Suction Distribution to Rainfall Infiltration in Soil Slope. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 13. Pág. 1-13.

Gostelow, P. 1991. Rainfall and landslides en Prevention and Control of landslides and other mass movements, editado por Almeida-Teixeira, M.; Fantechi, R., Oliveira, R., Gomez Coelho, A. Commis. European Communities, Brucelas. Pág. 139-161.

Gray, D.H. 1995. Influence of vegetation on the stability on the stability of slopes. En Vegetation and slopes stabilization, protection and ecology editado por Barker D.H. London. Pág. 2-23.

Green, W.H., Ampt, G. 1911. Studies of soil physics. Part 1. The flow of air and water through soils, J. Agricultural Soc., 4, 1-24.

Griffiths J.S., Mather A.E., Hart A.B. 2002. Landslide susceptibility in the Rio Aguas catchment SE Spain. Quart J Engng Geol 35, 9-17.

Grifiths J.A., Collison A.J.C. 1999. The validity of using a simplified distributed hydrological model for estimation of landslide probability under a climate change scenario. Proceedings of the 4th International Conference on GeoComputation. http://www.geocomputation.org/1999/index.htm.USA.

GEMMA (Grupo de Estándares para Movimientos en Masa). 2007. Movimientos en masa en la región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, Servicio Nacional de Geología y Minería Publicación Geológica Multinacional No. 4.

Guimaraes, F.R., Montgomery, D.R., Greenberg, H.M., Fernandes, N.F., Trancoso Gomes, R.A., de Carvalo O.A. 2003. Parameterization of soil properties for a model of topographic control son shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. Engineering Geology 69. Pág. 9-108.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P. 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. Geomorphology 31, 181-216.

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M. 2005. Definition of critical threshold for different scenarios. RISK-Advance Weather Forecast System to Advice on Risk Events and Management. 36 pág. http://palpatine.irpi.cnr.it/Geomorphology/projects1/completed/riskaware/doc/report_wp1_16.pdf/view.

Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., Colin P.S. 2008. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. Landslides 5. Pág. 3-17.

Hammond, C., Hall, D., Miller, S., Swetik, P. 1992. Level I stability Analysis (LISA) documentation for version 2.0 Gen. Tech. Rep. INT-285. For Serv. US Dep of Agric., Utah.

Harp E.L., Reid M.E., McKenna P.J., Michael J.A. 2009. Mapping of hazard from rainfall-triggered landslides in developing countries: examples from Honduras and Micronesia. Engineering Geology, in press.

Hengxing, l., Chenghu, Z., Lee, C.-, F., Wang S., Faquan, W., U. 2003. rainfall-induced landslide stability analysis in response to transient pore pressure- a case study of natural terrain landslide in Hong Kong. Science in China, Vol. 46. Supp. 52-68.

Hennrich, K., Crozier, M. 2004. A hillslope hydrology approach for catchment-scale slope stability analysis. Earth Surface Proccess and Landforms 29. Pág. 599-610.

Huat B.B.K., Ali F.H.J., Low T.H. 2006. Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability. Geotechnical and Geological Engineering 24. Pág. 1293-1306.

Hutchinson, J.N. 1995. Keynote paper, Landslide hazard assessment. Proceeding of the 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand 3, 1805-1841.

Jaiswal, P., van Westen C.J. 2009. Rainfall.based temporal probability for landslide initiation along transportation routes in Southern India. En Landslide Processes: from geomorphologic mapping to dynamic modeling. France. Pág. 139-143.

Iida, T. 1999. A stochastic hydro-geomorphological model for shallow landsliding due to rainstorm. Catena 34. Pág. 293-313.

_____. 2004. Theoretical research on the relationship between return period of rainfall and shallow landslides. Hydrological Process 18. Pág. 739-756.

Iiritano, G., Versace, P., Sirangelo, B. 1998. Real-time estimation of hazard for landslides triggered by rainfall. Environmental Geology 35 (2-3). Pág. 175-183.

International Early Warning Programme (2005). Dedicated to Reducing Disasters through Effective People-Centred Early Warning Systems, World Conference on Disaster Reduction, Kobe, Hyogo, Japan.

Iverson, R. 2000. Landslide triggering by rain infiltration. Water Resources Research, Vol. 36. No 7. Pág. 1897-1910.

Jakob, M., Weatherly, H. 2003. A hydroclimatic threshold for landslide initiation on the North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia. Geomorphology 54. Pág. 137-156.

Lan, H.X.; Lee, C.F., Zhou, C.H., Matin C.D. 2005. Dynamic characteristics analysis of shallow landslides in response to rainfall event using GIS. Environmental Geology 47. Pág. 254-267.

Lanni, C., Rigon, R., Cordano, E., Tarantino, A. 2009. Analysis of the effect pf normal and lateral subsurface water flow on the triggering of shallow landslides with a distributed hydrological model. En Landslide Processes: from geomorphologic mapping to dynamic modeling. France. Pág. 157-162.

Larsen, M., C. 2008. Rainfall-triggered landslides, anthropogenic hazards, and mitigation strategies. Advances in Geosciences, 14, pág. 147-153.

Li A.G., Yue L.G., Tham L.G., Lee C.F., Law K.T. 2005. Field-monitored variations of soil moisture and matric suction in a saprolite slope. Canadian Geotechnical Journal 42. Pág. 13-26.

Matsushi Y., Hattanji T., Matsukura Y. 2006. Mechanisms of shallow landslides on soil-mantled hillslopes with permeable and impermeable bedrocks in the Boso Peninsula, Japan. Geomorphology 76. Pág. 92-108.

Montero Olarte, J. 2005. MOviientso en masa en la región Andina. Memorias III Curso Latinoamericano de Movimientos en Masa. Pág. 13-16.

Montgomery, D. R., Sullivan, K., Greenberg, M. 1998. Regional test of a model for shallow landsliding. Hydrol. Process. 12, pág. 943-955.

Montgomery, D. R., Dietrich, W. E. 1994. A physically based model for the topographic control of shallow landsliding. Water Resource Research 30. Pág. 1153-1171.

Montgomery, D. R., Dietrich, W. E. 2002. Runoff generation in a steep, soil-mantled landscape, Water Resources Research. Vol. 38, pág. 1168.

Moore, I., E. M. O'Loughlin, G. J. Burch. 1988. A contour based topographic. model for hydrological and ecological applications, Earth Surf. Processes Landforms, 13(4), 305-320.

Moreno, H., A., Vélez, M., V., Montoya, J., D., Rhenals, R., L. 2006. La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intranual y diaria. Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia, No 5. Pág. 59-69.

Morrisey M.M.,Wieczorek G.F. Morgan B.A. 2001. A comparative analysis of hazard models for predicting debris flows in Madison County, Virginia. USGS open file report 01-0067.

Mukhlinsin, M., Kosugi, K., Satofuka, Y., Mizuyama, T. 2006. effects of soil porosity on slope stability and debris flow runout at a a weathered granitic hillslope. Vadose Zone Journal 5. Pág. 283-295.

Ng C.W.W., Shi Q. 1998. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage. Computers and Geotechnics, Vol. 22, No. 1. Pág. 1-28.

Normaniza O., Barakban S.S. 2006. Parameters to predict slope stability – soil water and root profiles. Ecological Engineering 28. Pág. 90-95.

Normaniza O., Faisal H.A. Barakban S.S. 2008. Engineering properties of *Leucaena leucocephala* for prevention of slope failure. Ecological Engineering 32. Pág. 215-221.

O'Loughlin, E. M. 1986. Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis, Water Resour. Res., 22, Pág. 794-804.

ONU (Organización de las Naciones Unidas). 1994. Population, environment and development. En: Proceedings of the United Nations Expert Group Meeting on Population, Environment and Development, 20–24 Enero 1992. New York.

Pack, R.T., Tarboton, D.G., Goodwin, C.N. 1998. The Sinmap approach to Terrain Stability Mapping. Proc. 8th Congress of the International Association of Engineering Geology. Vancouver.

Paniconi C., Troch P.A., van Loon E.E., Arno G., Hilberts J. 2003. Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes: 2. Intercomparison with a three-dimensional Richards equation model. Water Resource Research 39. No. 11, 1317.

Pellenq J., Kalma J., Boulet G. Saulnier G.M., Wooldridge S., Kerr Y. Chehbouni A. 2003. A disaggregation scheme for soil moisture based on topography and soil depth. Journal of Hidrology 276. Pág. 112-127.

Polemio M., Petrucci O. 2000. Rainfall as a Landslide Triggering Factor: An Overview of Recent International Research. Landslides in research, theory and practice. Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides, Caraiff. Pág. 1219-1226.

Pradel, D. 1993. Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 2. Pág. 315-332.

Pradel, D., Raad, G.1993. Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 2. Pág. 315-332.

Qiu C., Esaki T., Xie M., Mitani Y., Wang C. 2007. Spatio-temporal estimation of shallow landslide hazard triggered by rainfall

using a three-dimensional model. Environmental Geology 52. Pág. 1569-1579.

Quinn P., Beven K., Chevalier P., Planchon O. 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. Hydrological Processes 5. Pág. 59-79.

Rahardjo, H. 2000. Rainfall-induced slope failures. Research Rep. No. NSTB 17/6/16, Nanyang Technological Univ. Singapore.

_____, Leong, E.C., Rezaur, R.B. 2008. Effect of antecedent rainfall on pore-water pressure distribution characteristics in residual soil slopes under tropical rainfall. Hydrological Processes 22. Ág. 506-523.

Rahardjo, H., Li, X. W., Toll, D. G., Leong, E. C. 2001. The effect of antecedent rainfall on slope stability. Geotechnical and Geological Engineering 19. Pág. 371-399.

_____, Lim, T. T., Chang, M.F., Fredlund, D.G. 1995. Shear strength characteristics of a residual soil. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 32. 60-77.

Rahardjo H., Ong T.H., Rezaur R.B., Leong E.C. 2007. Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall. JOurna of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 12. Pág. 1532-1543.

Reichenbach, P., Cardinalli, M., De Vita, P., Guzzetti, F. 1998. Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (Central Italy). Environmental Geology 35 (2-3) Pág. 146-159.

Reid E.M. 1997. Slope instability caused by small variations in hydraulic conductivity. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Pág. 717-725.

Rezzoug A., Schumann A., Chifflard P., Zepp H. 2005. Field measurements of soil moisture dynamics and numerical simulation using the kinematic wave approximation. Advances in Water resources 28. Pág. 917-926.

Rosso, R. Rulli, M. C., Vannucchi, G. 2006. A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding. Water Resources Research 42- Pág. 16.

Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums, Physics, 1, 318-333, 1931.

Saldarriaga, R. 2003. Inventario y sistematización de los desastres naturales reportados en los municipios del Valle de Aburrá, entre los años 1900 y 2002. Tesis pregrado, Universidad EAFIT, 120 pp, Medellín, Colombia.

Salciarini D., Godt J.W., Savage W.Z., Baum R.L., Conversini P. 2008. Modeling landslide recurrence in Seattle, Washigton, USA. Engineering Geology 102. Pág. 227-237.

Setyo, A., Liao, H-J. 2008. Analysis of rainfall-induced infinite slope failure during typhoon using a hydrological-geotechnical model. Environ. Geol. DOI 10.1007/s00254-008-1215-2.

Sharma, R., H., Nakagawa, H. 2005. Shallow landslide modeling for heavy rainfall events. Annuals of Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ. 48.

Scheidegger, A. E. 1998. Tectonic predesign of mass movements, with examples from the Chinese Himalaya. Geomorphology 26, 37-46.

Schuster R. L. 1996. Socieconomic significance of landslides. In: A.K. Turner & R.L. Schuster (Eds.) Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, National Academy Press, Washington, DC, ISA. 129-177 pp.

Schuster, R.L., Highland, M.L. 2001. Socieconomic and environmental impacts of landslides in the Western Hemisphere. Open file report 01-0276. USGS.

Sidle R.C., Ochiai H. 2006. Landslides: processes, prediction, and land use. Water Resources Monograph 18. American Geophysical Union, Washington D.C.

Soeters, R., Van Westen, C.J. 1996. Slope instability recognition, analysis and zonation. En: A.K. Turner & R.L. Schuster (Eds) Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, National Academy Press, Washington, D.C., ISA. 129-177 pp.

Starkel L. 1979. The role of extreme meteorological events in the shaping of mountain relief. Geographica Polonica 41. Pág. 13-20.

Suarez D. J. 2008. Árbol de decisiones para la predicción y alera de deslizamientos activados por lluvias. XII Congreso Colombiano de Geotecnia. Bogotá. 6 pp.

Troch P.A., Paniconi C., van Loon E.E. 2003. Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes: 1. Formulation and characteristic response. Water Res Res 39. No. 11, 1316.

Troch P., van Loon E., Hilberts A. 2002. Analytical solutions to a hillslope-storage kinematic wave equation for subsurface flow. Advance Water Resource 25. Pág. 637-649.

Tsaparas, I., Rahardjo, H., Toll, D.G., Leong, E.C. 2002. Controlling parameters for rainfall-induced landslides. Computers and Geotechnics 29. Pág. 1-27.

Tsai, T., Yang, J. 2006. Modelling of rainfall-triggered shallow landslide. Environmental Geology 50- Pág. 525-534.

Talebi, A., Troch, P., A., Uijlenhoet, R. 2008. A steady-state analytical stability model for complex hillslopes. Hydrological Processes Volume 22 Issue 4. pág. 546-553.

Terlien, M. T. J. 1998. The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds. Environmental Geology 35 (2-3). Pág. 124-130.

_____. 1997. Hydrological landslide triggering in ash-covered slopes of Manizales (Colombia). Geomorphology 20. Pág. 165-175.

Torres, R., Dietrich, W., Montgomery, D. 1998. Unsaturated zone processes and the hydrologic response of a steep, unchanneled catchment. Water Resources Research 34 (8). Pág. 1865-1879.

Tosi M. 2007. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy). Geomorphology 87. Pág. 268-283.

UNFP (United Nation Population Fund). 2007. Estado de la Población Mundial 2007: liberar el potencial del crecimiento urbano. Informe de la UNPF, Pag. 108.

Van Beek L.P.H., van Asch TH.W.J. 2004. Regional assessment of the effects of land-use change on landslide hazard by means of physically based modeling. Natural Hazards 31: pág. 289-304.

Van Westen, C.J., van Duren, I., Kruse, H.M.G., Terlien, M.T.J. 1994. GISSIZ: training package for Geographic Information System in slope instability zonation. ITC Publication, No. 5 Vol. 1, Pág. 359.

Van Westen C.J., van Asch T.W.J., Soeters R. 2006. Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult?. Bull Eng Geol Env 65. Pág 167-184.

Varnes, D. J. 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. Natural Hazards, 3, UNESCO Press. Paris, 64 pp.

_____. 1978. Slope movement types and processes, en Landslide Analysis and Control, editada por Clark M. Special Report 176. Trans. Res. Board, National Academy of Science, National Res. Council, Washigton, D.C. Pág. 11-33.

_____. 1981. Slope stability problems of Circum-Pacific Region as related to mineral and energy rsources, Am. Assoc. Pet. Geol. Studies Geol., 12. Pág. 489-505.

Vélez, J., I., Villarraga, M., R., Álvarez, O., D., Alarcón, J., E., Quintero, F. 2004. Modelo distribuido para determinar la amenaza de deslizamiento superficial por efecto de tormentas intensas y sismos. XXI Congreso latinoamericano de hidráulica, Sao Pedro, Brasil.

Wang, F., Shibata, H. 2007. Influence of sol permeability on rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests. Can. Geotech. Journal 44. Pág. 1128-1136.

Wang, G., Sassa, K. 2003. Pore pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine particle content. Engineering Geology Vol. 69, Pág. 109-125.

Wieczorek, G.F. Morgan B.A., Campbell, R.H. 2000. Debris-flow hazards in the Blue Ridge of Cebtral Virginia, Environ. Eng. Geosci., 6 (1). Pág. 3-23.

Wilson, R. C., Wieczorek G. F. 1995. Rainfall thresholds for the initiation of debris flows at La Honda, California. *Environmental and Engineering Geoscience*; v. 1; No. 1; pág. 11-27.

Wu, W., Sidle, R. C. 1995. A distributed slope stability model for steep forested basins. Water resources Research, vol. 31, no. 8. Pág. 2097-2110.

Xie M., Esaki T., Cai M. 2004. A time-space based approach for mapping rainfall-induced shallow landslide hazard. Environmental Geology 46. Pág. 840-850.

Ziemer, R.R. 1981. Roots and the stability of forested slope. En Proceeding of the International Symposium on Erosion and sediment Transport in Pacific Rim Steeplands, International Associacion of Hydrological Sciences Vol. 132, Pág. 343-361.

Recibido: julio 16 de 2009.

Aceptado para su publicación: mayo 15 de 2010.

POLYNOMIALS WITH A RESTRICTED RANGE AND CURVES WITH MANY POINTS

By

César Andrade Ramos & Álvaro Garzón R.[1]

Abstract

Andrade Ramos, C. & A. Garzón R.: Polynomials with a restricted range and curves with many points. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (131): 229-239, 2010. ISSN 0370-3908.

In this paper we present new properties of restricted range polynomials to those developed by L. Rédei in ([1]), we exhibit a new method to determine their exponent set and use them to construct curves over finite fields with many rational points.

Key words: Finite fields, $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomial, Algebraic Curves, Rational Points.

Resumen

En este artículo presentamos nuevas propiedades de los polinomios de rango restringido a las estudiadas por L. Rédei en ([1]), exhibimos un nuevo método para el computo su conjunto de exponentes y usamos dichos polinomios para construir curvas sobre cuerpos finitos con muuchos puntos racionales.

Palabras clave: Cuerpos Finitos, $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polinomios, curvas algebraicas, puntos racionales.

1. Introduction

Let p be a prime number, $\mathbb{F}_q$ be the finite field with $q = p^n$ elements and let $\overline{\mathbb{F}}_q$ be an algebraic closure of $\mathbb{F}_q$. Given a polynomial $f(x, y) \in \mathbb{F}_q[x, y]$ which is irreducible over $\overline{\mathbb{F}}_q$, the set

$$\mathcal{C}_f = \{(\alpha, \beta) \in \mathbb{F}_q \times \overline{\mathbb{F}}_q \text{ such that } f(\alpha, \beta) = 0\}$$

1 Departamento de Matemáticas, Universidad del Valle, Apartado Aéreo 25360, Cali, Colombia E-mail: cesar@univalle.edu.co & alvarogr@univalle.edu.co

AMS Classification 2000: 14G05.

is an affine plane algebraic curve (over the finite field $\mathbb{F}_q$) and the points $P = (\alpha, \beta) \in \mathcal{C}_f$ such that $(\alpha, \beta) \in \mathbb{F}_q \times \mathbb{F}_q$ are called rational points over $\mathbb{F}_q$.

In 1940 **André Weil** proved the Riemann hypothesis for curves over finite fields. As an immediate corollary he obtained an upper bound for the number of rational points on a geometrically irreducible nonsingular curve $\mathcal{C}$ of genus g over a finite field of cardinality q, namely

$$|\mathcal{C}(\mathbb{F}_q)| \leq q + 1 + 2g\sqrt{q}, (*)$$

where $\mathcal{C}(\mathbb{F}_q)$ denotes the set of rational points of the curve $\mathcal{C}$.

The interest of polynomials with a restricted range resides mainly in its applications to the construction of curves over finite fields, such constructions are often performed using special polynomials $p(x) \in \mathbb{F}_q[x]$. The essential properties of $p(x)$ are sometimes of the following form:

Property I. One has that $p(\mathbb{F}_q) \subseteq \mathbb{F}_p$, and for most elements $\alpha \in \mathbb{F}_q$, α is a simple root of $p(x) - p(\alpha)$.

Property II. The set $\Sigma = \{\gamma \in \mathbb{F}_q; p(x) - \gamma$ has multiple roots in $\mathbb{F}_q\}$ has low cardinality, and one has a nice description of the multiplicities of the roots.

Polynomials that satisfy the property I are known as $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomials. The goal of this work is consider those introduced by **L. Rédei** in ([1]). We present a different point of view which allows us to prove new properties. (See Sections 2,3,4.)

We use $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomials again in Section 5 to construct curves over $\mathbb{F}_q$ with many rational points i.e, the cardinal of the set $\mathcal{C}(\mathbb{F}_q)$ is close to the Weil bound $(*)$.

2. Polynomials with a Restricted Range.

Definition 2.1. A polynomial $f(x) \in \mathbb{F}_q[x]$ is a restricted range polynomial if $f(\alpha) \in V \subsetneq \mathbb{F}_p$ for some proper subset of $\mathbb{F}_p$ and for all $\alpha \in \mathbb{F}_q$. In particular, when $V = \mathbb{F}_p$, we say that $f(x)$ is a $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomial.

Remark 2.1. A classical example of restricted range polynomial is the trace polynomial $Tr_{\mathbb{F}_q/\mathbb{F}_p}(x) = x^{p^{n-1}} + \cdots + x^p + x \in \mathbb{F}_q[x]$.

Definition 2.2. A nonzero $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomial $f(x) \in \mathbb{F}_q[x]$ will be called minimal, if $\deg(f(x)) \leq q - 1$ and none its proper partial sums is a $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomial.

Example 2.1. Let α a root of $f(x) = x^2 + x + 2 \in \mathbb{F}_3[x]$. Then, the polynomial $h(x) = \alpha^5 x + \alpha^7 x^3 \in \mathbb{F}_9[x]$ is a minimal $(\mathbb{F}_9, \mathbb{F}_3)$-polynomial. In fact, $\deg(h(x)) \leq 8$ and all its partial sums $\alpha^5 x$ and $\alpha^7 x^3$ are not $(\mathbb{F}_9, \mathbb{F}_3)$-polynomials.

The *p-adic development* of a positive integer a is given by

$$a = k_0 + p\, k_1 + p^2 k_2 + \cdots$$

where the *numerals* k_j satisfies $k_j < p$ for all $j = 0, 1, ...$

Let $k_0 + p\, k_1 + p^2 k_2 + \cdots + p^m k_m$, be the p-adic development of a. We will denote by $a^{\sqcap}$ the integer number obtained after applying the permutation

$$a^{\sqcap} = k_m + p\, k_0 + p^2 k_1 + \cdots + p^m k_{m-1},$$

and will be called *cyclic numeral permutation*. By $\sqcap^k$ we will understand the iteration k times of the numeral cyclic permutation. The *period* of a is the small natural integer $l(a)$ such that $a^{\sqcap^{l(a)}} = a$.

A *p-cycle* is an ordered set $(a, a^{\sqcap}, a^{\sqcap^2} ..., a^{\sqcap^{l(a)-1}})$.

The process of determining the p-cycles in the set $I_{q-1} = \{1, 2, \ldots, q-1\}$ play such an important role in this work, that we present in detail some properties related to these cycles as well as the form of determining them.

Let $G = \langle \sigma \rangle$ be a cyclic group of order n. The group G acts on the set I_{q-1} as follows

$$\rho : G \times I_{q-1} \to I_{q-1}$$
$$(\sigma^k, i) \mapsto (p^k \cdot i)_{q-1}, \quad k = 0, 1, \ldots, n-1$$

where, $(a)_{q-1}$ is the residual class a modulus $q - 1$.

