



ISSN 0370-3908

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

Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 38 · Número 148 · Págs. 233-342 · Julio - Septiembre de 2014 · Bogotá - Colombia





ISSN 0370-3908

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

Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 38 · Número 148 · Págs. 233-342 · Julio - Septiembre de 2014 · Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editoras

Elizabeth Castañeda
Instituto Nacional de Salud,
Bogotá, Colombia

Carmenza Duque
Universidad de La Sabana, Chía, Colombia
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Editores asociados

Ciencias físicas y matemáticas

Bernardo Gómez
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Pedro Fernández de Córdoba
Universidad Politécnica de Valencia, España

Rubén Antonio Vargas
Universidad del Valle,
Cali, Colombia

Victor Albis
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Ciencias naturales (biología, botánica, zoología, ecología, bioquímica)

Gabriel Roldán
Universidad Católica de Oriente,
Rionegro, Antioquia, Colombia

M. Gonzalo Andrade
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Jaime Ricardo Cantera
Universidad del Valle,
Cali, Colombia

José Luis Fernández
Real Jardín Botánico, Consejo Superior de
Investigaciones Científicas, Madrid, España

Thomas Defler
Universidad Nacional de Colombia,
Leticia, Colombia

Ciencias de la tierra

Germán Poveda
Universidad Nacional de Colombia,
Medellín, Colombia

Armando Espinosa
Universidad del Quindío,
Armenia, Colombia

Carlos Alberto Vargas
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

José Ignacio Martínez
Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

Ciencias humanas

Guillermo Páramo
Universidad Central, Bogotá, Colombia

Rubén Ardila
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Ciencias biomédicas

Felipe Guhl
Universidad de Los Andes,
Bogotá, Colombia

Luis Fernando García
Universidad de Antioquia,
Medellín, Colombia

Ciencias químicas

Fanor Mondragón
Universidad de Antioquia,
Medellín, Colombia

Moisés Wasserman
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Sonia Moreno
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Comité científico internacional

Ángela María Guzmán
University of Central Florida,
Orlando, Estados Unidos

Antoine M. Cleef
University of Amsterdam, Holanda

Carlos Jiménez
Universidad de La Coruña, España

Gioconda San Blas
Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas
y Naturales, Caracas, Venezuela

José Rubens Pirani
Universidade de São Paulo, Brasil

Wolfgang Gieren
Universidad de Concepción, Chile

Asistencia y coordinación editorial Carolina Acosta

Corrección de estilo y ortografía
Marta Renza

Diagramación
Johanna Morales

Impresión y acabados
Gente Nueva

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Actualidad Iberoamericana

Agris

CIRS

Current Mathematical Publications

Dialnet

EBSCO

Historia Mathematica

Index Kewensis

Latindex

Mathematical Reviews

MathSciNet (on line data base)

OCLC (Online Computer Library Center)

PERIODICA

Publindex, Colciencias

RLG

SciELO

Zentralblatt für Mathematik

Zoological Record

Periodicidad: trimestral

Fecha de inicio: 1936

Tamaño: 21,5 x 27 cm

Papel: proplamate de 90 gr.

Solicitud de canje

Esta publicación se ha financiado mediante la transferencia de recursos del Gobierno Nacional a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

La Academia no es responsable de las opiniones aquí expresadas.

Reservados todos los derechos. El contenido de la presente publicación no puede ser reproducido, ni transmitido por ningún procedimiento electrónico, mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética, ni registrado por ningún sistema de recuperación de información, en ninguna forma, ni por ningún medio, sin la previa autorización por escrito del titular de los derechos de explotación de la misma.

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización previa de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.

Impreso en Colombia



Portada:

La especie *Mutisia clematis* fue dedicada por Linneo a José Celestino Mutis y luego una especie de este género, *Mutisia grandiflora* fue adoptada como símbolo en el escudo de la Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. En la parte superior: "clavellino". Nombre científico: *Mutisia clematis*, Familia: Asteraceae. A la izquierda, en posición vertical: *Cissampelos sp.* Familia: Menispermaceae.