Theorem 2.1. *For each $i \in I_{q-1}$, the p-cycle $(i, i^{\sqcap}, i^{\sqcap^2} ..., i^{\sqcap^{l(i)-1}})$, is the orbit of i with respect to the action ρ above.*

Proof: Let us suppose that $i \in \{0, 1, ..., q-1\}$ has p-adic development

$$i = i_0 + i_1 p + i_2 p^2 + \cdots + i_{n-1} p^{n-1},$$

then

$$i^{\sqcap} = i_{n-1} + i_0 p + i_1 p^2 + \cdots + i_{n-2} p^{n-1}.$$

Therefore, we have that

$$\begin{aligned} pi - i^{\sqcap} &= i_0 p + i_1 p^2 + \cdots + i_{n-1} p^n - \\ &\qquad (i_{m-1} + i_0 p + i_1 p^2 + \cdots + i_{n-2} p^{n-1}) \\ &= i_{n-1}(q-1) \end{aligned}$$

and in consequence $i^{\sqcap} \equiv pi \pmod{(q-1)}$. □

Corollary 2.1. *If $q = p^n$ and $\Im = \{a_1, a_2, \ldots, a_{l(\Im)}\}$ is a p-cycle, then $l(\Im)|n$.*

Proof: It is known ([7], II,4.3) that, if G acts on a set S, then $G_x = \{g \in G | \, g \cdot x = x\}$ is a subgroup of G and the cardinal number of the orbit $\dot{x} = \{g \cdot x | \, g \in G\}$ of x, is $(G : G_x)$, the index of G_x in G. □

Proposition 2.1. *Every p-cycle has the form*

$$\Im = (i, pi, \ldots, p^k i, (p^{k+1} i)_{q-1}, \ldots, (p^\ell i)_{q-1})$$

where $\ell + 1$ is the length of $\Im$ and $k \geq 0$ is the smallest integer satisfying $p^k i < q - 1 \leq p^{k+1} i$.

Proof: Since

$$p^{k+j} i = r(q-1) + (p^{k+j} i)_{q-1},$$

then

$$p^{k+j+1} i = p(p^{k+j} i) = (rp+m)(q-1) + (p(p^{k+j} i)_{q-1})_{q-1} \tag{1}$$

where

$$p(p^{k+j} i)_{q-1} = m(q-1) + (p(p^{k+j} i)_{q-1})_{q-1}. \tag{2}$$

This implies

$$(p^{k+j+1} i)_{q-1} = (p(p^{k+j} i)_{q-1})_{q-1}. \tag{3}$$

□

Definition 2.3. An integer i, generates the p-cycle $\Im$, if

$$\Im = (i, pi, \ldots, p^k i, (p^{k+1} i)_{q-1}, \ldots, (p^\ell i)_{q-1})$$

and $i < (p^{k+j} i)_{q-1}$ for $j = 1, \ldots, \ell - k$.

Example 2.2. The set $\{3, 6, 5\}$ is a 2-cycle of period 3, generated by 3. In fact, since

$$3 = 2^0 \cdot 1 + 2^1 \cdot 1 + 2^2 \cdot 0$$

$$6 = 2^0 \cdot 0 + 2^1 \cdot 1 + 2^2 \cdot 1$$

$$5 = 2^0 \cdot 1 + 2^1 \cdot 0 + 2^2 \cdot 1$$

we have $3^{\sqcap} = 6$, $6^{\sqcap} = 5$ and $5^{\sqcap} = 3$.

Example 2.3. In the following table we exhibit the different p-cycles for $p = 2, 3, 5$ and $q = p^n$ for some values of n.

$p = 2$

$q = 16$	(15)	
	(5, 10)	
	(1, 2, 4, 8)	(3, 6, 12, 9)
	(7, 14, 13, 11).	
$q = 64$	(63)	
	(21, 42)	
	(9, 18, 36)	(27, 54, 45)
	(1, 2, 4, 8, 16, 32)	(3, 6, 12, 24, 48, 33)
	(5, 10, 20, 40, 17, 34)	(7, 14, 28, 56, 49, 35)
	(11, 22, 44, 25, 50, 37)	(13, 26, 52, 41, 19, 38)
	(15, 30, 60, 57, 51, 39)	(23, 46, 29, 5843, 53)
	(31, 62, 65, 59, 55, 47)	

$p = 3$

$q = 27$	(13)	(26)
	(1, 3, 9)	(2, 6, 18)
	(4, 12, 10)	(5, 15, 19)
	(7, 21, 11)	(8, 24, 20)
	(14, 16, 22)	(17, 25, 23)
$q = 81$		
	(40)	(80)
	(10, 30)	(20, 60)
	(50, 70)	
	(1, 3, 9, 27)	(2, 6, 18, 54)
	(4, 12, 36, 28)	(5, 15, 45, 55)
	(7, 21, 63, 29)	(8, 24, 72, 56)
	(11, 33, 19, 57)	(13, 39, 37, 31)
	(14, 42, 46, 58)	(16, 4864, 32)
	(17, 51, 73, 59)	(22, 66, 38, 34)
	(23, 69, 47, 61)	(25, 75, 65, 35)
	(26, 78, 74, 62)	(41, 43, 49, 67)
	(44, 52, 76, 68)	(53, 79, 77, 71)

$p = 5$

$q = 25$	(6)	(12)
	(18)	(24)
	(1, 5)	(2, 10)
	(3, 15)	(4, 20)
	(7, 11)	(8, 16)
	(9, 21)	(13, 17)
	(14, 22)	(19, 23)

Definition 2.4. The *$p-$adic weigth* i_p of a number i is the bigger of the numerals present in their p-adic development.

The p-adic weight of a set A is the maximum of the set of p-adic weights of elements of A. Particularly we

will denote by f°_p} the p-adic weight of the exponent set of the polynomial $f(x)$ which we will call the p-ádic weight of $f(x)$.

Definition 2.5. A polynomial $f(x) \in \mathbb{F}[x]$ will be called a p-polynomial if their exponent set $\epsilon(f)$ satisfies

$$\epsilon(f) \subseteq \{0, 1, p, p+1, p^2, \ldots, p^2+p+1, p^3, \ldots, p^3+p^2+p+1, \ldots\}$$

Definition 2.6. A polynomial $f(x) \in \mathbb{F}[x]$ will be called p-linear if $f^{\circ_p} = 1$.

In accordance with (2.6) in later sections, we will be interested in determining those polynomials $f(x) \in \mathbb{F}[x]$ whose exponent set $\epsilon(f)$ has weight one, that is, we want to determine those elements $i \in I_{q-1}$, such that $i_p = 1$. By theorem (2.1) and proposition (2.1) will suffice to determine those elements that generate p-cycles of weight one. Firstly observe that we have $2^n - 1$ elements of I_{q-1} of weight one. We will proceed as follows: Let us denote by R_n the quotient ring

$$R_n := \mathbb{F}_2[x]/\langle x^n + 1\rangle$$

and by I^1_{q-1} the subset of I_{q-1} containing all elements of weight one. Then we have the following bijections

$$I^1_{q-1} \leftrightarrow \mathbb{F}_2^n \setminus 0 \leftrightarrow R_n$$

$$i = i_0 + \cdots + i_{n-1}p^{n-1} \mapsto (i_0, \cdots, i_{n-1}) \mapsto f_i(x) = \sum_{k=0}^{n-1} i_k x^k$$

with $f_i(p) = i$.

If $j \in I^1_{q-1}$ and $f_j(0) = 0$, then there exist $f_\ell(x) \in R_n$ such that $f_j(x) = x^r f_\ell(x)$ with $f_\ell(0) = 1$, this means that $j = p^r \ell$ where $\ell = f_\ell(p)$.

Now, we are interested in determining all elements $i \in I_{q-1}$ such that $i \equiv 1 (\mathrm{mod}\ p)$, equivalently, those polynomials $f(x) \in R_n$ such that $f(0) = 1$. This reduces our search to analyze $2^{n-1} - 2$ elements in R_n.

However, there exist polynomials $f(x) \in R_n$ such that $f(0) = 1$ but the element $f(p) \in I_{q-1}$ does not generates p-cycles.

For example, for $f(x) = x^3 + x^2 + 1 \in R_4$ with $p = 3$, $f(3) = 37$, but 37 does not generate a 3-cycle, in fact $37 \in (13, 31, 37, 39)$ which is generated by 13. This occurs because the polynomial $f(x) = x^3 + x^2 + 1$ can be seen as $x^3 g(x)$ with $g(x) = x^3 + x + 1$ and $g(3) = 13$.

More generally, if we denote by H the cyclic group $\{1, x, \ldots, x^{n-1}\}$, then we define an action of H over R_n as follows

$$\tau : H \times R_n \to R_n$$
$$(x^k, f(x)) \mapsto x^k \cdot f(x).$$

This action leads us to introduce the following terminology. If

$$f(x) = x^m + x^{m-j_1} + x^{m-j_2} + \ldots + x^{m-j_r} + 1 \in R_n$$

with $1 \le j_1 < j_2 < \ldots < j_r \le m-1$ and $m \le n-1$, we will say that $f(x)$ can be factored if there exist j_ℓ such that

$$\begin{aligned} f(x) &= x^m + x^{m-j_1} + \ldots + x^{m-j_\ell} + x^{n+m-j_{\ell+1}} \\ &\quad + \ldots + x^{n+m-j_r} + x^n \\ &= x^{m-j_\ell}\left(x^{j_\ell} + \ldots + x^{j_\ell - j_{\ell-1}} + 1 + x^{n+j_\ell-j_{\ell+1}} \right. \\ &\quad \left. + \ldots + x^{n-m+j_\ell}\right) \end{aligned}$$

and $n + j_\ell - j_{\ell+1} < m$ or $n + j_\ell - j_{\ell+1} = m$ and $n + j_\ell - j_{\ell+2} < m - j_1$ or $n + j_\ell - j_{\ell+1} = m$, $n + j_\ell - j_{\ell+2} = m - j_1$ and $n + j_\ell - j_{\ell+3} < m - j_3$ and so on.

If such j_ℓ doesn't exist, then we say that $f(x)$ cannot be factored, case in which $f(p)$ generates a p-cycle of weight one.

Observe that to say "that $f(x)$ can be factored", really means that $f(x)$ belongs to the orbit of some element of R_n.

Now we want to determine all polynomials $f(x) \in R_n$ such that $f(0) = 1$ that cannot be factored. Unfortunately to determine all the non factor bled polynomials is a very difficult task. The following lemmas give an approach to the solution of this problem.

Lemma 2.1. *$f(x) \in R_n$ with $f(0) = 1$ and $deg(f) \le n/2$ cannot be factored.*

Proof: Let $f(x) = x^m + x^{m-j_1} + x^{m-j_2} + \ldots + x^{m-j_r} + 1$ with $1 \le j_1 < j_2 < \ldots < j_r \le m-1$ and $m \le n/2$. If there exist j_ℓ such that

$$\begin{aligned} f(x) &= x^{m-j_\ell}\left(x^{j_\ell} + \ldots + x^{j_\ell - j_{\ell-1}} + 1 + x^{n+j_\ell-j_{\ell+1}} \right. \\ &\quad \left. + \ldots + x^{n-m+j_\ell}\right) = x^{m-j_\ell} g(x), \end{aligned}$$

then we have

$$\begin{aligned} \deg(g(x)) &= n + j_\ell - j_{\ell+1} \ge m + m + j_\ell - j_{\ell+1} > m \\ &= \deg(f(x)). \end{aligned}$$

□

Lemma 2.2. *Let $f(x) = x^m + x^{m-j_1} + x^{m-j_2} + \ldots + x^{m-j_r} + 1 \in R_n$ with $1 \leq j_1 < j_2 < \ldots < j_r \leq m-1$ and $m = n - k$. If there exist $\ell \in \{0, 1, \ldots, r\}$ (here $j_0 = 0$) such that $j_\ell - j_{\ell-1} > k$ then $f(x)$ can be factored.*

Proof: Observe that $f(x)$ can be write as

$$f(x) = x^m + x^{m-j_1} + x^{m-j_2} + \ldots + x^{m-j_{\ell-1}} + x^{n+m-j_\ell} + \ldots + x^{n+m-j_r} + x^n;$$

therefore

$$f(x) = x^{m-j_{\ell-1}} g(x)$$

with

$$g(x) = x^{j_{\ell-1}} + \ldots + 1 + x^{n-j_\ell+j_{\ell-1}} + x^{n-j_{\ell+1}+j_{\ell-1}} + \ldots + x^{n-m+j_{\ell-1}}$$

and $\deg(g(x)) = n - j_\ell + j_{\ell-1} < n - k$. □

Corollary 2.2. *Let $f(x) \in R_n$ with $\deg(f(x)) = n-1$ and $f(0) = 1$. Then $f(x)$ can be factored if and only if $f(x) \neq x^{n-1} + x^{n-2} + \ldots + x^2 + x + 1$.*

Proof: Since $f(x) \neq x^{n-1} + x^{n-2} + \ldots + x^2 + x + 1$, there exist j_ℓ such that $j_\ell - j_{\ell-1} > 1$, then the corollary follows by lemma (2.2). □

Corollary 2.3. *The polynomial $f(x) = x^m + x^{m-1} + \ldots + x + 1$ with $m \leq n-1$ cannot be factored.*

Proof: For all $1 \leq k \leq m-1$, the polynomial

$$x^k + x^{k-1} + \ldots + 1 + x^{n-1} + \ldots + x^{n+1-m+k} + x^{n-m+k}$$

has degree $n - 1 > m$. □

Corollary 2.4. *The polynomial $f(x) = x^m + 1$ with $m \leq n-1$ can be factored if and only if $2m > n$.*

Proof: It is clear since $f(x) = x^m(1 + x^{n-m})$. □

Example 2.4. As an illustration we will exhibit all the generating elements of cycles of weight one for $n = 4, 5$ and $p = 2, 3$. For $n = 4$, by lemma (2.1) and by corollary (2.2) the polynomials

$$f_1(x) = x^2 + x + 1 \quad f_4(x) = 1$$
$$f_2(x) = x^2 + 1 \quad f_5(x) = x^3 + x^2 + x + 1$$
$$f_3(x) = x + 1$$

cannot be factored, therefore each one of $f_i(p)$ generates cycles of weight one, then for $p = 2$ we have that the elements $\{7, 5, 3, 1, 15\}$ generate the cycles in I_{15}, for $p = 3$ the generating elements are $\{13, 10, 4, 1, 40\}$. For $n = 5$ by lemma(2.1) the polynomials

$$f_1(x) = x^2 + x + 1 \quad f_3(x) = x + 1$$
$$f_2(x) = x^2 + 1 \quad f_4(x) = 1$$

cannot be factored. By corollary (2.2), all the polynomials of degree 4 except the polynomial $f_5(x) = x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$ can be factored. Finally, analyzing the polynomials of degree 3 we have, by (2.3) that $f_6(x) = x^3 + x^2 + x + 1$ cannot be factored, by (2.2) $f_7(x) = x^3 + x + 1$ neither and neither the polynomial x^3+1 by (2.4)can be factored. Then remains only to analyze x^3+x^2+1 but $x^3+x^2+1 = x^2(x^3+x+1)$. Then for $p = 2$ the generating elements are $\{7, 5, 3, 1, 31, 15, 11\}$ and for $p = 3$ we have the set $\{13, 10, 4, 1, 121, 40, 31\}$

3. Characterization of restricted range polynomials

In this section we give a characterization of restricted range polynomials, for which initially we exhibit some properties of $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomials and finally in the example (3.1), we calculate explicitly all the $(\mathbb{F}_{16}, \mathbb{F}_2)$-polynomials.

Proposition 3.1. *([1]) $f(x) \in \mathbb{F}_q[x]$ is a $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomial if and only if*

$$x^q - x \mid f(x)^p - f(x)$$

Proof: If $f(x)$ is a $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomial, then $f(\gamma) \in \mathbb{F}_p$ for all $\gamma \in \mathbb{F}_q$, therefore $f(\gamma)^p = f(\gamma)$ for all $\gamma \in \mathbb{F}_q$. If we denote by $g(x) = f(x)^p - f(x)$ then $g(\gamma) = 0$ for all $\gamma \in \mathbb{F}_q$ and therefore $x^q - x \mid g(x)$. Conversely, if $x^q - x \mid f(x)^p - f(x) = g(x)$, since all root of $x^q - x$ is a root of $g(x)$, we have $g(\gamma) = 0$ for all $\gamma \in \mathbb{F}_q$ then $f(\gamma)^p = f(\gamma)$ for all $\gamma \in \mathbb{F}_q$ hence $f(\gamma) \in \mathbb{F}_p$ for all $\gamma \in \mathbb{F}_q$ from which we conclude that $f(x)$ is a $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomial. □

Proposition 3.2. *$(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomials are surjective.*

Proof: Let $q = p^n$, $f : \mathbb{F}_q \to \mathbb{F}_p$ be the polynomial application induced by $f(x)$ and suppose that there exist $\alpha \in \mathbb{F}_p \setminus \mathrm{Im}(f)$. Let $\{u_1, \ldots, u_t\}$ be the set of different zeros of $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomial $\Phi_\alpha(x) := f(x) - \alpha$, then there exist a finite extension, $\mathbb{F}_{q^m}/\mathbb{F}_q$ where the polynomial $\Phi_\alpha(x)$ decomposes completely, therefore $\mathbb{F}_{q^m} = \mathbb{F}_q(u_1, \ldots, u_t)$. Now by (3.1), there exist a polynomial $h(x) \in \mathbb{F}_q[x]$ such that

$$\Phi_\alpha^p(x) - \Phi_\alpha(x) = (x^q - x)h(x)$$

and since $u_i \notin \mathbb{F}_q$, $\Phi_\alpha(u_i) = 0$ implies that $h(u_i) = 0$. Consequently, again by (3.1), $f^p(u_i) - f(u_i) = 0$ that is $f(x)$ is a $(\mathbb{F}_{q^m}, \mathbb{F}_p)$-polynomial. On the other hand, since

$$\deg(f(x)) \leq p^n - 1 \text{ and } f^p(x) - f(x) = (x^{q^m} - x)h(x)$$

then

$$p \cdot \deg(f(x)) = q^m + \deg(h(x)) \geq q^m = p^{n \cdot m};$$

therefore

$$p^{n \cdot m} \leq \deg(f(x)) \leq p^n - 1,$$

and this is a contradiction. □

Since one of our goals is to know in detail the set of exponents of a $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomial of $\mathbb{F}_q[x]$, we shall concentrate on analyzing the behavior of their coefficients. The next statement is a first approximation to this objective.

Theorem 3.1. ([1]) *A polynomial $f(x) = \sum_{i=0}^{q-1} \alpha_i x^i \in \mathbb{F}_q[x]$ is a $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomial if and only if their coefficients satisfy the following conditions*

$$\alpha_j = \alpha_i^p \; j \equiv pi \, (mod(q-1)) \text{ for } i, j = 0, ..., q-2\,,$$
$$\alpha_{q-1} = \alpha_{q-1}^p\,. \tag{4}$$

□

Next statement allows us to rewrite the result equations (4) of the pass theorem through the use of the cyclic permutation $i^{\square}$.

Proposition 3.3. ([1]) *The conditions of conjugation in (4) can be write as follows*

$$\alpha_{i^{\square}} = \alpha_i^p\,,\; i = 0, \ldots, q-1 \tag{5}$$

Proof: Follows from the proofs of theorem (2.1) and theorem (3.1). □

Now, we are in condition of characterizing all $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomial. More precisely we have.

Theorem 3.2. ([1]) (Characterization of $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomials) *The exponent sets of the minimal $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomials are the p-cycles of set $\{0, ..., q-1\}$. For each p-cycle $\Im$ all the minimal $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomials with exponent set $\Im$ are*

$$f_{\Im}(x, \alpha) = \sum_{k=0}^{o(\Im)-1} \alpha^{p^k} x^{i^{\square^k}}\,,\; \alpha \in \mathbb{F}_{p^{o(\Im)}}^*$$

where i is an arbitrary but fixed representative of $\Im$. In addition we have all the different $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomials of less or equal degree to $q-1$ by sums of polynomials $f_{\Im}(x, \alpha)$ corresponding to different cycles.

Proof: Let $f(x) = \sum_{i=0}^{q-1} \alpha_i \, x^i$ a $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomial with $f^{\circ} \leq q-1$ where the coefficients $\alpha_0, ..., \alpha_{q-1}$ are all the solutions of system

$$S : \alpha_{i^{\square}} = \alpha_i^p\,,\; i = 0, \ldots, q-1.$$

For a cycle $\Im$ we shall denote by $S_{\Im}$ the subsystem of S consisting of the equations

$$\alpha_{i^{\square}} = \alpha_i^p\,,\; i \in \Im.$$

Since $i^{\square} \in \Im$, coefficients $\alpha_0, ..., \alpha_{q-1}$ present in $S_{\Im}$ are those with subscript in $\Im$ (i. e. the subsystems $S_{\Im}$ are independent from each other). By induction, $S_{\Im}$ is equivalent to the infinite system of equations

$$\alpha_{i^{\square^k}} = \alpha_i^{p^k}\,,\; i \in \Im\,,\; k = 1, 2, \ldots\,.$$

Then, taking i fixed for $k = l_p(i) = o(\Im)$ have that

$$\alpha_{i^{\square^k}} = \alpha_i\,.$$

Therefore

$$\alpha_i \in \mathbb{F}_{p^k} = \mathbb{F}_{p^{o(\Im)}}\,. \tag{6}$$

Conversely, if we have (5) it is enough to have the system of equations $\alpha_{i^{\square^k}} = \alpha_i^{p^k}$ with $i \in \Im$ fixed for the values $k = 1, ..., o(\Im) - 1$ and this equations can be considered as the explicit solution formulas of system $S_{\Im}$, where all the unknowns are in terms of α_i that are related with the condition $\alpha_i \in \mathbb{F}_{p^{o(\Im)}}$, then all $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomial are writen in the form

$$f(x) = \sum_{\Im \subseteq \{0, \ldots, q-1\}} \sum_{k=0}^{o(\Im)-1} \alpha_i^{p^k} x^{i^{\square^k}}\,.$$

□

Remark 3.1. Observe that in the proof of theorem (3.2) each cycle $\Im$ has associated a system of equations $S_{\Im}$ whose solution leads us precisely to determinate the coefficients of the minimal $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomials. One of such solutions is the trivial solution $\alpha_i^{\square^k} = 1$. The following result gives us an easy way to determine those $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomials such that $\alpha_i = 1$. Before stating the result we need to establish some notation: If $f(x) \in \mathbb{F}_q[x]$, then we will denote by

$$\mathcal{R}_{x^q - x}(f(x))$$

the remainder of the Euclidean division of the polynomial $f(x)$ by $x^q - x$.

Theorem 3.3. *With above notations. Let $a(x) = x^{p^{n-1}} + \ldots + x$ be the trace polynomial corresponding to the extension $\mathbb{F}_q/\mathbb{F}_p$, $i \in I_{q-1}$ and $\Im$ the p-cycle generated by i. If* length$(\Im) = n$, *then*

$$\mathcal{R}_{x^q - x}(a(x^i))$$

is the minimal $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomial corresponding to the p-cycle $\Im$.

Proof: We claim, that for all $f(x) \in \mathbb{F}_p[x]$ the polynomial $\mathcal{R}_{x^q-x}(a(f(x)))$ is a $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomial. In fact, by (3.1) it is enough to prove that

$$x^q - x | \mathcal{R}_{x^q-x}(a(f(x)))^p - \mathcal{R}_{x^q-x}(a(f(x))) .$$

Since

$$a(f(x)) = (x^q - x)h(x) + \mathcal{R}_\ell(a(f(x))) ,$$

for some polynomial $h(x) \in \mathbb{F}_p[x]$, then

$$\begin{aligned}\mathcal{R}_\ell(a(f(x)))^p - \mathcal{R}_\ell(a(f(x))) &= a(f(x))^p \\ &\quad - (x^q - x)^p \cdot h(x)^p - a(f(x)) \\ &\quad + (x^q - x) \cdot (x),\end{aligned}$$

and since $f(x) \in \mathbb{F}_p[x]$ and $a(T)$ is an additive polynomial, the claim follows. On the other hand it is easy to see that $\mathcal{R}_{x^q-x}(x^{p^{\ell} i}) = x^{(p^{\ell} i)_{q-1}}$ and therefore

$$\begin{aligned}a(x^i) = \sum_{\ell=0}^{n-1} x^{p^{\ell} i} &= \sum_{\ell=0}^{n-1} \left[(x^q - x) \cdot h_i(x) + \mathcal{R}_{x^q-x}(x^{p^{\ell} i}) \right] \\ &= \sum_{\ell=0}^{n-1} (x^q - x) \cdot h_i(x) + \sum_{\ell=0}^{n-1} x^{(p^{\ell} i)_{q-1}}\end{aligned}$$

Now by proposition (2.1) and comparing coefficients we have the result. □

The next proposition allows us to easily determine the non trivial solutions of the system of equations $S_{\Im}$.

Proposition 3.4. *Let $q = p^n, \Im_1, \ldots \Im_r$ be the different p-cycles of length $d|n$ and γ a group-primitive element of $\mathbb{F}_q$. Then, for each $1 \le t \le r$, the set*

$$\left\{ \gamma^i, \gamma^{i^{(p)}}, \ldots, \gamma^{i^{(p^{l(\Im_t)-1})}} \right\}$$

is a non trivial solution of system of equations:

$$S_{\Im_j} := \alpha_{i^{(p^k)}} = \alpha_i^{p^k} , \ i \in \Im_j , \ k = 1, 2, \ldots, l(\Im_j).$$

More over if $\Gamma = \left\{ \gamma^i, \gamma^{i^{(p)}}, \ldots, \gamma^{i^{(p^{l(\Im_t)-1})}} \right\}$ is solution of $S_{\Im_j}$ then

$$\Gamma^{(\ell)} := \left\{ \gamma^{i^{(p^{l(\Im_t)-1})}}, \gamma^i, \gamma^{i^{(p)}}, \ldots, \gamma^{i^{(p^{l(\Im_t)-2})}} \right\}$$

is a solution as well.

Proof: Follows from theorem (2.1). □

As an illustration of the previous theorem we will construct some examples of $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomials.

Example 3.1. Let $p = 2, q = 16$ and $f(x) = x^4 + x + 1 \in \mathbb{F}_2[x]$. If γ is a root of $f(x)$ then γ is a group-primitive element, that is, γ generates the cyclic group $\mathbb{F}_{16}^*$. By example (2.3) the 2-cycles in the set $\{0, 1, 2, ..., 15\}$ are

$$\varphi_1 = \{1, 2, 4, 8\} , \varphi_2 = \{3, 6, 12, 9\} , \varphi_3 = \{7, 14, 13, 11\}$$
$$\varphi_4 = \{5, 10\} , \varphi_5 = \{15\} , \varphi_6 = \{0\} .$$

Now, with the equations $\alpha_{i^{(p)}} = \alpha_i^p$ and φ_1 we have the system

$$S_1 : \quad \alpha_2 = \alpha_1^2 , \alpha_4 = \alpha_2^2 , \alpha_8 = \alpha_4^2 , \alpha_1 = \alpha_8^2 .$$

whose solution sets are

α_1	γ	γ^2	γ^4	γ^8	γ^3	γ^6	γ^{12}	γ^9	γ^7	γ^{14}	γ^{13}	γ^{11}
α_2	γ^2	γ^4	γ^8	γ	γ^6	γ^{12}	γ^9	γ^3	γ^{14}	γ^{13}	γ^{11}	γ^7
α_4	γ^4	γ^8	γ	γ^2	γ^{12}	γ^9	γ^3	γ^6	γ^{13}	γ^{11}	γ^7	γ^{14}
α_8	γ^8	γ	γ^2	γ^4	γ^9	γ^3	γ^6	γ^{12}	γ^{11}	γ^7	γ^{14}	γ^{13}

and whose the polynomials are

$$\begin{array}{ll}\gamma x + \gamma^2 x^2 + \gamma^4 x^4 + \gamma^8 x^8 & \gamma^2 x + \gamma^4 x^2 + \gamma^8 x^4 + \gamma x^8 \\ \gamma^4 x + \gamma^8 x^2 + \gamma x^4 + \gamma^2 x^8 & \gamma^8 x + \gamma x^2 + \gamma^2 x^4 + \gamma^4 x^8 \\ \gamma^3 x + \gamma^6 x^2 + \gamma^{12} x^4 + \gamma^9 x^8 & \gamma^6 x + \gamma^{12} x^2 + \gamma^9 x^4 + \gamma^3 x^8 \\ \gamma^{12} x + \gamma^9 x^2 + \gamma^3 x^4 + \gamma^6 x^8 & \gamma^9 x + \gamma^3 x^2 + \gamma^6 x^4 + \gamma^{12} x^8 \\ \gamma^7 x + \gamma^{14} x^2 + \gamma^{13} x^4 + \gamma^{11} x^8 & \gamma^{14} x + \gamma^{13} x^2 + \gamma^{11} x^4 + \gamma^7 x^8 \\ \gamma^{13} x + \gamma^{11} x^2 + \gamma^7 x^4 + \gamma^{14} x^8 & \gamma^{11} x + \gamma^7 x^2 + \gamma^{14} x^4 + \gamma^{13} x^8 .\end{array}$$

If we take now φ_2 to have the system $S_2 : \quad \alpha_6 = \alpha_3^2 , \ \alpha_{12} = \alpha_6^2 , \ \alpha_9 = \alpha_{12}^2 , \ \alpha_3 = \alpha_9^2$ which solution sets

α_3	γ	γ^2	γ^4	γ^8	γ^3	γ^6	γ^9	γ^{12}	γ^7	γ^{11}	γ^{13}	γ^{14}
α_6	γ^2	γ^4	γ^8	γ	γ^6	γ^{12}	γ^3	γ^9	γ^{14}	γ^7	γ^{11}	γ^{13}
α_9	γ^8	γ	γ^2	γ^4	γ^9	γ^3	γ^{12}	γ^6	γ^{11}	γ^{13}	γ^{14}	γ^7
α_{12}	γ^4	γ^8	γ	γ^2	γ^{12}	γ^9	γ^6	γ^3	γ^{13}	γ^{14}	γ^7	γ^{11}

which generate the polynomials

$$\begin{array}{ll}
\gamma x^3+\gamma^2x^6+\gamma^8x^9+\gamma^4x^{12} & \gamma^2x^3+\gamma^4x^6+\gamma x^9+\gamma^8x^{12}\\
\gamma^4x^3+\gamma^8x^6+\gamma^2x^9+\gamma x^{12} & \gamma^8x^3+\gamma x^6+\gamma^4x^9+\gamma^2x^{12}\\
\gamma^3x^3+\gamma^6x^6+\gamma^9x^9+\gamma^{12}x^{12} & \gamma^6x^3+\gamma^{12}x^6+\gamma^3x^9+\gamma^9x^{12}\\
\gamma^9x^3+\gamma^3x^6+\gamma^{12}x^9+\gamma^6x^{12} & \gamma^{12}x^3+\gamma^9x^6+\gamma^6x^9+\gamma^3x^{12}\\
\gamma^7x^3+\gamma^{14}x^6+\gamma^{11}x^9+\gamma^{13}x^{12} & \gamma^{11}x^3+\gamma^7x^6+\gamma^{13}x^9+\gamma^{14}x^{12}\\
\gamma^{13}x^3+\gamma^{11}x^6+\gamma^{14}x^9+\gamma^7x^{12} & \gamma^{14}x^3+\gamma^{13}x^6+\gamma^7x^9+\gamma^{11}x^{12}.
\end{array}$$

Last, take the set φ_3 to have the system

$$S_3: \quad \alpha_{14}=\alpha_7^2 \qquad \alpha_{13}=\alpha_{14}^2 \qquad \alpha_{11}=\alpha_{13}^2 \qquad \alpha_7=\alpha_{11}^2$$

which solution sets

α_7	γ	γ^2	γ^4	γ^8	γ^3	γ^6	γ^9	γ^{12}	γ^7	γ^{11}	γ^{13}	γ^{14}
α_{11}	γ^8	γ	γ^2	γ^4	γ^9	γ^3	γ^{12}	γ^6	γ^{11}	γ^{13}	γ^{14}	γ^7
α_{13}	γ^4	γ^8	γ	γ^2	γ^{12}	γ^9	γ^6	γ^3	γ^{13}	γ^{14}	γ^7	γ^{11}
α_{14}	γ^2	γ^4	γ^8	γ	γ^6	γ^{12}	γ^3	γ^9	γ^{14}	γ^7	γ^{11}	γ^{13}

They provide the polynomials

$$\begin{array}{ll}
\gamma x^7+\gamma^8x^{11}+\gamma^4x^{13}+\gamma^2x^{14} & \gamma^2x^7+\gamma x^{11}+\gamma^8x^{13}+\gamma^4x^{14}\\
\gamma^4x^7+\gamma^2x^{11}+\gamma x^{13}+\gamma^8x^{14} & \gamma^8x^7+\gamma^4x^{11}+\gamma^2x^{13}+\gamma x^{14}\\
\gamma^3x^7+\gamma^9x^{11}+\gamma^{12}x^{13}+\gamma^6x^{14} & \gamma^6x^7+\gamma^3x^{11}+\gamma^9x^{13}+\gamma^{12}x^{14}\\
\gamma^9x^7+\gamma^{12}x^{11}+\gamma^6x^{13}+\gamma^3x^{14} & \gamma^{12}x^7+\gamma^6x^{11}+\gamma^3x^{13}+\gamma^9x^{14}\\
\gamma^7x^7+\gamma^{11}x^{11}+\gamma^{13}x^{13}+\gamma^{14}x^{14} & \gamma^{11}x^7+\gamma^{13}x^{11}+\gamma^{14}x^{13}+\gamma^7x^{14}\\
\gamma^{13}x^7+\gamma^{14}x^{11}+\gamma^7x^{13}+\gamma^{11}x^{14} & \gamma^{14}x^7+\gamma^7x^{11}+\gamma^{11}x^{13}+\gamma^{13}x^{14}.
\end{array}$$

4. Stem Polynomials.

The present section is dedicated to the study of a particular class of $(\mathbb{F}_q,\mathbb{F}_p)$-polynomials: the Stem polynomials, we also show additional properties to the already displayed for restricted range polynomials.

Definition 4.1. A polynomial $f(x)\in\mathbb{F}_q[x]$ is a *Stem* polynomial for $p\mid_1 q$ if

$$f^\circ=\frac{q-1}{p-1},\ f^{\circ_p}=1,,\ x^q-x\mid f(x)^p-f(x).$$

In accordance with definition (4.1) the Stem polynomials are p-linear and restricted range polynomials.

Example 4.1. Let $p=3, q=3^2=9$ and α a root of the irreducible polynomial $x^2+x+2\in\mathbb{F}_3[x]$. The polynomial

$$h(x)=x^4+\alpha^6x^3+\alpha^2x+2\in\mathbb{F}_9[x]$$

is a Stem polynomial. Indeed, observe that

$$4=3^0\cdot 1+3^1\cdot 1$$

$$3=3^0\cdot 0+3^1\cdot 1$$

$$1=3^0\cdot 1+3^1\cdot 0$$

then $h^{\circ_p}=1$ and also $\dfrac{9-1}{3-1}=4$. From other side

$$\begin{aligned}
h(x)^3-h(x)&=(x^4+\alpha^6x^3+\alpha^2x+2)^3\\
&\quad-(x^4+\alpha^6x^3+\alpha^2x+2)\\
&=x^{12}+\alpha^{18}x^9+\alpha^6x^3+8\\
&\quad-(x^4+\alpha^6x^3+\alpha^2x+2)\\
&=x^{12}+\alpha^2x^9-x^4-\alpha^2x\\
&=(x^3+\alpha^2)(x^9-x).
\end{aligned}$$

Note that examining divisibility in the previous example we have that $h(x)^3-h(x)=(x^3+\alpha^2)(x^9-x)=h'(x)(x^9-x)$. This fact is not casual, more precisely we have next proposition.

Proposition 4.1. *If $f(x)\in\mathbb{F}_q[x]$ is a Stem polynomial, then*

$$f(x)^p-f(x)=(x^q-x)f'(x).$$

Proof: By (3.2) and (2.1) exist $\Im_1, \ldots \Im_t$ p-cycles in I_{q-1} such that $f(x)$ is the sum of polynomials of type

$$\sum_{k=0}^{o(\Im_j)-1} \alpha^{p^k} x^{(p^k i_j)_{q-1}}, \alpha \in \mathbb{F}^*_{p^{o(\Im_j)}},$$

where $\Im_j$ is a p-cycle of length $\ell_j + 1$ generate by i_j.

We can assume without loss of generality, that there exist a p-cycle $\Im \subseteq I_{q-1}$ generate by i of length $\ell + 1$ such that

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\ell} \alpha^{p^k} x^{(p^k i)_{q-1}}, \ \alpha \in \mathbb{F}^*_{p^{\ell+1}},$$

as a consequence,

$$f(x)^p - f(x) = \sum_{k=0}^{\ell-k} \alpha^{p^{k+j+1}} \left(x^{p(p^{k+j} i)_{q-1}} - x^{(p^{k+j+1} i)_{q-1}} \right)$$

with k as in the proposition (2.1). Now, the term

$$\alpha^{p^{k+j+1}} \left(x^{p(p^{k+j} i)_{q-1}} - x^{(p^{k+j+1} i)_{q-1}} \right) \tag{7}$$

of $f(x)^p - f(x)$ can be factored as

$$\begin{aligned} &\alpha^{p^{k+j+1}} x^{p^{k+j+1} - (rp+m)(q-1)-1} \\ &\quad \times (x^q - x) \left(x^{(q-1)(m-1)} + \ldots + x^{q-1} + 1 \right), \end{aligned} \tag{8}$$

equality which shows that $(x^q - x) \mid f(x)^p - f(x)$. By hypothesis $\Im$ is generated by an element $i \in I_{q-1}$ of weight 1. We can assume now that i not is trivial, that is $i \neq p^{n-1} + \ldots + p + 1$ and that k, the minor integer such that $p^k i < q - 1 \leq p^{k+1} i$, not is null. Since $p^{k+j} i$ have weight 1 for all $j = 1, \ldots, \ell - k$ then

$$\begin{aligned} q - 1 < p^{k+j} i &\leq p^{n-1} + p^{n-2} + \ldots + p \\ &< p^n + p^{n-1} + p^{n-2} + \ldots + p; \end{aligned}$$

therefore

$$\begin{aligned} p^{k+j} i &< p^n - 1 + p^{n-1} + \ldots + p - 1 \\ &= (q-1) + (p^{n-1} + p^{n-2} + \ldots + p - 1), \end{aligned}$$

thus

$$(p^{k+j} i)_{q-1} \leq p^{n-1} + \ldots + p - 1 < p^{n-1} + \ldots + p$$

like this

$$p(p^{k+j} i)_{q-1} < (q-1) + (p^{n-1} + \ldots + p^2 + 1).$$

This implies that the value of m in equation (2) is 1 and therefore equation (8) is expressed as

$$\alpha^{p^{k+j+1}} x^{p^{k+j+1} - (rp)(q-1)-1} (x^q - x). \tag{9}$$

Finally it is enough to observe that in agreement with equations (1) and (3)

$$p^{k+j+1} - (rp)(q-1) - 1 = (p^{k+j+1})_{q-1} - 1.$$

And this proof that (9) is exactly the derivative of (7) □

Remark 4.1. In the proof of theorem (4.1) we have a factorization of any $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$ polynomial which is more precise that the one obtained in theorem (3.1).

In next example we construct systematically all Stem polynomials in $\mathbb{F}_3$.

Example 4.2. Let $p = 3, q = p^2 = 9$ and θ root of polynomial $p(x) = x^2 + x + 2$. Since $p(x)$ is irreducible in $\mathbb{F}_3$ and $ord(\theta)$ in $\mathbb{F}_9^*$ is 8, then θ is a *group-primitive* element, that is, θ generates $\mathbb{F}_9^*$. More precisely

$$\mathbb{F}_9 = \{0, 1 = \theta^8, 2 = \theta^4, \theta, \theta^2, \theta^3, \theta^5, \theta^6, \theta^7\}.$$

Now, since $\dfrac{q-1}{p-1} = \dfrac{p^2-1}{p-1} = p + 1$ then the Stem polynomials in $\mathbb{F}_3$ are of degree 4.

In addition note that Stem polynomials are $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomials, thus a first step for his construction should be guided by theorem (3.2), that is, a Stem polynomial is in general a sum of $(\mathbb{F}_9, \mathbb{F}_3)$-polynomials which are induced by 3-cycles of weight one. According with the example (2.3) we have two weight one cycles in I_8 namely (4) and (1, 3) which induce $(\mathbb{F}_9, \mathbb{F}_3)$-polynomials x^4 and $\lambda^3 x^3 + \lambda x + \beta$ with $\lambda \in \mathbb{F}_9$ and $\beta \in \mathbb{F}_3$. Then the general form of the polynomials is given by the expression

$$f(x) = x^4 + \lambda^3 x^3 + \lambda x + \beta.$$

From which a total of 27 Stem polynomials are obtained. We consign them in next table:

Stem Polynomials in $\mathbb{F}_9[x]$	
Polynomial	Factorization in $\mathbb{F}_9[x]$
x^4	x^4
x^4+1	$(x-\theta)(x-\theta^3)(x-\theta^5)(x-\theta^7)$
x^4+2	$(x+1)(x+2)(x-\theta^2)(x-\theta^6)$
x^4+x^3+x	$x(x+2)(x-\theta^5)(x-\theta^7)$
x^4+x^3+x+1	$(x+1)^4$
x^4+x^3+x+2	$(x-\theta^2)(x-\theta^6)(x-\theta)(x-\theta^3)$
x^4+2x^3+2x	$x(x+1)(x-\theta)(x-\theta^3)$
x^4+2x^3+2x+1	$(x+2)^4$
x^4+2x^3+2x+2	$(x-\theta^2)(x-\theta^6)(x-\theta^5)(x-\theta^7)$
$x^4+\theta^3x^3+\theta x$	$x(x-1)(x-\theta^2)(x-\theta^3)$
$x^4+\theta^3x^3+\theta x+1$	$(x-2)(x-\theta)(x+\theta)(x-\theta^6)$
$x^4+\theta^3x^3+\theta x+2$	$(x-\theta^7)^4$
$x^4+\theta^6x^3+\theta^2x$	$x(x-\theta^3)(x-\theta^5)(x-\theta^6)$
$x^4+\theta^6x^3+\theta^2x+1$	$(x-\theta^2)^4$
$x^4+\theta^6x^3+\theta^2x+2$	$(x-1)(x-2)(x-\theta)(x-\theta^7)$
$x^4+\theta x^3+\theta^3x$	$x(x-1)(x-\theta)(x-\theta^6)$

Stem Polynomials in $\mathbb{F}_9[x]$	
Polynomial	Factorization in $\mathbb{F}_9[x]$
$x^4+\theta x^3+\theta^3x+1$	$(x-2)(x-\theta^2)(x-\theta^3)(x-\theta^7)$
$x^4+\theta x^3+\theta^3x+2$	$(x-\theta^5)^4$
$x^4+\theta^7x^3+\theta^5x$	$x(x-2)(x-\theta^6)(x-\theta^7)$
$x^4+\theta^7x^3+\theta^5x+1$	$(x-1)(x-\theta)(x-\theta^2)(x-\theta^5)$
$x^4+\theta^7x^3+\theta^5x+2$	$(x-\theta^3)^4$
$x^4+\theta^2x^3+\theta^6x$	$x(x-\theta)(x-\theta^2)(x-\theta^7)$
$x^4+\theta^2x^3+\theta^6x+1$	$(x-\theta^6)^4$
$x^4+\theta^2x^3+\theta^6x+2$	$(x-1)(x-2)(x-\theta^3)(x-\theta^5)$
$x^4+\theta^5x^3+\theta^7x$	$x(x-2)(x-\theta^2)(x-\theta^5)$
$x^4+\theta^5x^3+\theta^7x+1$	$(x-1)(x-\theta^3)(x-\theta^6)(x-\theta^7)$
$x^4+\theta^5x^3+\theta^7x+2$	$(x-\theta)^4$

Remark 4.2. In accordance with the previous table we could expect that the Stem polynomials have all roots in $\mathbb{F}_q$. Unfortunately in general this is not true, for example for $p=3$ and $n=5$ the 3-cycle $(4,12,36,108,82)$ have 3-adic weight 1, nevertheless the polynomial $f(x)=x^4+x^{12}+x^{36}+x^{82}+x^{108}+x^{121}$ is a Stem polynomial with three zeros of multiplicity three in $\mathbb{F}_{27}$ and six zeros of multiplicity three in $\mathbb{F}_{729}$

5. An Application: Curves with many Rational Points over Finite Fields

There are many methods used for the construction of curves with many rational points, however, some these methods do not provides explicit equations of curves. The interest for obtaining explicit equations is that one of the main applications of these curves with many points is the construction of good codes ([4]), i.e., codes with goods parameters. This requires having an equation that describes the curve. Among the methods used to construct them are via Kummer extensions, Artin-Schreirer extensions and Abelian elementray p extensions. We will give a brief explanation of why we expect that $(\mathbb{F}_q,\mathbb{F}_p)$-polynomials allow us obtain goods curves.

Let $g(x)$ be a $(\mathbb{F}_q,\mathbb{F}_p)$-polynomial. By Proposition (3.2) there exist $\gamma\in\mathbb{F}_p$, such that polynomial $\ell(x)=g(x)-\gamma$ has at least $\deg(g(x))$ roots in $\mathbb{F}_q$.

Now if we take a polynomial $f(x)\in\mathbb{F}_q[x]$ such that $\mathrm{GCD}(f(x),\ell(x))=1$, then by the division algorithm there exist polynomials

$$f(x)=\ell(x)h(x)+\mathcal{R}_\ell(f(x))$$

with $\deg(\mathcal{R}_\ell(f(x))) < \deg(\ell(x))$. Then the rational function

$$\mu(x) := \frac{f(x)}{\mathcal{R}_\ell(f(x))}$$

takes the value one in the set $\Omega_\ell := \{\alpha \in \mathbb{F}_q | \ell(\alpha) = 0\} = \{\alpha \in \mathbb{F}_q | f(\alpha) = \gamma\}$. Therefore if $r|q-1$, then we have at least $r \cdot \deg(g(x))$ points $P = (\alpha, \beta) \in \mathbb{F}_q \times \mathbb{F}_q$ such that $\beta^r = \mu(\alpha) = 1$. Curves of this type were considered in ([2]).

On the other hand, since for all $\alpha \in \mathbb{F}_q$, $g(\alpha) \in \mathbb{F}_p$ then the equation

$$Tr_{\mathbb{F}_q/\mathbb{F}_p}(y) = y^{p^{n-1}} + \ldots + y^p + y = g(\alpha)$$

has p^{n-1} solutions in $\mathbb{F}_q$, therefore we have $p^{n-1} \cdot q$ points $P := (\beta, g(\alpha))) \in \mathbb{F}_q \times \mathbb{F}_q$ such that $Tr_{\mathbb{F}_q/\mathbb{F}_p}(\beta) = g(\alpha)$.

Finally, since the trace function $Tr_{\mathbb{F}_q/\mathbb{F}_p}$ is surjective, then if we choose a suitable $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomial $g(x)$ such that $\mathrm{GCD}(g(x), Tr_{\mathbb{F}_q/\mathbb{F}_p}(x)) = h(x) \neq 1$, we have that $\deg(h(x)) \geq 1$ and therefore for all elements $\alpha \in \mathbb{F}_q$ such that $h(\alpha) = 0$ we have p elements $\beta \in \mathbb{F}_q$ such that $\beta^p - \beta = \alpha$.

The above discussion leads us to try to construct curves over the finite field $\mathbb{F}_q$ defined by three types of equations, namely:

$$\text{(I)} \quad y^r = \mu(x) := \frac{f(x)}{\mathcal{R}_\ell(f(x))} \qquad r|q-1$$

$$\text{(II)} \quad Tr_{\mathbb{F}_q/\mathbb{F}_p}(y) = y^{p^{n-1}} + \ldots + y^p + y = g(x)$$

$$\text{(III)} \quad y^p - y = x$$

Constructions of type (I) will be called Constructions via Kummer Extensions, type (II) Abelian elementary p extensions, and of type (III) Artin-Schreirer extensions.