Página web de la revista: www.raccefyn.co

Correo electrónico: revista@accefyn.org.co

Sede de la Academia: Cra. 28a No.39a - 63
Bogotá, Colombia

Teléfonos: (571) 244 3186 - 268 3290 -
268 2846



Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

ISSN 0370-3908

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

Vol. 38 · Número 148 · Págs. 233-342 · Julio - Septiembre de 2014 · Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Ciencias naturales	Optimización de la extracción de antioxidantes de <i>Salvia officinalis</i> L. con CO₂ supercrítico Optimization of the extraction of <i>Salvia officinalis</i> L. antioxidants with supercritical CO ₂ <i>Jairo René Martínez, Carlos Ruiz, Ginna Arias, Elena Stashenko</i> 237
	Dos décadas de estudio de la diversidad de hormigas en Colombia Two decades of study of the diversity of ants in Colombia <i>Patricia Chacón de Ulloa, Juan Carlos Abadía</i> 250
	Sinopsis de la familia Myrtaceae y clave para la identificación de los géneros nativos e introducidos en Colombia Synopsis of the plant family Myrtaceae and key for the identification of the native and introduced genera in Colombia <i>Carlos Parra-O.</i> 261
Ciencias físicas	Remoción de atenuación y dispersión en registros preapilados mediante filtro inverso con factor de calidad estimado en espectro instantáneo Removal of attenuation and dispersion in pre-stack gathers using inverse filter with quality factor estimated on instantaneous spectrum <i>Álvaro Corrales, Ovidio Almanza, Luis Montes-Vides</i> 278
Química	Mineralization and sorption of ¹⁴C-glyphosate in samples from three soil types collected in El Espinal, Colombia Mineralización y adsorción del ¹⁴ C-glifosato en muestras de tres tipos de suelo provenientes de El Espinal, Colombia <i>Jairo Leonardo Cuervo, Cilia Leonor Fuentes</i> 287

Matemáticas

Characteristics of two Competing Risks Models with Weibull Distributed Risks

Características de dos modelos con riesgos en competencia y riesgos Weibull

Sergio Yáñez, Luis A. Escobar, Nelfi González 298

**Ciencias
de la tierra**

Metagabros de la isla Gran Roque (Venezuela). Geoquímica y petrografía

Metagabbros of Gran Roque Island (Venezuela). Geochemistry and petrography

Luz Mary Toro-Toro, Mario Moreno-Sánchez, Arley de Jesús Gómez-Cruz,

Juliana Giraldo-García 312

Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia

State of the art of the early warning system in Colombia

Efraín Domínguez-Calle, Sergio Lozano-Báez 321

Enfoque y alcance

Focus and Scope 333

Optimización de la extracción de antioxidantes de *Salvia officinalis* L. con CO₂ supercrítico

Jairo René Martínez^{1,*}, Carlos Ruiz, Ginna Arias, Elena Stashenko

¹Centro de Investigación en Biomoléculas, CENIVAM, Bucaramanga, Colombia

Resumen

Se aplicó un diseño factorial fraccionado 2⁷⁻² para seleccionar las variables con mayor efecto sobre la capacidad antioxidante, el contenido de fenoles y el rendimiento de la extracción utilizando CO₂ supercrítico como solvente sobre hojas y tallos de *Salvia officinalis* L. El tiempo de extracción, el flujo de CO₂, la presión de la cámara de extracción y la temperatura de separación se modificaron según el procedimiento simplex para hallar empíricamente las condiciones que produjeran extractos de salvia con el valor más alto de la combinación lineal de rendimiento de extracción, capacidad antioxidante y contenido total de fenoles.

Palabras clave: *Salvia officinalis*, supercrítico, optimización simplex, ácido carnósico.

Optimization of the extraction of *Salvia officinalis* L. antioxidants with supercritical CO₂

Abstract

A 2⁷⁻² fractional factorial design was used to select the variables with the greatest effect on the antioxidant capacity, the total phenolic content and the extraction yield using supercritical carbon dioxide as a solvent on *Salvia officinalis* L. leaves and stems. The extraction time, the CO₂ flow, the extraction chamber pressure and the collector temperature were modified according to the simplex method in order to empirically find the conditions resulting in salvia extracts with the highest value of the linear combination of extraction yield, antioxidant capacity and total phenolic content.

Key words: *Salvia officinalis*, supercritical, simplex optimization, carnosic acid.

Introducción

La capacidad antioxidante es una propiedad biológica de gran interés para las diversas aplicaciones de las plantas aromáticas. En la salvia (*Salvia officinalis*) se ha reconocido desde hace mucho tiempo esta propiedad que, junto a su poder microbicida, ha permitido usarla con éxito como preservante de cárnicos y otros alimentos (Meyer, *et al.*, 2002). De la salvia y de otras muchas plantas aromáticas y medicinales se utilizan sus aceites esenciales, sus extractos o sus partes (hojas, flores, raíces) como ingredientes de diversas preparaciones y productos comerciales para el consumo humano. En la búsqueda de una explicación molecular de la actividad biológica de la salvia se ha demostrado que en sus metabolitos secundarios se encuentran varias sustancias que poseen alta capacidad antioxidante, tales como los ácidos fenólicos rosmarínico, salvianólico y ursólico, los flavonoides luteolina y salvicoumarina y los diterpenos fenólicos ácido carnósico, carnosol y rosmanol (Wang, *et al.*, 1998; Lu, *et al.*, 1999a; Lu, *et al.*, 1999b; Lu, *et al.*, 2000; Lu, *et al.*, 2001). Entre estos, los ácidos rosmarínico y carnósico presentan la mayor capacidad antioxidante,