5.1. **Examples.** In this section we exhibit some examples of curves with goods parameters in whose construction we used $(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_p)$-polynomials

Example 5.1. In this example we will construct a curve $\mathbb{C}$ over $\mathbb{F}_9$ with genus $g(C) = 5$ and 32 rational points. Let us to consider the Stem polynomial $\ell(x) = x^4 + \theta^7 x^2 + \theta^2$ and $f(x) = x^4 + \theta^7 x^2$ with θ as in the example (4.2), then $\mathcal{R}_\ell(f(x)) = -\theta^2$, and therefore

$$\mu(x) = \frac{f(x)}{\mathcal{R}_\ell(f(x))} = \frac{x^2(x^2 + \theta^7)}{-\theta^2}$$

Now since $-\theta^2 = \theta^6$ and $(\theta^6)^{-1} = \theta^2$, then $\mu(x) = \theta^2 x^2 (x^2 + \theta^7)$. Now, if we consider the function fields $\mathbb{F}_9(x, y)/\mathbb{F}_9$ defined by the Kummer's equation

$$y^8 = \mu(x) = \theta^2 x^2 (x^2 + \theta^7)$$

we have that the induced curve $\mathbb{C}$ has genus $g(C) = 5$ and 32 rational points. This is the best value known for $(q, g) = (9, 5)$ in [3].

Example 5.2. Here we are going to construct a curve $\mathbb{C}$ over the finite field $\mathbb{F}_{32}$ having genus $g(C) = 60$ and 513 rational points, this number is very close to the Ihara's bound, see ([5]).

Let us to consider the Stem polynomial $s(x) = \theta x^5 + \theta^2 x^{10} + \theta^4 x^{20} + \theta^8 x^9 + \theta^{16} x^{18}$ with θ a root of the irreducible polynomial $g(x) = x^5 + x^2 + 1$. Then the Abelian elementary 2 extension given by the equation

$$\begin{aligned} y^{16} + y^8 + y^4 + y^2 + y &= s(x) \\ &= \theta x^5 + \theta^2 x^{10} + \theta^4 x^{20} + \theta^8 x^9 + \theta^{16} x^{18} \end{aligned}$$

defines a function field over the finite field $\mathbb{F}_{32}$ whose genus is 60 and the number of rational places is 513.

References

[1] **L. Rédei**, *Lacunary polynials over finite fields*, North-Holland, Amsterdam (1973).

[2] **A. Garcia and A. Garzón**, *On Kummer Covers whith many Points* J.P.A.A. **185** (2003), 177–192

[3] **G. van der Geer & M. van der Vlugt**, *Tables for the function $N_q(g)$*, available at http://www.wins.uva.nl/ geer.

[4] **V. D. Goppa**, *Codes on algebraic curves*. Sov. Math. Dokl. **24** (1981), pp. 170–172.

[5] **Y. Ihara**,*Some remarks on the number of rational points of algebraic curves over finite fields*, J. Fac. Sci. Tokyo **28** (1981), 721–724.

[6] **H. Stichtenoth**, *Algebraic Function Fields and Codes*, Springer–Verlag, Berlin, 1993.

[7] **T. Hungerford**, *Algebra*, Springer–Verlag, Berlin, 1974.

Recibido el 4 de noviembre de 2009

Aceptado para su publicación el 21 de agosto de 2010

USO DE MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS COMO HERRAMIENTAS PARA EVALUAR PARÁMETROS DE INTERFASE EN SISTEMAS HETEROGÉNEOS METAL/MEDIO ACUOSO

Por

Enrique Vera López*

Resumen

E. Vera López: Uso de métodos electroquímicos como herramientas para evaluar parámetros de interfase en sistemas heterogéneos, metal /medio acuoso. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (131): 241-251, 2010. ISSN 0370-3908.

Cuando una superficie metálica entra en contacto con un medio acuoso, se da inicio a serie procesos termodinámicos y cinéticos responsables de la formación de un interfase electroquímica, la cual es la encargada de controlar los procesos de óxido/reducción que están relacionadas con la transferencia de carga y de masa en la vecindad próxima al metal. Por las características eléctricas de la interfase, esta es normalmente modelada mediante un arreglo eléctrico de elementos pasivos (resistencias, y elementos de fase constante), cuyas magnitudes definen tanto los aspectos termodinámicos como cinéticos en las reacciones de intercambio y/o transferencia de carga y masa. Al poder ser simulada esta interfase electroquímica con elementos eléctricos, hace que se puedan aplicar los conceptos de polarización para determinar estos parámetros de interfase mediante el uso; ya sea de campos eléctricos estacionarios (DC) o campos eléctricos variables en el tiempo y frecuencia (AC). El tipo de polarización aplicado (tanto magnitud como tipo de señal) define toda una serie de técnicas electroquímicas que permiten establecer con alto grado de precisión el estado de la interfase. El conocimiento de todos los parámetros de esta interfase son de gran utilidad para determinar: cinética de deterioro de materiales, formación de capas pasivas y/o protectoras, evaluación del uso de radicales orgánicos como inhibidores del deterioro del material, etc. A pesar del gran desarrollo de las técnicas electroquímicas, atribuibles en las últimas dos décadas principalmente al avance de la electrónica y la computación, hace que el futuro sea aún promisorio en posibles nuevas aplicaciones y/o combinación con otros conceptos físicos, tales como la emisión acústica, etc.

Palabras clave: métodos electroquímicos, interfaces electroquímicas.

* Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – UPTC. Avenida central del Norte, Km 2, Tunja Colombia. Correo electrónico: Enrique.vera@uptc.edu.co

Abstract

When a metal surface comes into contact with an aqueous medium, the series begins the thermodynamic and kinetic processes responsible for the formation of an electrochemical interface, which is in charge of controlling the oxide/reduction process that is related to the transfer charge and mass to the nearness of the metal. Considering the electrical characteristics of the interface, it is usually modeled by a series under passive elements (resistors and constant phase elements), whose magnitudes define both the thermodynamic and kinetic aspects of exchange reactions and/or charge transfer and mass. When this electrochemical interface is simulated with electrical elements it is possible to apply the concepts of polarization to determine these parameters of interface because of its use, either stationary electric field (DC) or electric fields that vary in time and frequency (AC). The type of polarization applied (both magnitude and signal type) defines a range of electrochemical techniques that allow to establish, with a high degree of accuracy, the state of the interface. The knowledge of all parameters of this interface is useful for determining: the kinetics of deterioration of materials, the formation of passive and/or protective layers, the evaluation of the use of organic inhibitors as inhibitors in the deterioration of the material, etc. Despite the great development of electrochemical techniques, and considering the advancement of electronics and computers in the last two decades, it makes for a promising future in possible new applications and/or in combination with other physical concepts, such as acoustic emission, etc.

Key words: electrochemical methods, electrochemical interfaces.

1. Introducción

Cuando Michel Faraday (1791 – 1867), publicó sus logros en el entendimiento de los procesos de oxido-reducción a partir de los trabajos realizados bajo la tutela de Humphry Davy (1778 – 1829; conocido como fundador de la electroquímica), sobre elementos metálicos, era apenas el comienzo de una gran ciencia que se llamó electroquímica. Uno de los aspectos fundamentales de la electroquímica esta en el estudio de las técnicas que permiten establecer el ordenamiento y comportamiento de las interacciones en los iones presentes en un electrolito y los metales que lo rodean. Estos estudios permitieron que para el año 1959, el científico checo Jaroslav Heyrovsky (1890 – 1967), recibiera el premio nobel de química por sus aportes en los estudios de electroquímica analítica "descubrimiento y desarrollo del método analítico de polarografia (**Haman *et al.,*** 1988).

En las tres últimas décadas, la electroquímica, los métodos electroquímicos y el desarrollo de nuevos dispositivos electroquímicos han tenido un sorprendente avance, principalmente debido a la crisis energética mundial originada por la disminución de las reservas de petróleo. Los ojos de muchos científicos han apuntado hacia el desarrollo de dispositivos electroquímicos generadores de energía, tales como las celdas combustibles o baterías de estado sólido de alto rendimiento. Uno de los acontecimientos investigativos relevantes en este aspecto fue el premio Nobel de Química del año 2000 otorgado a los investigadores Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid y Hideki Shirakawa, como reconocimiento a las investigaciones realizadas en el campo de los polímeros conductores, que abrió un gran campo de investigaciones en el desarrollo de nuevos dispositivos electroquímicos (**Schmikler,** 1996).

En el proceso de fabricación de cualquier material (metales, polímeros, cerámicos, etc.) es necesario invertir energía para transformar las materias primas constituyentes y lograr obtener productos con características y propiedades determinadas. Este hecho hace que, termodinámicamente, todos estos materiales vuelvan irremediablemente a su estado natural o de energía básica, es decir al estado de los productos a partir de los cuales se generaron; en el caso de los metales es volver al estado de óxidos y/o hidróxidos. (**Pronov,** 1990).

Hoy día, con el uso avanzado de la electrónica, donde es posible medir corrientes del orden de los fento-amperios (10^{-12} A) y la incorporación de computadores de alta velocidad que poseen conversores digitales/análogo/digital de alta velocidades y tasas de adquisición muy altas (tasas de muestreo de una señal análoga), ha permitido que las tareas de estimular las interfases con pulsos de campos eléctricos estacionarios o variables con el tiempo sea tarea relativamente fácil de llevar cabo (**Reay *et al.,*** 1994; **Frey *et al.,*** 2003). Esto ha hecho que cada día las técnicas electroquímicas para explorar la interacción electrón/ión en una interfase metálica se refinen. Estas técnicas adquieren gran importancia, pues con el uso creciente de la industria, así como el uso de nuevos materiales, hace que sea una necesidad el poder conocer los mecanismos de los

procesos que se dan en estas interfases y así proponer estrategias de preservación de estos.

A nivel industrial, se han desarrollado equipos que utilizan la técnica LPR (Lineal Resistence Polarization) y Tafel, para evaluar grados de deterioro in-situ de materiales, eficiencia de inhibidores, grados de des-pasivación producidos por bacterias etc.

A nivel de laboratorio, son innumerables las aplicaciones que las técnicas electroquímicas han adquirido. Entre otras, existen técnicas para evaluar el efecto de aleantes en un metal y su influencia en el grado de pasivacion, efecto de ataque o pérdida de cohesión de los límites de grano de un metal, formación de películas pasivas etc. (**Schulz *et al.,*** 1997; **Ferreira *et al.,*** 1989; **European Federation of Corrosion Publications,** 1990).

Los aspectos teóricos de las técnicas electroquímicas, involucran dos parámetros; el potencial eléctrico (Voltios) y la Corriente eléctrica (Amperios). El potencial eléctrico es el parámetro concluyente de todos los aspectos termodinámicos de un sistema electroquímico y la corriente eléctrica, define los aspectos cinéticos y por ende la velocidad de intercambio de carga y especies en una interfase.

Estos dos parámetros físicos son los responsables de determinar el estado de las interfases y son representados por elementos de circuitos (resistencias, capacitancias) que controlan el flujo en la interfase. En este artículo se describe de manera sencilla este mundo apasionante de caracterización estados de interfase electrificada metal/electrolito, dando un preámbulo teórico y mostrando una aplicaciones experimentales prácticas.

2. Marco teórico

2.1. Interfase electroquímica de un metal en contacto con un medio acuoso

Cuando un metal se sumerge en un medio acuoso, se da inicio a un proceso de ordenamiento de cargas eléctricas. Los electrones libres del metal, modifican el espacio eléctrico y generan una interacción con iones y masa en la vecindad del metal. Este reacomodamiento de electrones libres en la superficie del metal y de iones y masa en el electrolito es debido a procesos de polarización influenciada por las cargas en esta vecindad; formándose la llamada interfase eléctrica. (**Kaesche,** 1990).

En la figura 1, se esquematiza de manera detallada la formación eléctrica de esta interfase, diferenciando dos capas principales o planos de acomodación de cargas, denominada la doble capa electroquímica o interfase de

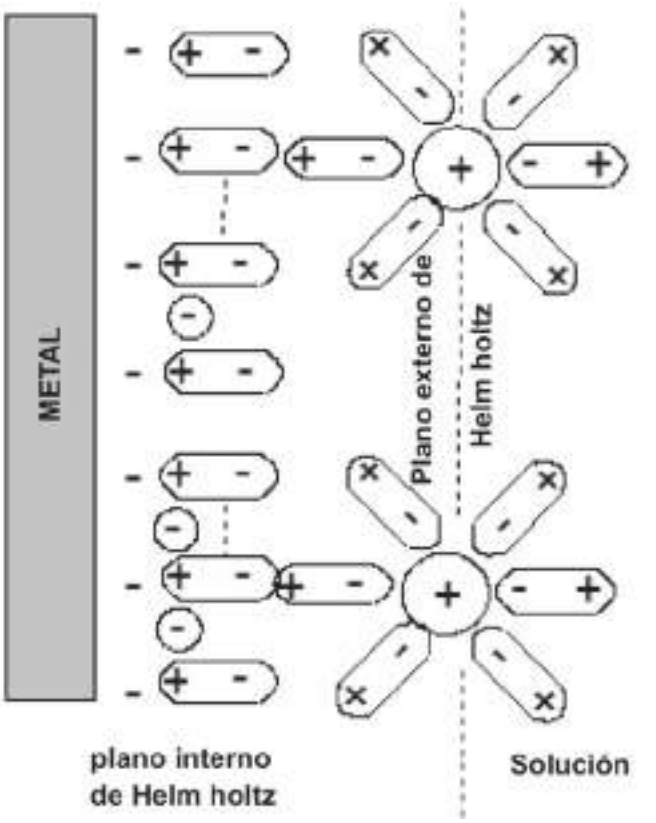


Figura 1. Diagrama esquemático de una interfase electrificada según el modelo de Helmholtz.

Helmholtz (Hermann Ludwing Ferdinand Von Helmholtz 1821 – 1894) (publicado en 1879).

Todas estas cargas distribuidas en el espació son las encargadas de generar un campo eléctrico y por ende de un potencial eléctrico en esta vecindad del metal, o electrodo de trabajo (ET) (**Bockris *et al.,*** 2000; **Bockris *et al.,*** 2003).

2.1.1. Presencia del potencial eléctrico en la interfase (aspecto termodinámico)

Debido a que esta interfase presenta una acomodación de cargas, aparece el concepto de potencial eléctrico (E). Este potencial fue ampliamente estudiado por Nernst , quien pudo determinar una relación entre la cantidad de cargas en esta interfase y el valor en voltios de esta. Esta ecuación es conocida como ecuación de Nernst, y su relación está dada por la ecuación 1.

$$E_M = E_M^{\circ} + \frac{RT}{\eta F} \ln \frac{a^{(M^{z+})}}{a^{(M^{\circ})}} \qquad (1)$$

E_M: Potencial eléctrico en la interfase (Voltios).

E_M^o: Potencial eléctrico en la interfase en condiciones estándar (Voltios).

R: Constante Universal de los gases (8,31 J/M – ^OK).

T: Temperatura (^OK).

F: Constante de Faraday (aprox. 96.500 Culombios).

n: Número de electrones transferidos en los procesos de óxido/reducción.

$a^{(Mz+)}$: Actividad del ión metálico.

$a^{(Mo)}$: Actividad del metal (se toma como 1).

La ecuación de Nernst (1864-1941; premio Nobel de Química en 1920 por sus logros en termodinámica), fue el paso definitivo, para que Marcel Pourbaix (1904-1998) a partir de esta ecuación, definiera la relación entre Potencial y pH en los conocidos diagramas de POURBAIX. Estos diagramas decantaron la interpretación termodinámica del comportamiento de los metales en medios acuosos. El diagrama de POURBAIX para cada metal, permite establecer la tendencia y el camino que tiene el metal para volver a su estado primitivo (óxidos o hidróxidos), según las condiciones del medio especifico (**Pourbaix,** 1963).

En la figura 2, se presenta el diagrama característico para el hierro en agua.

Como se puede observar en este diagrama, el conocimiento tanto del potencial de interfase como del pH, permite determinar el estado o fase en que se encuentra un metal (Oxidación, pasivacion o inmune).

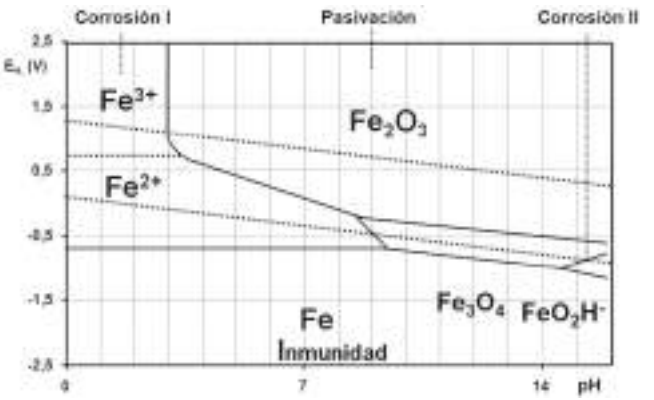


Figura 2. Diagrama de Pourbaix, del comportamiento de un acero de baja aleación inmerso en agua a 25°C y una concentración de 10^{-6} de iones de hierro.

2.1.1.1. Medición del potencial eléctrico

Como se acaba de mencionar, el potencial eléctrico es indispensable para determinar la tendencia de estado del metal. Se conoce de los conceptos básicos de electrostática, que la medición del potencial eléctrico consiste en una medición diferencial entre dos puntos del espacio (diferencia de potencial eléctrico), por lo cual, para medir el potencial de una superficie, se hace necesario el uso de un punto de referencia. En los sistemas electroquímicos, esta referencia, se llama "electrodo de referencia - ER", el cual no es mas que otro metal en condiciones especiales de estabilidad y de carga en su entorno, que hace que las cargas en la interfase de este metal no varíen, por lo tanto cualquier variación en una diferencia de potencial es debido a variaciones en la interfase del metal (electrodo de trabajo) que se está inspeccionando. Un electrodo de referencia común, es el de Plata/ Cloruro de Plata (Ag/AgCl). En la figura 3, se presenta la forma característica de medir el potencial eléctrico.

Es importante mencionar de esta figura, que el equipo de medición (voltímetro) debe poseer una muy alta resistencia de entrada, tal que al conectar evite que circule corriente por el electrodo de referencia, lo que polarizaría el mismo, y perdería su validez como referencia.

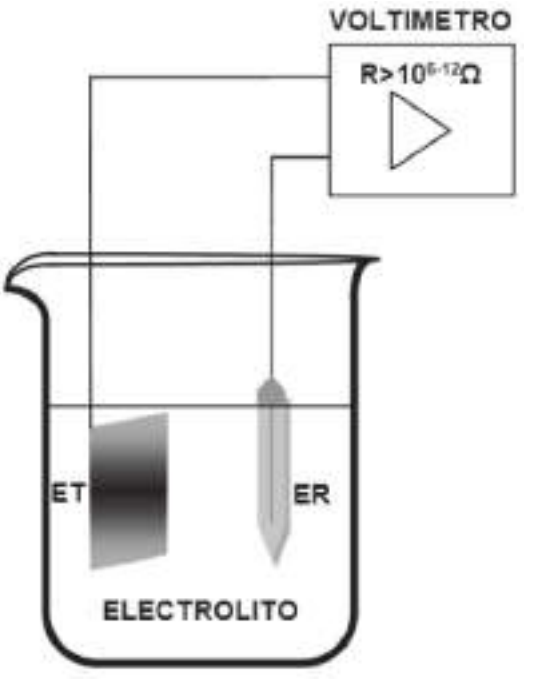


Figura 3. Esquema experimental para medir potencial eléctrico de una interfase.

2.1.2. Presencia de la corriente eléctrica en una interfase (aspecto cinético)

La corriente eléctrica que se genera en la interfase, define la cinética, que en el caso de electroquímica, representa la velocidad con que ocurren los procesos de intercambio electrón/ión relacionado con las reacciones de oxido/reducción de la interfase del ET y por tanto, de la velocidad de deterioro de un material.

Dependiendo del medio en que se encuentre el material, pueden darse principalmente dos tipos de reacciones de oxido/reducción, las cuales se presentan en las siguientes dos ecuaciones; para presencia de un medio ácido (ecuación 2) y un electrolito alcalino con presencia de oxígeno (ecuación 3).

$$Fe+2H^{+} \rightarrow Fe^{+2} + H_2 \qquad (2)$$

$$Fe+ \tfrac{1}{2} O_2 + H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 \qquad (3)$$

En la figura 4, se presenta el mecanismo que ocurre en un proceso de oxido/reducción en la interfase (ejemplo de medio acuoso ácido). Es claro ver que existe una corriente neta negativa (electrones) y una positiva (iones en el electrolito) que generan una corriente llamada; corriente de intercambio (i_o) o de corrosión (i_{corr}).

2.1.2.1. Medición de la corriente eléctrica en una interfase

La medición de la corriente de intercambio o corriente de corrosión, no se hace tan fácil o lógica como se pensaría ya que el movimiento de cargas (positivas y negativas) se hace en un espacio tridimensional.

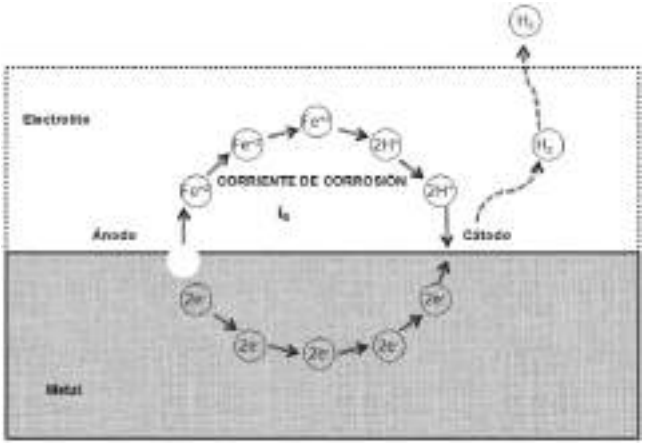


Figura 4. Esquema del concepto de corriente de intercambio o de corrosión en una interfase electrificada.

Para poder medir los procesos de corriente eléctrica en la interfase, se hace necesario polarizar la interfase. Para esta polarización aparece el concepto de celda electroquímica, donde el concepto de contra-electrodo (CE), como material inerte (normalmente platino), que solo entrega corriente, ya sea esta positiva o negativa, hacen que se puedan estudiar los procesos que ocurren en un electrodo metálico (ET) bajo estudio. El complemento de la celda electroquímica, lo hace una fuente de voltaje o corriente que impulsa o retira electrones del ET. En la figura 5, se puede observar de manera general lo que se conoce como una celda electroquímica con fuente de polarización.

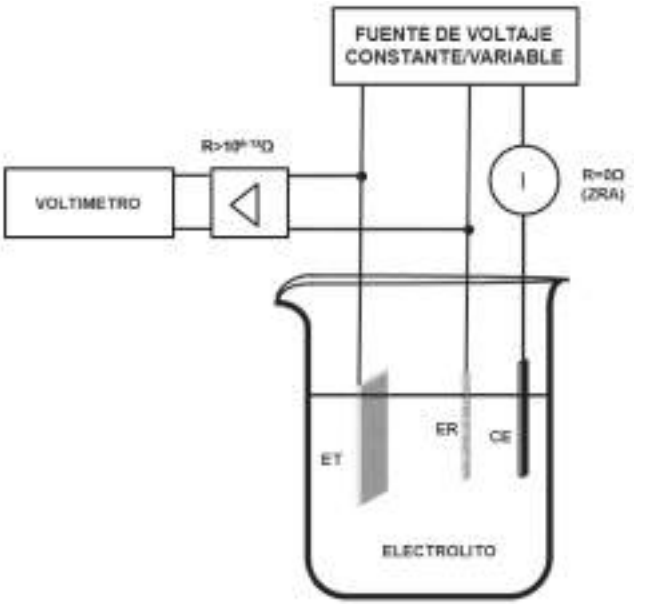


Figura 5. Configuración completa para realizar polarización sobre el electrodo de trabajo.

WE: Electrodo de trabajo.

RE: electrodo de referencia.

CE: contra electrodo.

Si la fuente de voltaje polariza de tal manera que impulsa electrones hacia el ET (sacándolos del contra-electrodo), se llevan a cabo reacciones de reducción prioritariamente sobre el ET. Si en caso contrario saca electrones para enviarlos al contra-electrodo, las reacciones predominantes sobre el ET, son de oxidación. Ambos casos fueron estudiados por Butler y Volmer, (John Alfred Valentine Butler 1899-1977) (Max Volmer 1885 – 1965) encontrado la ecuación que describe este mecanismo y es conocido como ecuación de Butler- Volmer (ecuación 4) (**Pérez,** 2004).

$$i = i_0 \left(e^{\left[-\frac{\beta F \eta}{RT} \right]} - e^{\left[\frac{(1-\beta) F \eta}{RT} \right]} \right) \quad (4)$$

i: corriente que fluye entre el electrodo de trabajo y el contra-electrodo (Amperios).

i_o: corriente de intercambio (A).

â: pendientes de Tafel (mV/década).

F: Constante de Faraday (96500 C/mol).

R: Constante Universal de los gases (8.31 J/mol - ºK).

T: temperatura (ºK).

η: Sobre-potencial o potencial de polarización (V).

En esta ecuación el sobre-potencial (n), está definido como n= E-Ecorr.

Esta ecuación describe la relación entre voltaje y corriente que ocurre en la interfase del material en un rango de voltajes de ±200 mV de polarización (E-E_{corr}= ±200 mV).

2.1.3. Simulación de una Interfase electroquímica

Teniendo en cuenta, que una interfase electroquímica puede ser reducida al concepto de una interfase electrificada, existe una representación de la interfase en función de elementos eléctricos pasivos, como son las resistencias y capacitancias (llamadas en electroquímica, elementos de fase constante). Una representación gráfica de esta interpretación es dada en la figura 6.

Como se observa de esta figura, existen dos elementos que describen tanto la termodinámica, como la cinética de lo que ocurre en esta interfase:

El factor capacitivo (C) está asociado a la carga distribuida en esta interfase y por ende con el potencial eléctrico. Este factor capacitivo es llamado comúnmente, capacitancia de la doble capa electroquímica y es un parámetro termodinámico.

El factor resistivo (R), se asocia al impedimento o resistencia que los protones (H^+), así como el oxígeno tienen que vencer para poder llegar al contorno de la superficie del metal a recombinarse con los electrones que este posee. Teniendo en cuenta que esta resistencia controla la cantidad y velocidad de transporte a través de la doble capa electroquímica. Este factor resistivo es llamado en electroquímica la resistencia a la polarización (R_p) y determina la cinética de las reacciones.

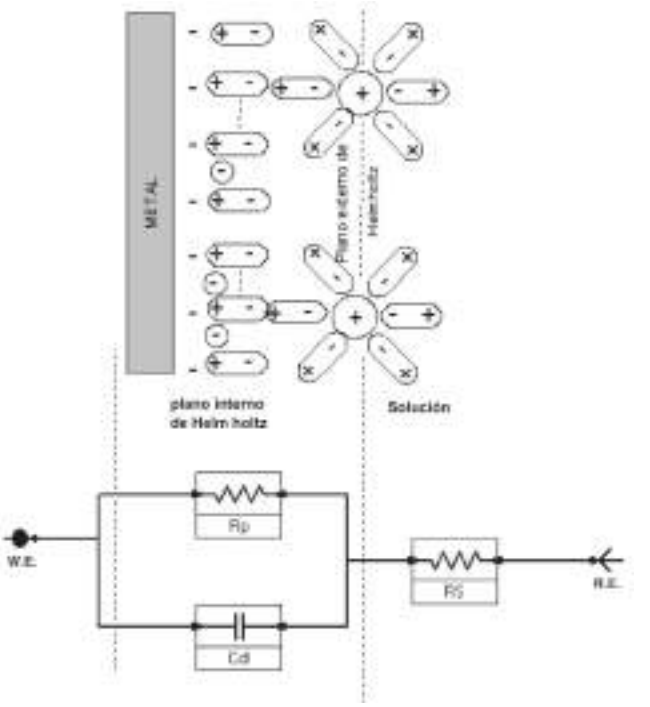


Figura 6. Simulación de una interfase electroquímica en función de elementos eléctricos pasivos.

2.1.4. Formas de excitación de la interfase

A partir de la ecuación de Butler-Volmer, se derivan diferentes formas de excitar una interfase, en función de la amplitud de la señal y de las características de la misma (**Pérez,** 2004; **NACE,** 1984).

2.1.4.1. Evaluación de parámetros de interfase en estado cuasi-estático utilizando señales DC (técnica LPR)

Excitar la interfase, pero sin perturbar el estado de equilibrio que ella ha establecido, hace necesario utilizar señales de excitación suficientemente pequeñas (campos eléctricos pequeños), de tal manera que no cambien el estado eléctrico de esta interfase. Si se utilizan valores de voltaje de polarización muy pequeños, la ecuación de Butler-Volmer, puede ser reducida a la ecuación 5 y complementaria 6.

$$I_{corr} = B \frac{di}{d\eta} = \frac{B}{R_p} \quad (5)$$

$$B = \frac{b_a b_c}{2.3(b_a + b_c)} \quad (6)$$

di: escalón pequeño de corriente

$d\eta$*:* escalón pequeño de voltaje

B: relación de pendientes de Tafel

Polarizar el electrodo de trabajo con potenciales muy pequeños, es conocida como la técnica LPR (Lineal Polarization Resistence), de tal manera que la relación entre voltaje de interfase y corriente de interfase es lineal.

Como se observa de esta ecuación, es una función lineal, lo que hace cumplir el principio de causalidad lineal en la respuesta voltaje-corriente y por ende garantiza que la interfase no cambia de manera sustancial sus condiciones eléctricas. De aquí se puede obtener el valor de la resistencia a la polarización (Rp), a partir de la pendiente de la recta que se origina al grafica V Vs i. Los rangos de polarización normal, tal que garantice la linealidad en la respuesta oscilan entre máximos de ±20 mV respecto al potencial de equilibrio (de corrosión) del ET. En la figura 7, se observa la función resultante de esta relación.

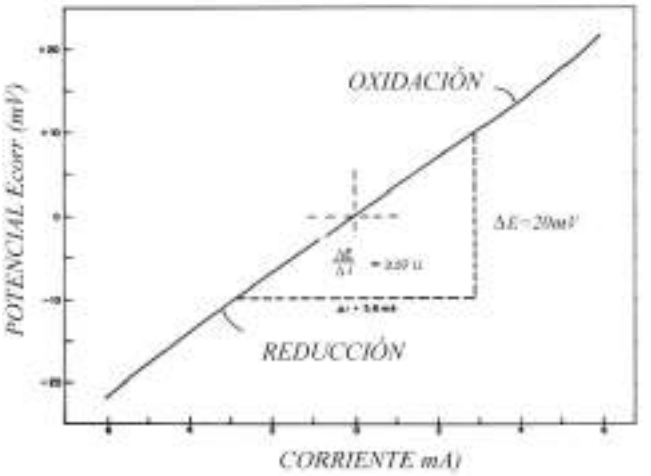


Figura 7. Función lineal resultante de la reducción de la ecuación de Butler-Volmer a rangos de polarización pequeños.

2.1.4.2. Evaluación de la corriente de corrosión y otros parámetros de interfase.

Si el rango de polarización respecto al potencial de equilibrio (potencial de corrosión) es amplio (± 200 mV), la relación entre Voltaje y Corriente corresponde a la ecuación de Butler-Volmer. Esta ecuación fue convertida por el científico Julius Tafel (1862 1918), a una forma semi-logarítmica tal como se presenta en la ecuación 7.

$$\eta = a + b\ln i \quad (7)$$

a y b: constantes.

Donde *b* indica el valor de la pendiente Tafel, ya sea anódica o catódica, dependiendo de la dirección de polarización. Las pendientes Tafel, están dadas por la ecuación 8.

$$b_a = \frac{2.3RT}{F} \quad y \quad b_c = -\frac{2.3RT}{F} \quad (8)$$

Esta ecuación presenta una gráfica característica, que permite por extrapolación geométrica la determinación de la corriente de corrosión, lo cual es vital para determinar la cinética de deterioro de un material, tal y como se plasma en la figura 8.

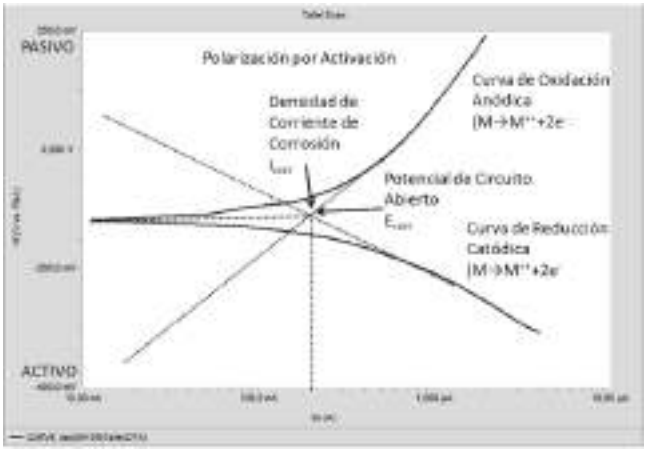


Figura 8. Curva característica de Tafel.

Gráficamente las pendientes se pueden determinar mediante el trazado de una línea tangente a cada una de las curvas de polarización.

Como muestra la figura 8, el punto donde se interceptan las rectas tangentes a las curvas (rectas que definen las pendientes de Tafel), permiten por extrapolación determinar el punto de corte en el eje de corriente, correspondiendo este punto a la corriente de intercambio (i_o) o la corriente de corrosión (i_{corr}).

Es importante anotar, que al excitar la interfase con las condiciones dadas por Tafel, se pierden las condiciones de equilibrio de esta, y la respuesta es por tanto no lineal.

2.1.4.3. Evaluación de parámetros de interfase utilizando la corriente alterna como señal de excitación

Si la interfase es equivalente a un circuito eléctrico, compuestos por elementos pasivos, esta responde también

a excitaciones usando corriente alterna. Una técnica que se utiliza para evaluar los parámetros usando corriente alterna, se llama la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS – Electrochemical Impedance Spectroscopy) (**Raistrick,** 1986; **Boukamp,** 1985).

Esta técnica consiste en excitar la interfase con una señal de voltaje AC de amplitud fija (pequeña, del orden de 20 mV pico a pico), pero variando la frecuencia en un rango que va desde los KHz hasta los mHz.

Cada elemento eléctrico presente en la interfase, presenta una respuesta característica según la frecuencia de la señal, lo que define el factor de impedancia del elemento. La suma de las impedancias de todos los elementos presentes en esta interfase representa la impedancia total, cuya función puede ser tan compleja, como complejo pueda ser este circuito eléctrico que forman todos los elementos.

En la tabla 1, se muestra las funciones de impedancia para diferentes elementos eléctricos que se han definido y buscado interpretación física para los fenómenos que ocurren en la interfase cuando una señal alterna con una frecuencia dada pasa a través de esta.

Para un circuito simple, que simula una interfase, tal como el descrito en la figura 9 (circuito de Randles), la función de impedancia es dada por la ecuación 8.

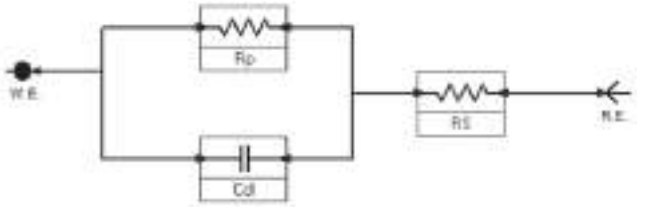


Figura 9. Circuito equivalente de Randles, que simula una interfase electrificada.

$$Z = R_s + \frac{R_p}{1+(\omega R_p C_{dl})^2} + j\left(\frac{-(\omega R_p^2 C_{dl})}{1+(\omega R_p C_{dl})^2}\right) \quad (9)$$

Z: valor de impedancia neta de la celda (ohmios).

R*s*: Resistencia del electrolito (ohmios).

C*dl*: Capacitancia de la doble capa de Helmholtz (Faradios).

R*p*: Resistencia a la polarización (Ohmios).

ω: frecuencia de excitación (Herz).

Esta función genera una respuesta de corriente, para cada voltaje a una frecuencia dada, dando un espectro de impedancias, tal como se muestra en la figura 10.

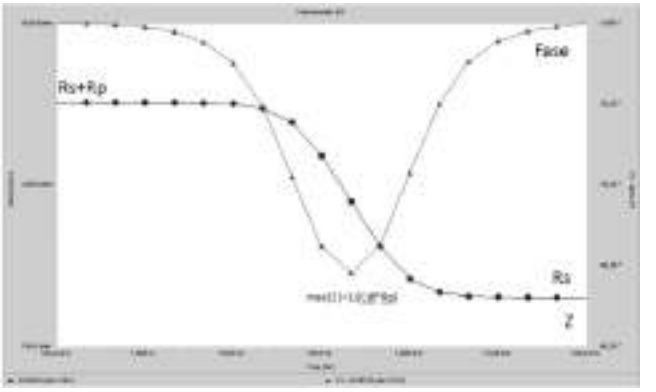


Figura 10. Espectro de impedancias de una interfase electrificada bajo el modelo de Randles.

De este diagrama se pueden obtener los parámetros de interfase, tales como la resistencia a la polarización R_p, la resistencia del electrolito R_s y la capacitancia de la doble capa electroquímica C_{dl}.

Tabla 1. Elementos usados en circuitos de Impedancia Electroquímica.

Elemento equivalente	**Admitancia**	**Impedancia**
Resistor (**R**)	***1/R***	***R***
Capacitor (**C**)	***jwC***	***1/jwC***
Inductor (**L**)	***1/jwL***	***jwL***
Elemento de fase constante (**Q**)	$Y(jw)^n$	$1/Y(jw)^n$
Warburg semi infinito (**W**)	$Y(jw)^{1/2}$	$1/Y(jw)^{1/2}$
Warburg límites porosos (**O**)	$Y(jw)^{1/2}\ Cotgh\{B\ (jw)^{1/2}\}$	$1/Y(jw)^{1/2}Cotgh\{B\ (jw)^{1/2}\}$
Warburg finito (**T**)	$Y(jw)^{1/2}Tanh\{B\ (jw)^{1/2}\}$	$1/Y(jw)^{1/2}Tanh\{B\ (jw)^{1/2}\}$

Es importante anotar, que esta técnica, al igual que la LPR, permite determinar los parámetros de la interfase en estado de equilibrio de la misma [12].

3. Aplicaciones de los métodos electroquímicos al estudio de deterioro de metales

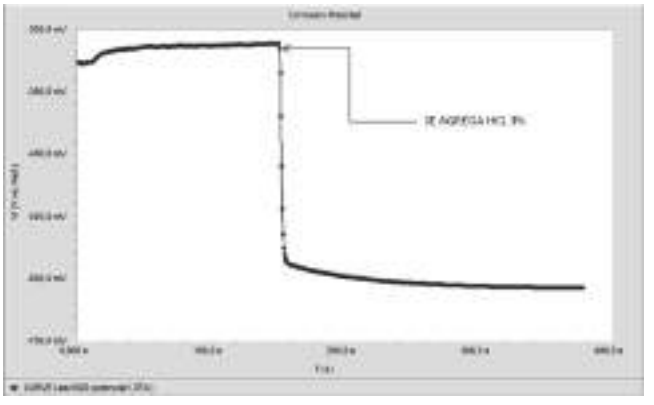
Con el fin de observar el comportamiento de los parámetros de interfase que se han descrito hasta el momento, se presenta en la tabla 2, un diseño experimental que permite determinar el cambio de estos parámetros en función de variación del medio electrolítico. Con este estudio se evalúa y puede observarse el efecto de la concentración de cloruros en los parámetros; tales como resistencia a la polarización, potencial de corrosión y corriente de corrosión para un acero AISE-SAE 1020.

Tabla 2. Variables para evaluar el cambio de parámetros de una interfase electrificada.

Material	Electrolito	Tipo de Prueba
ISI-SAE 1020	Agua destilada	LPR, Tafel, EIS
AISI–SAE 1020	Agua destilada + 1% NaCl	LPR, Tafel, EIS
AISI-SAE 1020	Agua Destilada + 3% NaCl	LPR, Tafel, EIS

3.1. Medición del potencial de interfase como parámetro diciente del estado de actividad de la misma

En la gráfica 1, se puede ver la medición del potencial eléctrico de una interfase de un acero al carbono AISI SAE 1020. El primer segmento de la medición corresponde al potencial que adquiere la interfase cuando el electrolito es agua destilada. El segundo segmento de la curva corresponde al potencial de esta interfase cuando se agrega 10 ml de HCl al 3%.

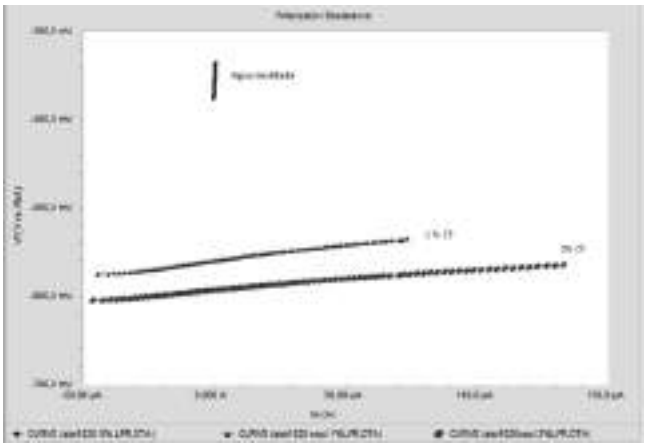


Gráfica 1. Efecto de cambio de potencial de interfase, en función de presencia de portadores de carga.

En el momento de agregar HCl al electrolito inicial, se crean protones libres en el electrolito, que migran a la superficie del metal para captar electrones y poder reducirse a hidrógeno gaseoso. En el momento en que el metal cede electrones, un átomo metálico migra al electrolito como ión metálico, dejando un espacio físico vacio en la superficie del metal, lo cual no es mas que un deterioro del mismo, reorganizando eléctricamente la interfase, haciendo que su potencial se haga más negativo.

3.2. Determinación del parámetro de resistencia a la polarización Rp, usando técnicas de respuesta lineal

En las gráfica 2, se observa el resultado de aplicar la técnica LPR. Dando una respuesta lineal de la interfase bajo diferentes condiciones de concentración de cloruros. Con el fin de poder mostrar el análisis del cálculo de pendientes de estas rectas, se presenta la gráfica 3, la cual solo contiene los resultados con electrolitos al 1 y 3% de NaCl.

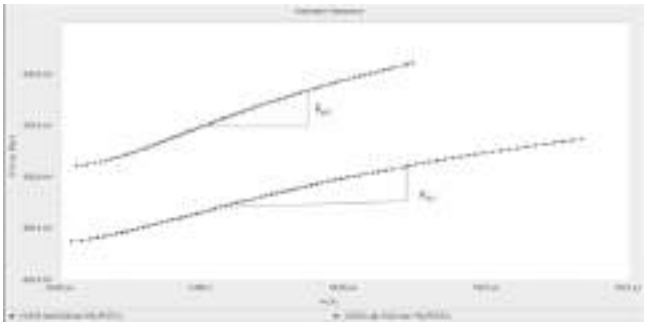


Gráfica 2. Respuesta lineal de la interfase, en función del contenido de cloruros en el electrolito.

Los valores de resistencia a la polarización se dan en la tabla 3.

Tabla 3. Valores de resistencia a la polarización de una interfase, en función de la concentración de cloruros.

AISI 1020	
AMBIENTE	Rp (Ω)
AGUA DESTILADA	58,11
NaCl AL 1%	0,419
NaCl AL 3%	0,290

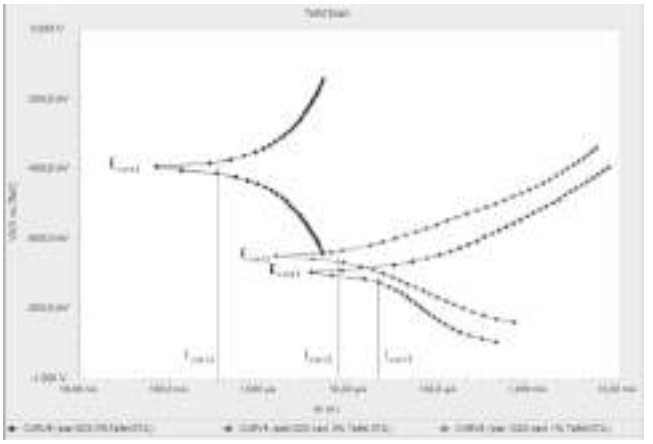


Gráfica 3. Determinación de las resistencias a la polarización (R_p) para una interfase bajo la acción de cloruros.

Se puede observar, que a medida que se incrementa la concentración de cloruros, se disminuye la resistencia a la polarización, debido a la actividad iónica en la interfase.

3.3. Determinación de la corriente de corrosión mediante curvas de Tafel

En la gráfica 4, se puede observar las curvas de Tafel obtenidas para los tres casos de variación de la concentración de cloruros en la solución.



Gráfica 4. Respuesta de la interfase, cuando se aplican campos eléctricos bajo el concepto de Tafel.

De esta gráfica, se puede calcular la corriente de corrosión, como la extrapolación al eje de corriente del punto donde se interceptan las pendientes de Tafel.

Estos datos de corriente, son dados en la tabla 4.

De estas gráficas se puede observar; que el potencial de corrosión se desplaza hacia potenciales más negativos a medida que se incremental la concentración de cloruros, y se incrementa la actividad de intercambio de carga en la interfase, lo cual se manifiesta como un incremento de la corriente de corrosión.

Tabla 4. Variación de la corriente de corrosión en función de la concentración de cloruros en la solución.

AISI 1020		
AMBIENTE	**Ecorr (mv)**	**Icorr (μA)**
AGUA DESTILADA	-397	13
NaCl AL 1%	-653	30
NaCl AL 3%	-700	50

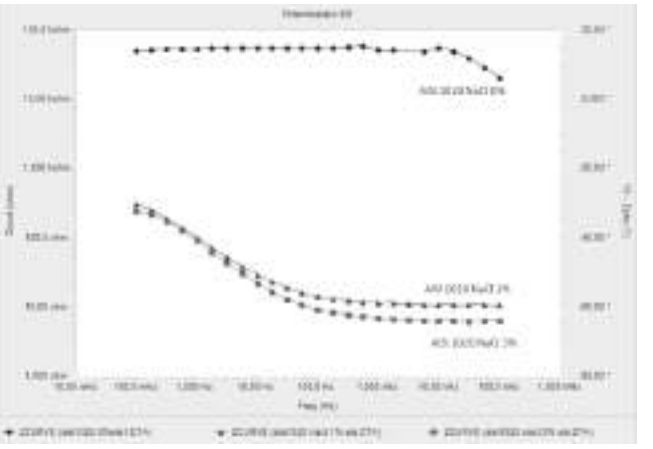
3.4. Determinación de parámetros de interfase usando técnicas de corriente alterna

En la gráfica 5, se puede observar las curvas de espectroscopia de impedancias obtenidas para las evaluaciones con las tres concentraciones de cloruros.

Se puede observar, que la resistencia de polarización (obtenida a bajas frecuencias) se disminuye a medida que se incrementa la concentración de cloruros. Además a capacitancia de la doble capa electroquímica Cp. Estas curvas permiten determinar los parámetros de interfase eléctrica, tal y como se haría con un circuito equivalente.

En la tabla 5, se presentan los valores de los parámetros que se han determinado de los espectros de impedancia.

El valor de resistencia del electrolito se obtiene en el rango de altas frecuencias, el valor de resistencia a la polarización se obtiene a bajas frecuencias y el factor capacitivo a frecuencias intermedias.



Gráfica 5. Espectros de impedancia eléctrica de la interfase electroquímica en función de la cantidad de cloruros en el electrolito.

Tabla 5. Determinación de parámetros de interfase en función de la concentración de cloruros, obtenida por la técnica EIS.

AISI 1020			
AMBIENTE	Rs(Ω)	Rp (Ω)	Cdl (μF)
AGUA DESTILADA	17360	53000	162E-6
NaCl AL 1%	11,72	380	1302
NaCl AL 3%	6,828	240	1331

Se puede observar, que el parámetro específico de resistencia a la polarización, no coincide con el determinado con la técnica LPR. Principalmente esto se debe, a que en la técnica EIS, este parámetro se obtiene por extrapolación a frecuencia cero.

4. Conclusiones

La electroquímica ha empezado a jugar un papel importante en los desarrollos de la humanidad, ya que las necesidades energéticas, y las investigaciones que buscan sustituir las energías producidas por combustibles fósiles, en energías producidas por fuentes amigables con el ambiente, ha hecho que se desarrollen dispositivos electroquímicos. Uno de los aspectos fundamentales en estos desarrollos es el estudio de la interfase y el deterioro de los materiales que están implícitos en estos desarrollos. Es por ello que el avance de las técnicas electroquímicas para explorar las interfases electrificadas y sus reacciones, ha sido impulsadas principalmente por el desarrollo de las tecnologías electrónicas y computacionales, hecho que ha permitido desarrollar equipos sofisticados para estas evaluaciones.

Se observa, como parámetros como la concentración de protones y cloruros afectan la configuración de esta interfase y por ende la de sus parámetros. Un conocimiento serio de estos parámetros, es lo que permitirá seguir amplio la frontera de aplicaciones del uso de la electroquímica.

Bibliografía

Bockris, J.O´M., Reddy A. K. N., and Gamboa-Aldeco. (2000). M, Modern Electrochemistry; Fundamentals of electrodics, Kluwer Academic Publishers. ISBN 0-306-46166-8.

Bockris, O´M. J., Conway. B. E and White. R. (2002). Modern Electrochemistry; No. 34. Kluwer Academic Publishers. ISBN 0-306-46462-4.

Boukamp, B. A. (1985). Non-Linear Lest Squares Fit of AC-Impedance Measurements, in Computer Aided Acquisition and Analysis of Corrosion Data. edited by Kendig M. W. and Bertocci U. Electrochemical Society.

European Federation of Corrosion Publications. (1990). Guildelines on Electrochemical Corrosion Measurements. ISBN 0-901462-87-X.

Ferreira, M. G. S. and Melendres, C. (1989). Electrochemical and Optical Techniques for the Study and Monitoring of Metallic Corrosion. Kluwer Academic Publisher. ISBN 0-7923-1368-2.

Frey A, Meinrad Schienle. M. J, Paulu. C, Holzapf. B, Schindlerbauer. P, Hofmann. F, Kuhlmeie. D, Krause. J, Albers. J, Gumbrecht. W, Schmitt-landsiedep. D, Thewes. R. (2003). "Design of an Integrated Potentiostat Circuit for CMOS Bio Sensor Chips". IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. Pp. 9-12.

Hamann, C. H, Vielstich. V. (1998). Elektrochemie, Wiley-VCH Verlag. ISBN 3-527-27894-X.

Kaesche, H. (1990). Die Korrosion der Metalle; Physikalisch-Chemische Prinzipien und aktuellen Probleme. Springer-Verlag. ISBN 0-387-08881-4.

Nace. (1984). "Corrosion basic, an introduction". USA. pp. 23, 40, 41.

Pérez, N. (2004). Electrochemical and Corrosion Sciences. Kluwer Academic Publishers. ISBN 1-4020-7744-0.

Pourbaix, M. (1963). "Atlas d'equilibries electrochimiques a 25ºC" Edit. Gauthiers-Villars, Paris.

Pronov, A. P. (1990). Ciencia de los Materiales. Editorial pueblo y educación.

Raistrick, I. D. (1986)**.** Application of Impedance Spectroscopy to Materials Science. Ann. Rev. Mater. Sci.16:343.

Reay, R. J., Kounaves S. P. and Kovacs. G T. A. (1994). "An Integrated CMOS Potentiostat for Miniaturized Electro-analytical Instrumentation". Sensors and Display Electronics. p. 162-163.

Schmickler, W. (1996). Grundlagen der Elektrochemie. Vieweg Verlag, ISBN 3-528-06755-1.

Schultz, W.D., Paul, R. (1997). Institut fuer Korrosionsschutz Dresden.Vorlesungen uber Korrosion und Korrosionsschutz von Werkstoffen. ISBN 3-930526-04-8.

Recibido: mayo 4 de 2010.

Aceptado para su publicación: junio 1 de 2010.

REPORTE DE UN NUEVO EJEMPLAR DE *GRANASTRAPOTHERIUM SNORKI* EN EL VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA, DESIERTO DE LA TATACOA, HUILA. COLOMBIA

Por

Mauricio Pardo Jaramillo*

Resumen

Pardo Jaramillo M.: Reporte de un nuevo ejemplar de *Granastrapotherium snorki* en el Valle Superior del Magdalena, Desierto de la Tatacoa, Huila. Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (131): 253-256, 2010. ISSN 0370-3908.

En excavaciones realizadas en Septiembre de 2008 por el Museo Geológico Nacional 'José Royo y Gómez' del Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS, se logró recuperar un dentario casi completo de *Granastrapotherium snorki* **Johnson & Madden,** 1997. El presente reporte da a conocer su existencia, teniendo en cuenta el reducido número de especímenes documentados en colecciones colombianas.

Palabras clave: *Granastrapotherium snorki*, Desierto de la Tatacoa, dentario.

Abstract

The National Geological Museum 'José Royo y Gómez' of INGEOMINAS (Instituto Colombiano de Geología y Minería), in field commission made in September -2008, found a nearly complete lower jaw of *Granastrapotherium snorki* **Johnson & Madden,** 1997. This work describes and illustrated the evidence of it. A few numbers of specimens was reported in Colombian collections.

Key words: *Granastrapotherium snorki*, Desierto de la Tatacoa, dentary.

Introducción

A pesar de su importancia, no existe una buena documentación del material referido a los Astrapoterios Miocénicos (Astrapotheridae) colombianos, exceptuando el trabajo realizado por **Johnson y Madden,** 1997, el cual está contenido en el libro "Vertebrate Paleontology in the Neotropics. The Miocene Fauna of La Venta, Colombia" publicado por el Instituto Smithsoniano; son muy pocos, por no decir escasos otros trabajos que documenten la existencia y/o hallazgos en Colombia de este importante grupo de mamíferos extintos suramericanos.

* Museo Geológico Nacional 'José Royo y Gómez' Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS, Bogotá. Correo electrónico: mpardo@ingeominas.gov.co

Procedencia geográfica y litoestratigráfica de la pieza

El ejemplar reportado se encontró en la finca "Pachingo", ubicada unos 16 Km al E del Municipio de Villavieja, en el Departamento del Huila. Las coordenadas geográficas del punto son:

N 3º14'30" W 75º09'15"

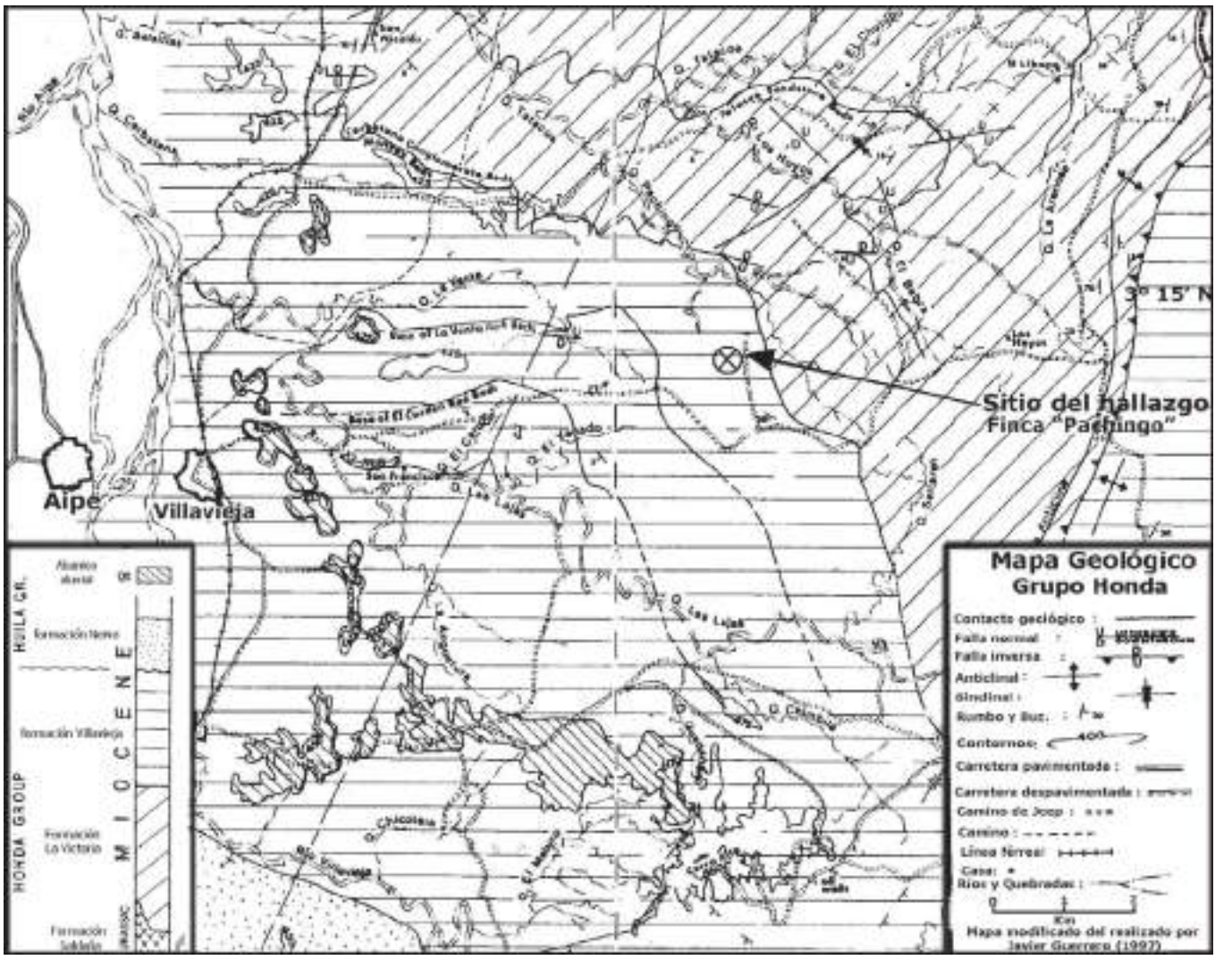


Figura 1. Mapa de Localización del sitio del hallazgo.

LÁMINA 1

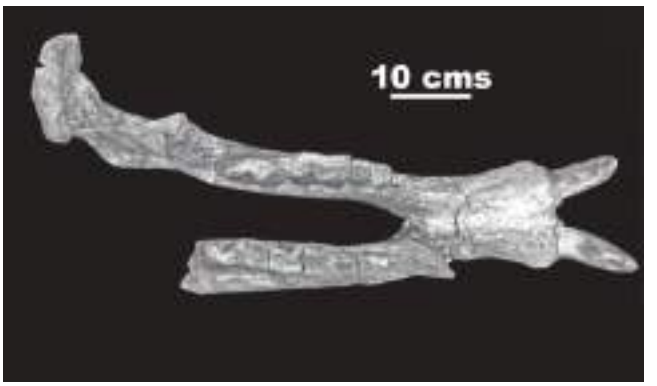


Foto 1. Vista oclusal del dentario de *Granastrapotherium snorki* Jhonson & Madden, 1997.

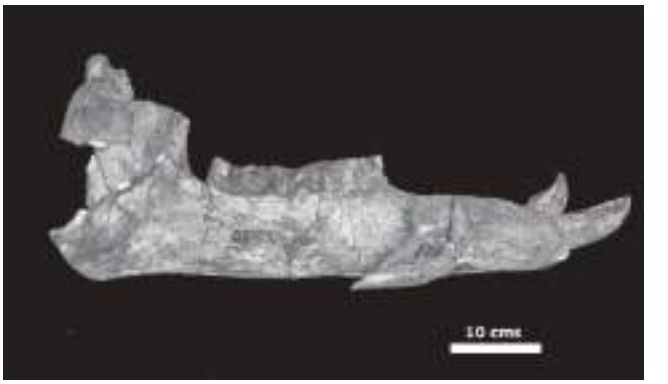


Foto 2. Vista lingual de la rama mandibular izquierda, diastema y caninos completos.

El espécimen fue colectado en septiembre del año 2008 por una comisión del Museo Geológico Nacional 'José Royo y Gómez' del Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS.

A juzgar por las características litoestratigráficas del sitio del hallazgo, las sedimentitas que contenían los restos óseos se atribuyen a la formación Villavieja, de acuerdo también con la revisión y mapa geológico del área realizado por **Guerrero** (1997) en el capítulo 2 del libro "Vertebrate Paleontology in the Neotropics. The Miocene Fauna of la Venta, Colombia". En en este libro como se mencionó anteriormente se reporta la existencia y se define el nuevo género y especie *Granastrapotherium snorki* en la zona. La Formación Villavieja está constituida principalmente por limolitas y arcillolitas grises y rojas alternadas con litoarenitas.

Paleontología sistemática

Clase: Mammalia

Orden: Astrapotheria **Lydekker** 1894

Familia: Astrapotheriidae **Ameghino** 1887

Subfamilia: Uruguaytheriinae **Kraglievich** 1928

Granastrapotherium snorki **Johnson y Madden** 1997

Descripción de la pieza (IGM p881230)

De acuerdo con las características morfológicas y dentales de la mandíbula (i0, c1, p1, m3), (Placas 1 y 2) el ejemplar claramente es asignable a *Granastrapotherium snorki* **Johnson & Madden,** 1997.

El dentario *in situ* se encontraba algo fragmentado y con claras evidencias de deformación y desplazamiento singenético, sobretodo en la rama derecha del dentario y en la parte derecha de la sínfisis mandibular; al momento de extraer los restos dicha rama mandibular a pesar de conservar los molares completos, se encontraba desplazada algo mas de 10 cms de su correspondiente posición original con la parte inferior de la sínfisis mandibular. No se preservó una porción pequeña de la parte superior del diastema derecho ni la parte posterior del dentario derecho, así como tampoco fue posible encontrar en la excavación un fragmento de la parte media mas posterior de la mandíbula izquierda.

La implantación de los caninos inferiores es horizontal y a medida que crecen se curvan lateralmente hacia afuera, lo cual permite establecer que el ejemplar reportado corresponde a una hembra, dado el dimorfismo sexual reportado por Johnson y Madden en la definición de la especie.

El ejemplar exhibe también, de acuerdo con la definición de la especie, una sínfisis estrecha y alargada anteroposteriormente, extendiéndose desde la altura del cuarto premolar (p4). El aspecto dorsal de la sínfisis es cóncavo. La sutura de la sínfisis está completamente fusionada y no deja rastros de su existencia, lo cual permite deducir que los restos estudiados corresponden con un ejemplar adulto. La superficie ventral de la sínfisis es bastante irregular y presenta aspecto rugoso.

Repositorio. El espécimen estudiado reposa en las colecciones de Fauna del Mioceno del Desierto de la Tatacoa del Museo Geológico Nacional 'José Royo y Gómez' de INGEOMINAS, en la ciudad de Bogotá.

LÁMINA 2

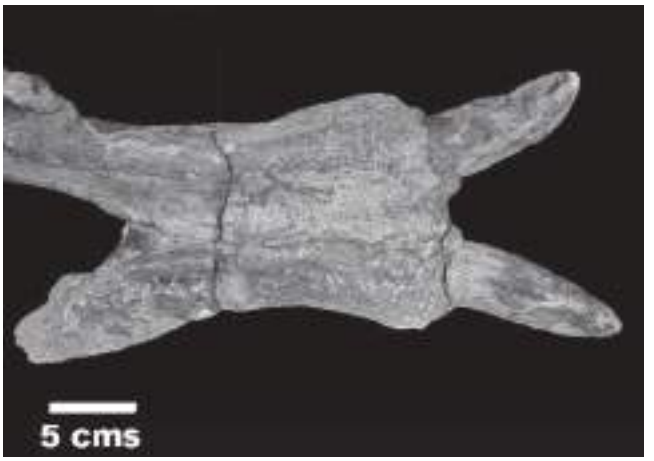


Foto 1. Detalle del diastema, sínfisis y caninos de *Granastrapotherium snorki* Jhonson & Madden, 1997. Vista oclusal.

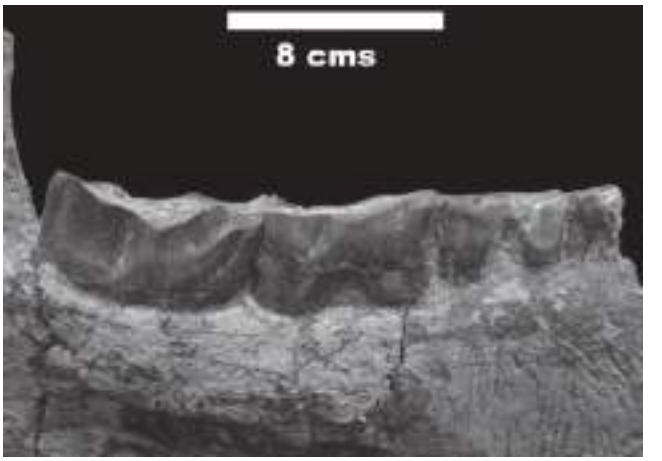


Foto 3. Detalle vista lingual de los molares de la rama mandibular izquierda (m3, m2, m1 y p4).

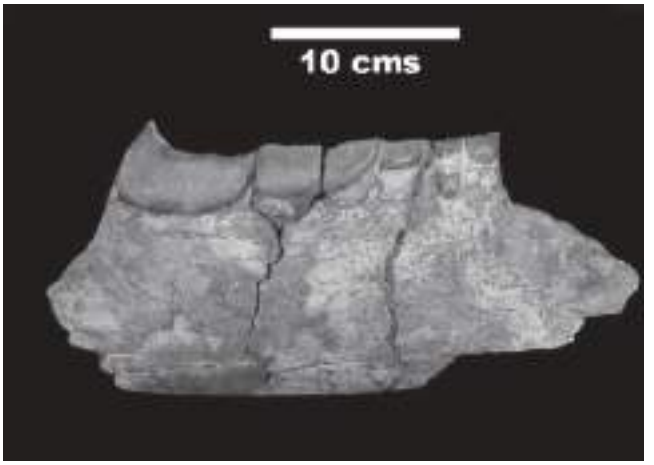


Foto 2. Detalle vista bucal de los molares de la rama mandibular derecha (m3, m2, m1 y p4).

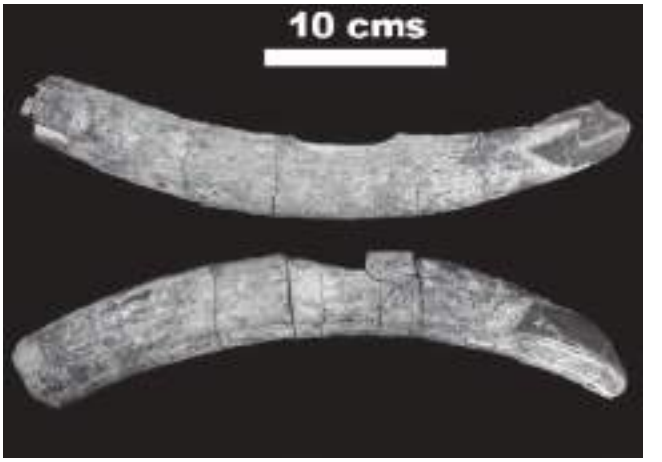


Foto 4. Caninos superiores asociados al hallazgo, pertenecen al mismo ejemplar. No se encontraron más piezas craneales.

Bibliografía

Ameghino, F. 1887. Enumeración sistemática de las especies de mamíferos fósiles coleccionados por Carlos Ameghino en los terrenos eocenos de Patagonia Austral y depositados en el Museo de La Plata. Boletín del Museo de La Plata **1**:1-26.

Guerrero, J. 1997. Stratigraphy, Sedimentary Environments, and the Miocene Uplift of the Colombian Andes in "Vertebrate Paleontology in the Neotropics. The Miocene Fauna of La Venta, Colombia". Edited by Richard F. Kay, Richard H. Madden, Richard L. Cifelli, and John J. Flynn. Smithsonian Institution Press. Washington and London.

Johnson, Steven C. & Madden, Richard H. 1997. Uruguaytheriinae Astrapotheres of Tropical South America. Chapter 22 in "Vertebrate Paleontology in the Neotropics. The Miocene Fauna of La Venta, Colombia". Edited by Richard F. Kay, Richard H. Madden, Richard L. Cifelli, and John J. Flynn. Smithsonian Institution Press. Washington and London.

Johnson, Steven C. 1984. Astrapotheres from the Miocene of Colombia, South America. University of California. Dissertation Submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Paleontology in the Graduate Division of the University of California, Berkeley.

Kraglievich, 1928. Sobre el supuesto *Astrapotherium christi* Stehlin, descubierto en Venezuela (*Xenastrapotherium n. gen.*) y sus relaciones con *Astrapotherium magnum* y *Uruguaytherium beaulieui*., 1-16. Editorial Franco-Argentina. Buenos Aires.

Lydekker, R. 1894. Contribution to the knowledge of the fossil vertebrates of Argentina. 3. Study of extinct Argentine ungulates. Anales del Museo de La Plata, Paleontología Argentina **2**:1-91, pls. 1-32.

Recibido: marzo 26 de 2010.

Aceptado para su publicación: junio 1 de 2010.

ESTUDIO TAXONÓMICO DE LOS CRUSTÁCEOS DECÁPODOS DE AGUA DULCE (TRICHODACTYLIDAE, PSEUDOTHELPHUSIDAE) DE CASANARE, COLOMBIA

Por

Martha R. Campos*

Resumen

Campos, M. R.: Estudio taxonómico de los crustáceos decápodos de agua dulce (Trichodactylidae, Pseudothelphusidae) de Casanare, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (131): 257-266, 2010. ISSN 0370-3908.

Se presentan los resultados del estudio taxonómico de los cangrejos de agua dulce del Casanare. Las especies pertenecen a las familias Trichodactylidae y Pseudothelphusidae. Trichodactylidae está representada por las especies: **a.** *Forsteria venezuelensis* (**Rathbun,** 1905) con nuevos registros para las cuencas de los ríos Upía, Caja y Cusiana, **b.** *Moreirocarcinus emarginatus* (**H. Milne Edwards,** 1853) que se registra para la cuenca del río Unete y corresponde a un nuevo registro para Casanare y **c.** *Poppiana dentata* (**Randall,** 1840) es también un nuevo registro para Casanare, de la cuencas de los ríos Cravo Sur y Unete. Pseudothelphusidae está representada por las especies: **a.** *Neostrengeria celioi* **Campos & Pedraza,** 2008, una nueva especie para Casanare, **b.** *Neostrengeria bataensis* **Campos & Pedraza,** 2008, originalmente descrita de Santa María, Boyacá, se registra por primera vez para Casanare y **c**. *Eudaniela casanarensis* (**Campos,** 2001), previamente conocida sólo de la localidad típica, extiende su distribución al piedemonte de Casanare.

Palabras clave: cangrejos de agua dulce, Brachyura, taxonomía, distribución, Región Neotropical.

Abstract

Results of a survey of freshwater crabs in Casanare are presented. The species belong to the families Trichodactylidae and Pseudothelphusidae. The Trichodactylidae are represented by the species: **a.** *Forsteria venezuelensis* (**Rathbun,** 1905), for which new records are reported from the Upía, the Caja and Cusiana river basins, **b.** *Moreirocarcinus emarginatus* (**H. Milne**

* Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales, Bogotá. Correo electrónico: mhrochad@unal.edu.co. Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Bogotá.

Edwards, 1853), reported here from the Unete River basin, a new record for Casanare and **c.** *Poppiana dentata* (**Randall,** 1840) also reported for the first time in Casanare, from the Cravo Sur and Unete river basins. Pseudothelphusidae are represented by the species: **a.** *Neostrengeria celioi* **Campos & Pedraza,** 2008, a new species for Casanare, **b.** *Neostrengeria bataensis* **Campos & Pedraza,** 2008, originally described from Santa María, Boyacá, herein reported for the first time from Casanare, and **c.** *Eudaniela casanarensis* (**Campos,** 2001), previously known only from the type collection from Aguazul, is herein reported to be widespread in the foothill region of Casanare.

Key words: freshwater crabs, Brachyura, taxonomy, distribution, Neotropical Region.

Introducción

Los estudios regionales son importantes para el conocimiento de la diversidad biológica, la distribución y la proposición de planes para su manejo y conservación. Uno de los aspectos relevantes en el establecimiento de los patrones de distribución lo representa la orogénesis andina. El Terciario se señala como la época en que emergieron gradualmente los Andes, mientras que las cordilleras colombianas sólo alcanzaron su nivel actual hacia el Pleistoceno Superior. Estos factores fueron determinantes en el proceso de aislamiento y especiación de organismos tales como los cangrejos de agua dulce.

La relación que existe entre las condiciones geográficas y ecológicas del medio son muy importantes, ya que determinan la presencia o ausencia de cangrejos y su distribución. Las barreras geográficas son uno de los aspectos que más influyen en la distribución y en el gradiente altitudinal de las especies. Adicionalmente la calidad del agua y la presencia de nutrientes esenciales es determinante en la distribución de las especies.

Al iniciar el estudio los únicos registros de cangrejos de agua dulce del Casanare eran las especies: *Forsteria venezuelensis* (**Rathbun,** 1905) para el municipio de Tauramena (**Campos,** 2005) y *Eudaniela casanarensis* (**Campos,** 2001), previamente conocida sólo de la localidad típica (**Campos,** 2001). Al concluir el estudio, se registra para la región lo siguiente: de la familia Pseudothelphusidae una nueva especie, *Neostrengeria celioi* **Campos & Pedraza,** 2008; *Neostrengeria bataensis* **Campos & Pedraza,** 2008, amplía su distribución de Boyacá al Casanare; *Eudaniela casanarensis* (**Campos,** 2001) extiende su distribución a gran parte del piedemonte de Casanare; para la familia Trichodactylidae las especies *Moreirocarcinus emarginatus* (**H. Milne Edwards,** 1853) y *Poppiana dentata* (**Randall,** 1840) constituyen nuevos registros para la región bajo estudio.

Materiales y métodos

Se efectuaron seis salidas de campo en diferentes épocas del año: verano, invierno, transición invierno-verano, con el fin de establecer la composición de cangrejos de las diferentes regiones que conforman el Departamento de Casanare. En los sitios seleccionados para realizar los muestreos, se hicieron exploraciones diurnas y nocturnas. Las colecciones se efectuaron de forma manual o con redes. Los especímenes colectados fueron preservados en etanol 70º y rotulados para su posterior determinación taxonómica en el Instituto de Ciencias Naturales. En el laboratorio, los especímenes fueron identificados con base en las claves de **Campos** (2005), **Magalhães & Türkay** (1996), **Rodríguez** (1982, 1992). La determinación taxonómica de las especies se basa esencialmente en la genitalia del macho. Una vez determinado el material, se establecieron las variaciones morfológicas de las diferentes poblaciones, se elaboraron las diagnosis e ilustraciones correspondientes. Igualmente se elaboró un mapa con la distribución de las especies. El material fue depositado en la colección de Crustáceos del Instituto de Ciencias Naturales (ICN-MHN-CR).

Resultados

Se colectaron 221 especímenes de cangrejos, pertenecientes al Orden Decapoda, Infraorden Brachyura, correspondientes a dos familias: Trichodactylidae **H. Milne Edwards,** 1853 y Pseudothelphusidae **Ortmann,** 1893.

Taxonomía

Infraorden Brachyura.
Trichodactylidae **H. Milne Edwards,** 1853.
Forsteria Bott, 1969.
Forsteria venezuelensis (**Rathbun,** 1905)
(Figura 1).

Material examinado. Casanare, **Sabanalarga**, Vereda Agua Caliente, Finca San Antonio, quebrada Piñalera,

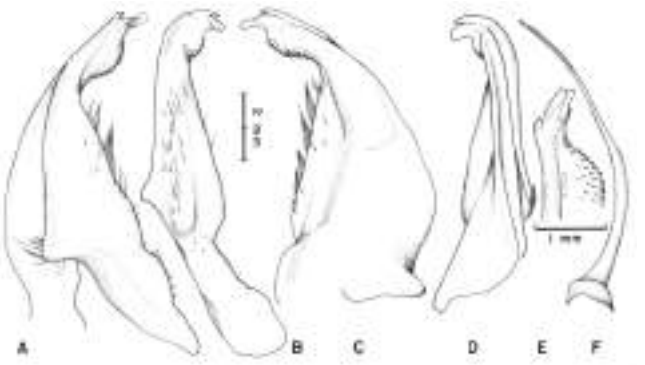


Figura 1. *Forsteria venezuelensis* (Rathbun, 1905), macho, ICN-MHN-CR. 2518: **A**, gonopodo izquierdo, vista caudal; **B**, el mismo, vista lateral; **C**, el mismo, vista cefálica; **D**, el mismo, vista mesial; **E**, el mismo, detalle del ápice, vista caudal; **F**, segundo gonopodo izquierdo, vista caudal.

afluente del río Upía, alt. 490 m, 4°51'14.5" N, 73°0.2'24.7" W, 27 May 2009, leg. M. R. Campos, 2 machos, 1 hembra, ICN-MHN-CR 2564.— **Sabanalarga**, Vereda El Carmen, Finca El Milagro, quebrada Quinchalera, afluente del río Upía, alt. 370 m, 4°50'5.4" N, 73°0.1'51.1" W, 28 May 2009, leg. M. R. Campos, 1 macho, 1 hembra, ICN-MHN-CR 2566.— **Tauramena**, Vereda Jube, Finca El Porvenir, caño afluente del río Caja, alt. 395 m, 5°1´50.8" N, 72°43´22.0" W, 18 Feb 2009, leg. M. R. Campos & Z. González, 8 machos, 8 hembras, ICN-MHN-CR. 2518.— **Tauramena**, Rondón, quebrada afluente del río Cusiana, alt. 450 m, 12 Feb 1974, leg. P. Cala, 1 macho, 2 hembras, ICN-MHN-CR 1795.

Diagnosis. Caparazón hexagonal, superficie dorsal arqueada, lisa; margen anterolateral con 3 a 4 dientes agudos, detrás del margen orbital; somitas abdominales del III al V fusionados, VI somita libre. Primer gonopodo del macho con porción basal ancha, parte media a distal inclinada lateralmente; lóbulo basal poco desarrollado, lóbulo subdistal bulboso, superficie caudolateral con hileras de prominentes espinas; ápice ornado con expansión córnea, setas laterales largas (Figura 1A-E). Segundo gonopodo de igual longitud al primero, parte distal plana y lanceolada (Figura 1F).

Distribución. *Forsteria venezuelensis* es registrada para el río Orinoco y varios de sus afluentes en Venezuela (**Rodríguez,** 1992); **Magalhães, & Türkay** (1996) registraron la especie para el río Meta en Colombia; **Campos** (2005) registró su distribución para varios de los tributarios del río Meta, para el río Guaviare y algunos de sus afluentes. En el presente estudio se extiende su distribución al Casanare, a las cuencas de los ríos Upía, Caja y Cusiana (Figura 9).

Moreirocarcinus **Magalhães & Türkay,** 1996.
Moreirocarcinus emarginatus (**H. Milne Edwards,** 1853)
(Figura 2).

Material colectado. Casanare, **Tauramena**, Vereda Chaparral, quebrada Palmareña, afluente del río Unete, alt. 443 m, 5°0.0' 7.4" N, 72°44'14.9" W, 17 Feb 2009, leg. M. R. Campos, 2 machos, 3 hembras, ICN-MHN-CR 2516.

Diagnosis. Caparazón subcircular, convexo en eje anteroposterior; margen anterolateral con 2 a 9 dientes agudos, detrás del margen orbital; somitas abdominales III al VI fusionados. Primer gonopodo del macho ancho basalmente, disminuye gradualmente su amplitud hacia la parte distal, ligeramente inclinado lateralmente; lóbulo lateral redondeado; superficie cefálica con lóbulo accesorio redondeado; lado lateral redondeado; lado mesial formando proyección lamelar que sobrepasa el ápice; contorno del ápice en forma de ranura, con abertura caudal; lado lateral con parche de espínulas distales, hilera de espinas cortas en el lado mesial (Figura 2A-E). Segundo gonopodo más largo que el primero y sinuoso (Figura 2F).

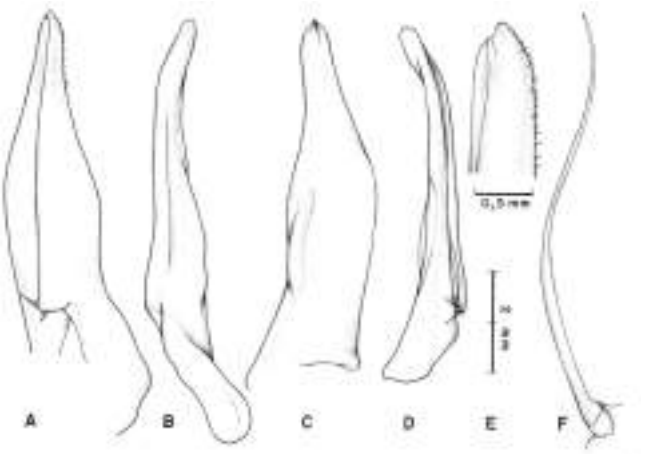


Figura 2. *Moreirocarcinus emarginatus* (H. Milne Edwards, 1853), macho, ICN-MHN-CR 2516: **A**. gonopodo izquierdo, vista caudal; **B**. el mismo, vista lateral; **C**. el mismo, vista cefálica; **D**. el mismo, vista mesial; **E**. el mismo, detalle del ápice, vista caudal; **F**. segundo gonopodo izquierdo, vista caudal.

Distribución. *Moreirocarcinus emarginatus* presenta una amplia distribución que se extiende desde Venezuela, Colombia, Brasil, Ecuador y Perú (**Smalley & Rodríguez,** 1972, **Rodríguez,** 1992, **Magalhães,** 2003, **Campos,** 2005). La presente contribución extiende su distribución al Casanare, a la cuenca del río Unete (Figura 9).

Poppiana Bott, 1969.
Poppiana dentata (**Randall,** 1840)
(Figura 3).

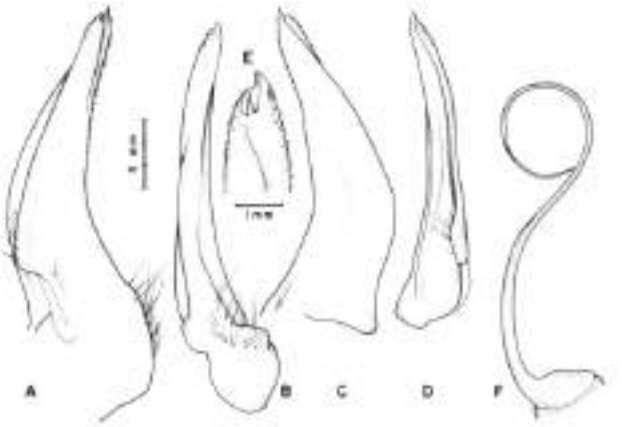


Figura 3. *Poppiana dentata* (Randall, 1840), macho, ICN-MHN-CR 2549: **A**, gonopodo izquierdo, vista caudal; **B**, el mismo, vista lateral; **C**, el mismo, vista cefálica; **D**, el mismo, vista mesial; **E**, el mismo, detalle del ápice, vista caudal; **F**, segundo gonopodo izquierdo, vista caudal.

Material colectado. Casanare, **Tauramena**, Vereda Visinaca, Sitio El Plan de la Laguna, afluente del río Unete, alt. 549 m, 5°8'42" N, 72°44'49.5" W, 20 Feb 2009, leg. M. R. Campos & Z. González, 1 macho, 1 hembra, ICN-MHN-CR 2522.— **Yopal**, Corregimiento Quebrada Seca, afluente del río Cravo Sur, en canales artificiales, alt. 140 m, 17 Ago 2007, leg. J. Cortés, 2 machos, ICN-MHN-CR 2459.

Diagnosis. Caparazón subcircular, convexo en eje anteroposterior; margen anterolateral con 6 a 12 dientes agudos, detrás del margen orbital; somitas abdominales III al VI fusionados. Primer gonopodo del macho disminuye gradualmente su amplitud hacia la parte distal; inclinado lateralmente, lado mesial cóncavo, lado lateral ligeramente convexo; margen gradualmente desplazado hacia la superficie mesocefálica y surge en la superficie caudal cerca del ápice; lóbulo lateral ausente; contorno del ápice en forma de V, abertura debajo de proceso en forma de espina; espinas apicales translúcidas que disminuyen de tamaño distalmente, formando parche sobre las superficies caudal y lateral, lado mesial con hileras de espinas translúcidas, setas laterales, basales largas, conspicuas (Figura 3A-D). Segundo gonopodo más largo que el primero y en forma de signo de interrogación (Figura 3F).

Distribución. *Poppiana dentata* se distribuye en Isla Trinidad, Venezuela, Guyana, Suriname, Guyana Francesa, Colombia, Brasil (**Smalley & Rodríguez,** 1972, **Rodríguez,** 1992, **Magalhães,** 2003). **Campos** (2005) registró su distribución en Colombia para el río Casanare en la región de Arauca y al norte del país para las cuencas de los ríos Sinú y Magdalena. El presente estudio extiende la distribución de la especie a la cuencas del los ríos Cravo Sur y Unete en el piedemonte de Casanare (Figura 9). Adicionalmente, se amplía su rango altitudinal de 0 a 549 m, superando el registrado por Campos (2005) de 0 a 80 m.

Pseudothelphusidae **Ortmann,** 1893.
Eudaniela **Pretzmann,** 1971.
Eudaniela casanarensis (**Campos,** 2001)
(Figura 4).

Material examinado. Casanare, **Aguazul**, 26 km SW de Yopal, alt. 290 m, 3 Oct 1995, leg. F. Fernández, 1 macho holotipo, 1 macho paratipo, ICN-MHN-CR 1626, 1862.— **Aguazul**, Vereda Monterralo, quebrada borde de carretera Aguazul-Sogamoso, alt. 638 m, 5°14' N, 72°40' W, 19 Oct 2007, leg. M. R. Campos, 3 machos, 6 hembras, ICN-MHN-CR 2474.— **Aguazul**, Vereda Cupiagua, Caño afluente quebrada Chichacá, alt. 690 m, 5° 14' N, 72° 41' W, 19 Oct 2007, leg. M. R. Campos, 5 machos, 6 hembras, 3 juveniles, ICN-MHN-CR 2475.— **Aguazul**, Vereda Cuarto Unete, Finca

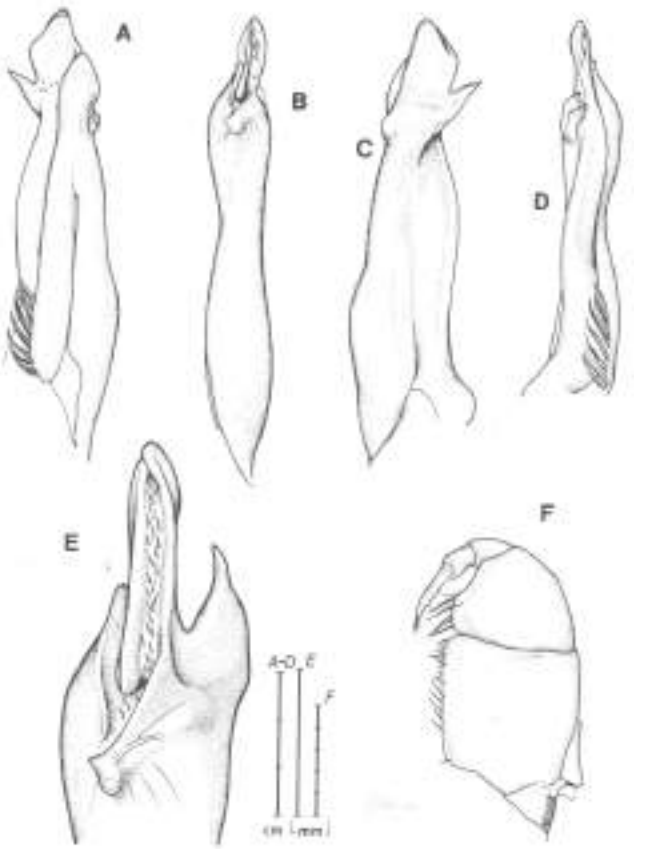


Figura 4. *Eudaniela casanarensis* (Campos, 2001), macho, ICN-MHN-CR 2513: **A**, gonopodo izquierdo, vista caudal; **B**, el mismo, vista lateral; **C**, el mismo, vista cefálica; **D**, el mismo, vista mesial; **E**, el mismo, ápice, vista distal; **F**, tercer maxilípedo, vista externa.

Topacio, 550 m, 5º 11' N, 72º 33' W, 22 Octubre 2007, leg. M. R. Campos, 2 machos, 5 hembras, ICN-MHN-CR 2479.— **Aguazul**, Vereda Cuarto Unete, Finca San Antonio, alt. 650 m, 5° 12' N, 72° 33' W, 22 Oct 2007, leg. M. R. Campos, 7 machos, 2 hembras, ICN-MHN-CR 2480.— **Aguazul**, Vereda Cupiagua, vía al Pozo Liria 1, Caño afluente quebrada Cupiagüera, alt. 580 m, 5° 13' N, 72° 38' W, 23 Oct 2007, leg. M. R. Campos, 1 macho, 3 hembras, ICN-MHN-CR 2481.— **Monterrey**, Vereda La Tigrana, quebrada Calabacera, alt. 495 m, 4°55'31.8" N, 72°54'4" W, 22 Ene 2009, leg. L. A. Nuñez, 1 macho, 9 hembras, ICN-MHN-CR 2513.— **Támara**, Vereda Uaseque, quebrada Costarica, Finca Paraiso, alt. 1000 m, 5°50'N, 72°09'W, 20 Oct 2007, leg. M. R. Campos, 1 macho, 6 hembras, ICN-MHN-CR 2476.— **Támara**, Vereda Chaparral, Finca Villa Claudia, alt. 750 m, 5°5'N, 72°28'W, 21 Oct 2007, leg. M. R. Campos, 5 machos, 3 hembras, ICN-MHN-CR 2478, 2487.— **Támara**, Vereda Loma Redonda, Finca El Misterio, en nacedero, alt. 915 m, 5°49'39.6" N, 72°10'35.4" W, 6 Abr 2009, leg. Z. González, 6 machos, 5 hembras, ICN-MHN-CR 2560.— **Tauramena**, Vereda Bendiciones, Finca La Alcancia, quebrada Algarrobera, alt. 715 m, 5°0.4'0.4" N, 72°48'23.5" W, 19 Feb 2009, leg. M. R. Campos & Z. González, 3 machos, 1 hembra, ICN-MHN-CR 2520.— **Tauramena**, Vereda Bendiciones, quebrada afluente río Caja, alt. 449 m, 5°3'22" N, 72°47'0.9" W, 19 Feb 2009, leg. M. R. Campos, 1 macho, ICN-MHN-CR 2521.- Vereda Visinaca, sitio El Plan de la Laguna, alt. 549 m, 5°8'42" N, 72°44'49.7" W, 20 Feb 2009, leg. M. R. Campos & Z. González, 3 machos, 1 hembra, ICN-MHN-CR 2523.— **Tauramena**, Vereda Visinaca, Finca La Gotereña, alt. 654 m, 5°0.8'21.7" N, 72°44'52.3" W, 20 Feb 2009, leg. Z. González, 1 macho, ICN-MHN-CR 2524.— **Tauramena**, Vereda Visinaca, Finca La Gotereña, alt. 670 m, 5°8'31.1" N, 72°45'2.5" W, 20 Feb 2009, leg. Z. González & M. R. Campos, 6 machos, 1 hembra, ICN-MHN-CR 2525, 2526.— **Tauramena**, Vereda Mesitas, Finca El Tesoro, caño La Arenera, alt. 160 m, 4°19'10.7" N, 72°29'26.4" W, 17 Jul 2009, leg. M. R. Campos, 5 machos, 4 hembras, 4 juveniles, ICN-MHN-CR 2581.— **Yopal**, Vereda Balcones, Finca El Refugio, cerca al Mirador, alt. 450 m, 5°20' N, 72°25' W, 25 Oct 2007, leg. M. R. Campos, 6 machos, 5 hembras, ICN-MHN-CR 2485.— **Yopal**, Corregimiento El Morro, Vereda Guayaquito, quebrada Tablona, alt. 480 m, 5°26' N, 72°27' W, 18 Oct 2007, leg. M. R. Campos, 4 machos, 3 hembras, 10 juveniles, ICN-MHN-CR 2472.— **Yopal**, Corregimiento El Morro, Caño borde de carretera El Morro Labranza-grande, alt. 635 m, 5°27' N, 72°27' W, 18 Oct 2007, leg. M. R. Campos, 8 machos, 1 hembra, ICN-MHN-CR 2473.

Diagnosis. Tercer maxilipedo con merus del endognato regularmente redondeado, exognato cerca de 0.5 veces la longitud del ischium (Figura 4F); canal eferente parcialmente cerrado por la espina del ángulo yugal y por el lóbulo lateral del epistoma. Primer gonopodo del macho recto, con proceso marginal ancho; proceso mesial subapical en forma de espina; lámina mesial cuadrada o ligeramente redondeada; ápice con láminas mesial y cefálica en su porción distal superpuestas o paralelas (Figura 4A-E).

Comentario. No se observaron variaciones morfológicas del gonopodo en los especimenes examinados.

Distribución. El único registro de *Eudaniela casanarensis* era la localidad típica: Aguazul, Casanare (**Campos,** 2001). La presente contribución permite extender su distribución a gran parte del piedemonte de Casanare (Figura 9) y ampliar su rango altitudinal de 290 a 1000 m.

Neostrengeria Pretzmann, 1965.
Neostrengeria bataensis **(Campos & Pedraza,** 2008) (Figura 5).

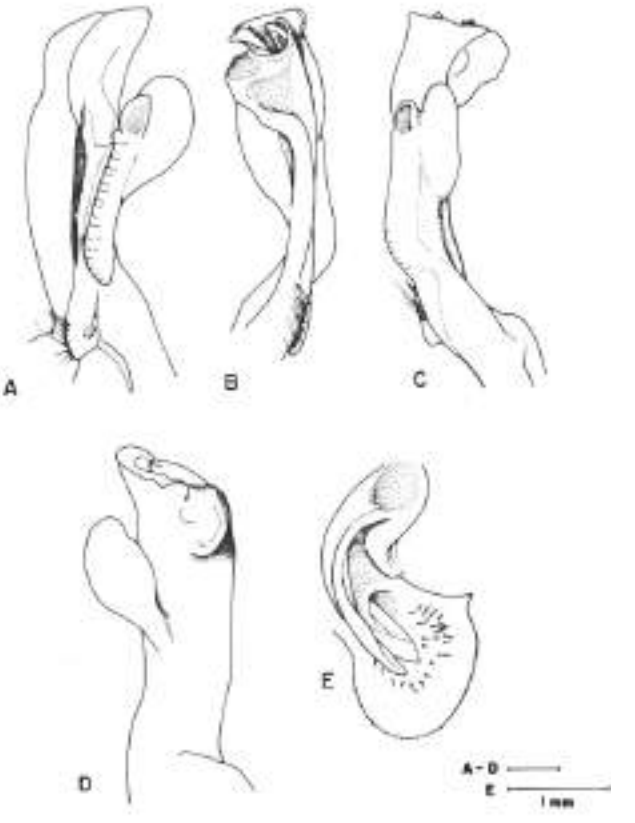


Figura 5. *Neostrengeria bataensis* (Campos & Pedraza, 2008), macho holotipo, ICN-MHN-CR 2489: **A**, gonopodo izquierdo, vista caudal; **B**, el mismo, vista mesial; **C**, el mismo, vista lateral; **D**, el mismo, vista cefálica; **E**, el mismo, ápice, vista distal.

Material colectado. Casanare, **Monterrey**, Vereda La Tigrana, Caño borde carretera Monterrey-Acueducto, alt. 540 m, 4°55' N, 72°54' W, 24 Oct 2007, leg. M. R. Campos, 1 macho, ICN-MHN-CR 2484.— **Sabanalarga,** Vereda El Silbadero, quebrada Quinchalera, alt. 700 m, 4°50'45.3" N, 73°0'9.9" W, 27 May 2009, leg. M. R. Campos, 2 machos, 2 hembras, 3 juveniles, ICN-MHN-CR 2565.— **Tauramena,** Vereda Lagunitas, Finca Los Gaques, quebrada Malpaso, afluente río Sunce, alt. 900 m, 5°9'32.02" N, 72°47'36.3" W, 18 Jul 2009, 22 Abr 2010, leg. M. R. Campos, 3 machos, 11 hembras, ICN-MHN-CR 2582, 2608.

Diagnosis. Primer gonopodo del macho con lado mesial convexo, ligera depresión subdistal; lóbulo lateral semicircular, parte distal redondeada; lóbulo accesorio elongado, recto, excavado y semiagudo distalmente, con estriaciones en superficie caudal y protuberancia seguido de depresión interna subdistal, más corto que el lóbulo lateral; parte distal de los lóbulos lateral y accesorio separados por pequeño receso; contorno del ápice oval, en vista distal, borde caudolateral amplio, redondeado; espina cefálica prominente, aguda; lóbulo mesial subtriangular expandido en forma de proyección semicircular cefálicamente (Figura 5A-E).

Comentarios. La especie presenta algunas variaciones morfológicas del primer gonopodo del macho en comparación con el holotipo (Figura 5A-E). El lóbulo lateral varía desde semicircular con el borde proximal anguloso (ICN-MHN-CR 2565, 2582) (Figura 6A,B), hasta elongado (ICN-MHN-CR 2484) (Figura 6C); el lóbulo accesorio muy angosto con el extremo distal redondeado, proyectado de forma convexa con respecto al margen del gonopodo (ICN-MHN-CR 2565) (Figura 6A) muy elongado (ICN-MHN-CR 2484) (Figura 6C), ligeramente sinuoso (ICN-MHN-CR 2582) (Figura 6B). El contorno del ápice aunque conserva la forma oval, se observan variaciones con respecto a la menor expansión del borde caudolateral (ICN-MHN-CR 2582, 2484) (Figura 6E,F), la espina cefálica menos conspicua y dirigida mesialmente (ICN-MHN-CR 2582) (Figura 6E) y la proyección mesocaudal del canal espermático con la papila interna redondeada, más corta que la externa y su borde ornado con 4 espínulas (ICN-MHN-CR 2565) (Figura 6 D).

Distribución. Los registros de *Neostrengeria bataensis* eran de la localidad típica: Boyacá, Santa María y de Cundinamarca, Ubalá Sector B (**Campos & Pedraza,** 2008). La presente contribución permite ampliar su distribución al Casanare, a los municipios de Tauramena, Monterrey y Sabanalarga (Figura 9).

Neostrengeria celioi (**Campos & Pedraza,** 2008) (Figura 7).

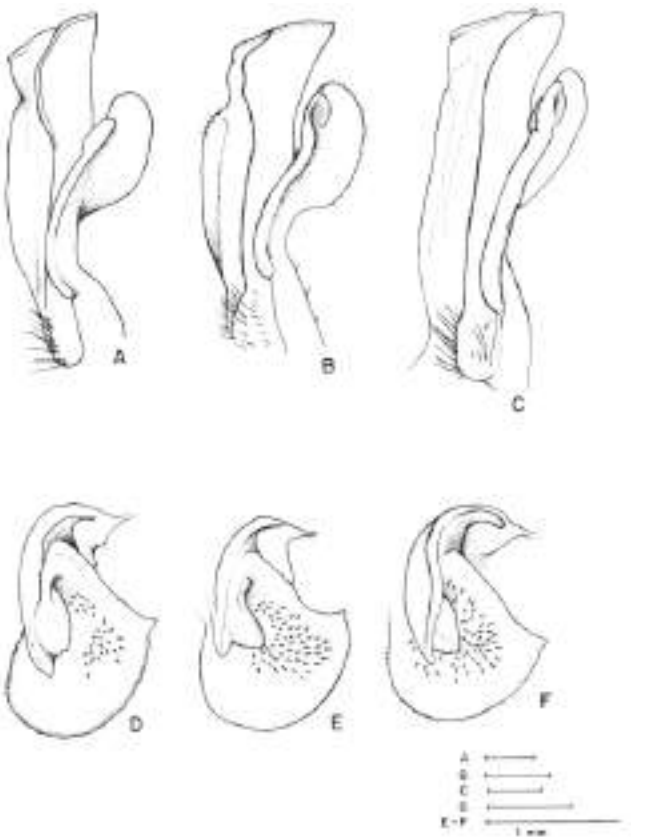


Figura 6. *Neostrengeria bataensis* (Campos & Pedraza, 2008), gonopodo izquierdo, ICN-MHN-CR 2565, 2582, 2484: **A-C**, vista caudal; **D-F**, el mismo, ápice, vista distal.

Material colectado. Casanare, **Aguazul**, Vereda Cupiagua, Caño afluente quebrada Palmicha, alt. 720 m, 5°14' N, 72°38' W, 19 Oct 2007, leg. M. R. Campos, 1 macho, holotipo, ICN-MHN-CR 2490.— **Aguazul**, Vereda Cupiagua, Caño afluente quebrada Palmicha, alt. 720 m, 5°14' N, 72°38' W, 19 Oct 2007, leg. M. R. Campos, 3 hembras, paratipos, ICN-MHN-CR 2482.— **Sabanalarga**, Vereda Planadas, quebrada Visperana, alt. 800 m, 4°55'28.9" N, 72°58'10.5" W, 26 May 2009, leg. M. R. Campos, 1 macho, 4 hembras, 2 juveniles, ICN-MHN-CR 2562.— **Sabanalarga**, Vereda Piñalera, caño afluente quebrada Piñalera, alt. 460 m, 4°53'5.7" N, 73°0'57.3" W, 26 May 2009, leg. M. R. Campos, 1 macho juvenil, 1 hembra, ICN-MHN-CR 2563.— **Sácama**, Vereda El Rincón, quebrada Agua Bendita, alt. 1274 m, 6°05'52.5" N, 72°15'14.3" W, 3 Abr 2009, leg. Z. González, 6 machos, 7 hembras, ICN-MHN-CR 2556.— **Támara,** Vereda La Picacha, quebrada La Picacha, Finca Paraiso, alt. 1100 m, 5°49'22.0" N, 72°10'15.5" W, 20 Oct 2007, leg. M. R. Campos, 2 hembras, ICN-MHN-CR 2477.— **Támara,** Vereda La Picacha, quebrada La Picacha, alt. 1130 m, 5°49'50.3" N, 72°10'42.1"

W, 7 Abr 2009, leg. Z. González, 1 macho, ICN-MHN-CR 2561.— **Yopal**, quebrada Aguazula, alt. 300 m, 29 Sep 1996, leg. C. Torres, 2 machos, ICN-MHN-CR 1651.

Diagnosis. Primer gonopodo del macho con lado mesial casi recto y profunda depresión subdistal; lóbulo lateral semicircular, parte distal redondeada, dirigida hacia el eje del gonopodo; lóbulo accesorio en forma de espátula, parte distal excavada, ligeramente más corto que el lóbulo lateral; parte distal de los lóbulos lateral y accesorio separados por amplio receso; contorno del ápice subtriangular, en vista distal, borde caudocefálico amplio, redondeado con depresión en su parte media; espina cefálica, prominente, subaguda; lóbulo mesial subtriangular en vista distal, semicircular en vista mesial, dirigido cefalolateralmente (Figura 7A-E).

Comentarios. La especie presenta algunas variaciones morfológicas del primer gonopodo del macho, en comparación con el holotipo (Figura 7A-E). El lóbulo lateral más pequeño con el borde proximal anguloso y el lóbulo accesorio con una protuberancia en su parte media (ICN-MHN-CR 2556) (Figura 8A): los lóbulos lateral y accesorio más angostos y la porción distal subaguda (ICN-MHN-CR 2562) (Figura 8B); los lóbulos lateral y accesorio sin receso entre ellos, en vista lateral (ICN-MHN-CR 2561) (Figura 8C); aunque el ápice conserva el contorno subtriangular, presenta variaciones en la ausencia de la depresión en la parte media del borde caudocefálico (ICN-MHN-CR 2556, 2562, 2561) (Figura 8D-F), la espina cefálica menos conspicua (ICN-MHN-CR 2556) (Figura 8D), la espina cefálica curvada cefalicamente (ICN-MHN-CR 2562) (Figura 8E).

Distribución. El único registro de *Neostrengeria celioi* era de la localidad típica: Casanare, Aguazul (**Campos & Pedraza,** 2008). La presente contribución permite extender la distribución de la especie desde el municipio de Sácama hasta el municipio de Sabanalarga en el Casanare (Figura 9) y ampliar el rango altitudinal de 300 a 1274 m.

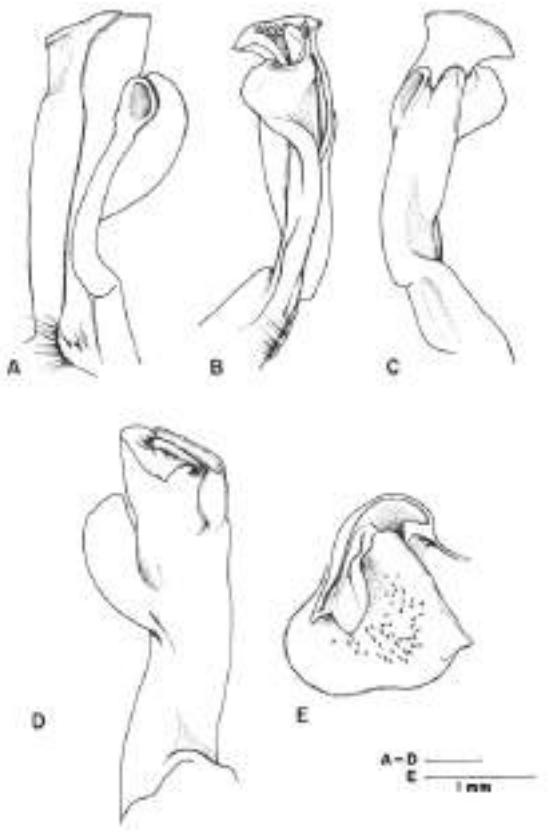


Figura 7. *Neostrengeria celioi* (Campos & Pedraza, 2008), macho holotipo, ICN-MHN-CR 2490: **A**, gonopodo izquierdo, vista caudal; **B**, el mismo, vista mesial; **C**, el mismo, vista lateral; **D**, el mismo, vista cefálica; **E**, el mismo, ápice, vista distal.

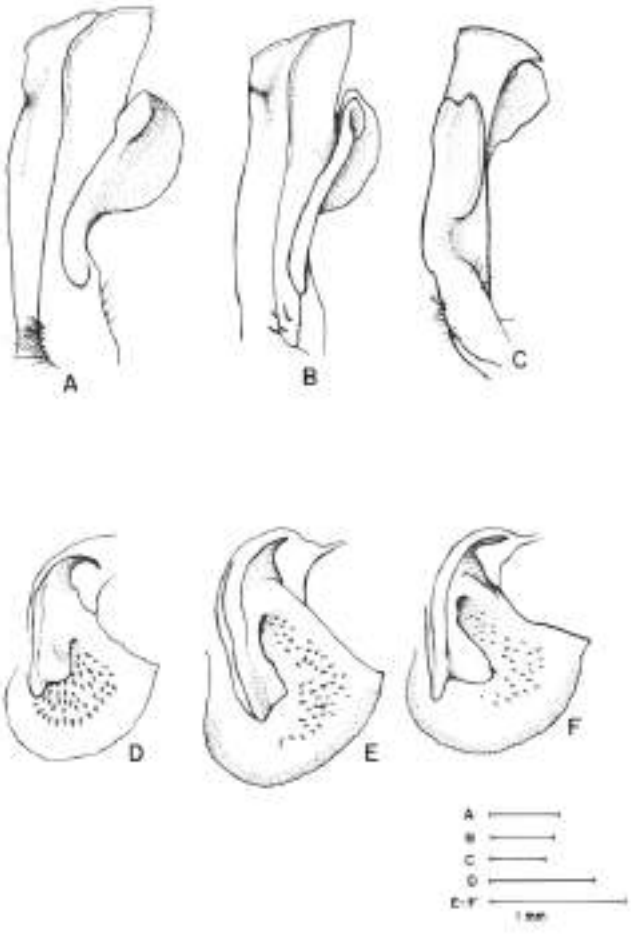


Figura 8. *Neostrengeria celioi* Campos & Pedraza, 2008**,** gonopodo izquierdo, ICN-MHN-CR 2565, 2582, 2484: **A-C**, vista caudal; **D-F**, el mismo, ápice, vista distal.

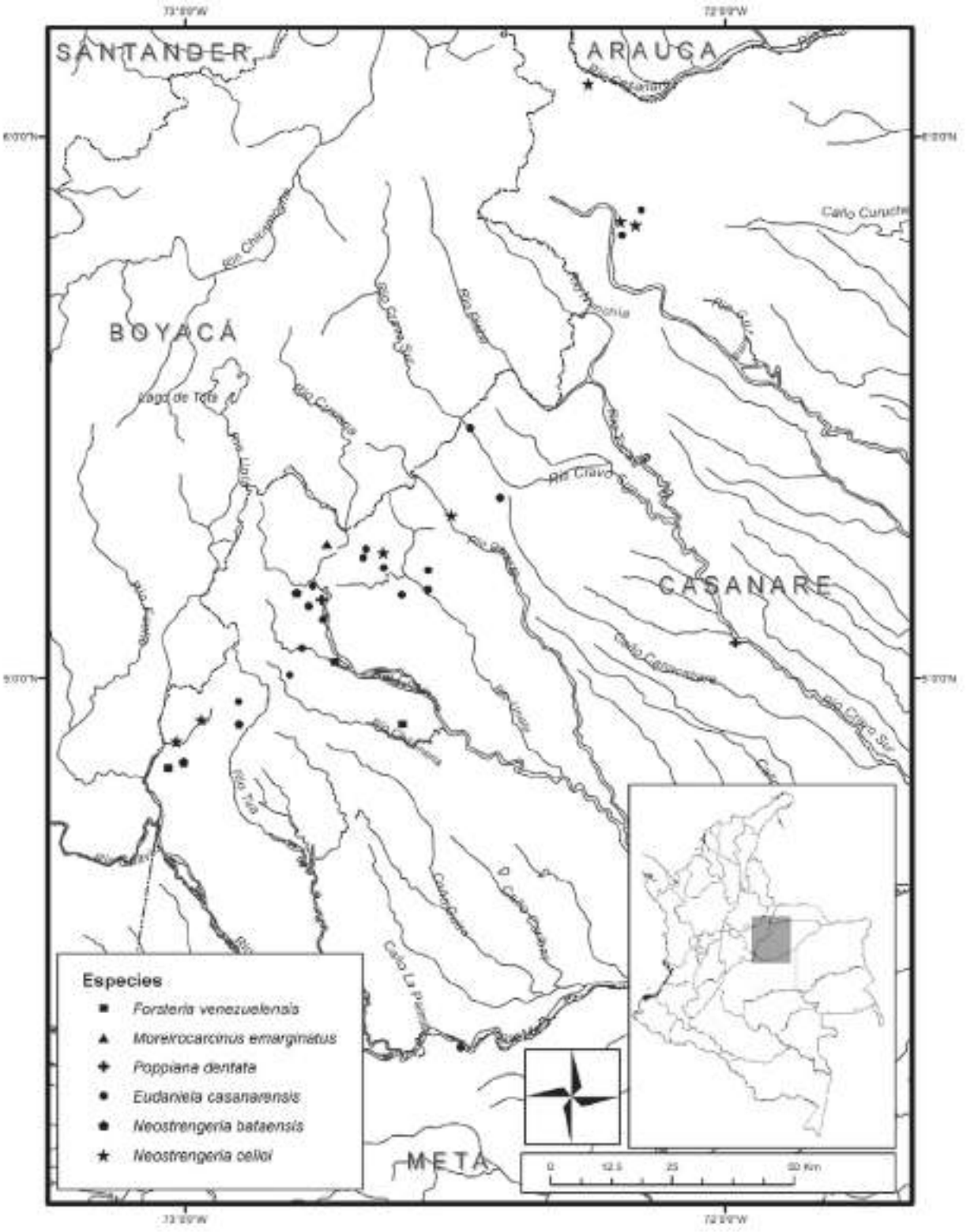


Figura 9. Distribución de las especies *Forsteria venezuelensis* (Rathbun, 1905), *Moreirocarcinus emarginatus* (H. Milne Edwards, 1853), *Poppiana dentata* (Randall, 1840), *Eudaniela casanarensis* (Campos, 2001), *Neostrengeria bataensis* (Campos & Pedraza, 2008) y *Neostrengeria celioi* (Campos & Pedraza, 2008) en Casanare.

Discusión y conclusiones

El estudio permitió establecer para la región de Casanare: **a.** una nueva especie de la familia Pseudothelphusidae: *Neostrengeria celioi* Campos & Pedraza, 2008; **b.** nuevos registros para las especies *Moreirocarcinus emarginatus* (**H. Milne Edwards,** 1853) y *Poppiana dentata* (**Randall,** 1840), pertenecientes a la familia Trichodactylidae y para *Neostrengeria bataensis* **Campos & Pedraza,** 2008, perteneciente a la familia Pseudothelphusidae y **c.** ampliación de la distribución y rango altitudinal de las especies colectadas en el desarrollo del proyecto. Todo esto muestra la importancia de esta región como punto estratégico para estudios de biodiversidad.

Familia Trichodactylidae. 1. *Forsteria venezuelensis* se registra para las cuencas de los ríos Upía, Caja y Cusiana, tributarios del río Meta. Lo cual permite establecer que su distribución se centra en la cuenca de la Orinoquía (Figura 9). **2.** *Moreirocarcinus emarginatus* se registra por primera vez para la región de Casanare, en particular para la cuenca del río Unete en el piedemonte de Casanare (Figura 9). Esta especie presenta una amplia distribución que se extiende desde Venezuela, Colombia, Brasil, Ecuador y Perú. **3.** *Poppiana dentata* se distribuye en Isla Trinidad, Venezuela, Guyana, Suriname, Guyana Francesa, Colombia y Brasil. En Colombia hay registros para el río Casanare en la región de Arauca y al norte del país para las cuencas de los ríos Sinú y Magdalena. Su distribución se extiende ahora a las cuencas de los ríos Cravo Sur y Unete en el piedemonte de Casanare (Figura 9) y se amplía el rango altitudinal de 0 a 549 m.

Familia Pseudothelphusidae: 1. La nueva especie *Neostrengeria celioi* cuya localidad típica es Casanare, Aguazul, Vereda Cupiagua, alt. 720 m (**Campos & Pedraza,** 2008), exitiende su distribución desde el municipio de Sácama hasta el municipio de Sabanalarga en el piedemonte de Casanare (Figura 9) y amplía su rango altitudinal de 300 a 1274 m. **2.** Los registros de *Neostrengeria bataensis* son Boyacá, Santa María y Cundinamarca, Ubalá Sector B (**Campos & Pedraza,** 2008). Esta especie amplía su distribución al Casanare a los municipios de Tauramena, Monterrey y Sabanalarga (Figura 9). **3.** El único registro de *Eudaniela casanarensis* era Aguazul, Casanare, alt. 290 m (**Campos,** 2001, 2005). Las colecciones efectuadas durante el desarrollo de la investigación permiten extender la distribución de la especie a gran parte del piedemonte de Casanare (Figura 9) y ampliar el rango altitudinal de 290 a 1000 m.

Es importante anotar que la presencia de cangrejos en las diferentes cuencas de la región del Casanare permiten considerarlas como aguas de buena calidad. Sin embargo, la constante presión sobre los diferentes ecosistemas, por ejemplo tala de los bosques de galería, vertimiento de aguas negras y basuras de las casas aledañas a las quebradas, ponen en riesgo la calidad de las aguas y en consecuencia hacen más vulnerables las especies.

Agradecimientos

Esta investigación fue cofinanciada por la División the Investigación, Sede Bogotá, DIB, Universidad Nacional de Colombia. La autora agradece al Dr. Celio Magalhães sus valiosas observaciones al manuscrito. Las ilustraciones fueron elaboradas así: Figura 1 - 4 por Juan C. Pinzón, Figura 5 y 7 por Luis A. Guerra y Figura 6 y 8 por Carolina Medellín. El mapa fue realizado por Rubén D. Albarracín.

Referencias

Bott, R. 1969. Die Süsswasserkrabben Süd-Amerikas und ihre Stammesgeschichte. Eine Revision der Trichodactylidae und der Pseudothelphusidae östlich der Anden (Crustacea, Decapoda). Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft (Franktfurt am Main) 518: 1-94.

Campos, M. R. 2001. A new genus and species of freshwater crab from Colombia (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae). Proceedings of the Biological Society of Washington 114: 938-943.

_____ 2005. Freshwater crabs from Colombia. A taxonomic and distributional study. Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Col. Jorge Alvarez Lleras No. 24: 1-363.

Campos, M. R. & M. Pedraza. 2008. Two new species of freshwater crab of the genus *Neostrengeria* Pretzmann, 1965, from Colombia (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae), with an updated key of the species of the genus. Caldasia 30: 457-468.

Magalhães, C. 2003. Famílias Pseudothelphusidae Trichodactylidae. *En* De Melo, G. A. Manual de identificaVão dos Crustacea Decapoda de água doce do Brasil, 1-429.

Magalhães, C. & M. Türkay. 1996. Taxonomy of the Neotropical Freshwater crab family Trichodactilidae. Senckbergiana biologica, Frankfurt am Main 75 (1/2): 63-142.

Milne Edwards, H. 1853. Mémoire sur la famille des ocypodiens. Annales des Sciences Naturelle, Zoologie 20: 163-228.

Ortmann, A. 1893. Die Dekapoden-Krebse des Strassbourg Museums, mit besonder berücksichtigung der von Herrn Dr. Döderlein bei Japan und bei den Liu-Kiu-Inseln gesammelten und zur Zeit im Strassburger Museum aufbewahrten Formen. VII Theil Abtheilung: Brachyura (Brachyura genuina Boas) II. Unterabtheilung: Cancroidea, 2 Section: Cancrinea, 1. Gruppe: Cyclometopa. Zoologische Jahrberichter, 7: 411-495.

Pretzmann, G. 1965. Vorläufiger Bericht über die Familie Pseudothelphusidae. Anzeiger der Österreichischen Akademie der Wissenschaften Mathematische Naturwissenschaftliche Klasse (1) 1: 1-10.

_____. 1971. Fortschritte in der Klassifizierung der Pseudothelphusidae. Anzeiger der Mathematisch Naturwissenschaftliche der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (1)179 (1- 4): 14-24.

Randall, J. W. 1840. Catalogue of the Crustacea brought by Thomas Nuttall and J. K. Towsend from the West Coast of North Americam and the Sandwich Island, with description of such species as are apparently new, among which are included several species of different localities, previously existing in the collection of the Academy. Journal of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia 8:106-147.

Rathbun, M. J. 1905. Les crabes d´eau douce (Potamonidae). Nouvelles Archives du Muséum d´Histoire Naturelle, Paris 7: 159-321.

Rodríguez, G. 1982. Les crabes d'eau douce d'Amérique. Famille des Pseudothelphusidae. Faune Tropicale 22: 1-223.

_____**.** 1992. The freshwater crabs of America. Family Trichodactylidae and supplement to the family Pseudothelphusidae. Faune Tropicale 31: 1-189.

Smalley, A. & G. Rodríguez. 1972. Trichodactylidae from Venezuela, Colombia and Ecuador (Crustacea, Brachyura). Tulane Studies in Zoology and Botany, 17: 41-55.

Recibido: abril 28 de 2010.

Aceptado para su publicación: junio 1 de 2010.