superior a la del 2,6-di-*terc*-butil-*p*-cresol (BHT) y la del *terc*-butil-4-metoxifenol (BHA), antioxidantes de amplio uso en la industria (Sebranek, *et al.*, 2005).

En la elaboración de productos farmacéuticos y alimenticios, o en otras aplicaciones para consumo humano, es importante la eliminación de los residuos de solventes orgánicos utilizados en el proceso de extracción de antioxidantes a partir de material vegetal. Esta es una etapa que agrega costos al proceso productivo y puede causar alguna modificación de los componentes bioactivos debido al tratamiento térmico involucrado. En este contexto, a partir de la década de 1970 se ha venido utilizando cada vez más el CO₂ en estado supercrítico como agente extractivo, ya que su temperatura y su presión críticas (304,25 K, 7,39 MPa) son relativamente bajas, se mantiene como gas en condiciones estándar de temperatura y presión, no es inflamable y no está clasificado como tóxico (Rizvi, 1994).

*Correspondencia:

Jairo René Martínez, rene@tucan.uis.edu.co

Recibido: 6 de mayo de 2014

Aceptado: 19 de junio de 2014

Varios investigadores han estudiado la extracción de hojas de salvia con CO₂ supercrítico como técnica alternativa para la obtención del aceite esencial; en este sentido, la atención se ha centrado en el rendimiento de la extracción, la composición del extracto y su bioactividad. Reverchon, Taddeo y Della Porta examinaron los efectos del tiempo de extracción y la densidad del CO₂ sobre la composición del extracto. Los compuestos livianos y poco polares predominaron al inicio de la extracción y su cantidad relativa se redujo progresivamente a medida que aumentaron las sustancias de mayor masa molecular y polaridad. A 9 MPa y 50 °C se obtuvo el extracto de hojas de salvia con el mayor contenido de monoterpenos oxigenados (Reverchon, *et al.*, 1995). Aleksovski y Sovová encontraron el mayor rendimiento de extracción a 12,5 MPa y 50 °C. El extracto tuvo una composición similar a la del aceite esencial de salvia, pero con un contenido mayor de diterpenos oxigenados (manol, esclareol) (Aleksovski y Sovová, 2007). Glisic y colaboradores variaron las condiciones de extracción de salvia para buscar la selectividad hacia los diterpenos. La mayor selectividad se encontró a 10 MPa, pero el mayor rendimiento de extracción se observó a 30 MPa, 323 K y 37 kg de CO₂ por kg de material vegetal (Glisic, *et al.*, 2010). En los trabajos sobre extracción de salvia publicados por Ivanović y colaboradores (Ivanović, *et al.*, 2007) y Babovic y colaboradores (Babovic, *et al.*, 2010), se incluyó la medición de la capacidad antioxidante del extracto, pero el énfasis se mantuvo en estudiar el rendimiento de la extracción. Se ha estudiado la optimización del proceso de extracción con CO₂ en función de la presión, la temperatura, el tiempo de extracción, el tamaño de las partículas y el flujo o consumo de CO₂. Para aumentar la extracción a escala de manera apropiada y estudiar diferentes condiciones de operación, se recurre a un modelo matemático que explique la relación experimental entre rendimiento y tiempo de extracción. Reverchon encontró que la etapa determinante del proceso de extracción era la transferencia interna de masa (Reverchon, 1996). Además, logró mejores resultados al representar la forma de las partículas de material vegetal como losas en lugar de esferas. Aleksovski y Sovová utilizaron un modelo exponencial sencillo para representar los dos períodos que observaron durante el avance de la extracción, caracterizados por un aumento inicial rápido del rendimiento, que pasó luego a un régimen lento de extracción simultánea de terpenoides, cera cuticular y agua (Aleksovski y Sovová, 2007).

La búsqueda de condiciones para un rendimiento superior de la extracción cuando se trata material vegetal de plantas aromáticas con CO₂ en estado supercrítico, se ha hecho utilizando el método de la superficie de respuesta. Ejemplos representativos de estos procedimientos los constituyen los trabajos publicados sobre *Vetiveria zizanioides* (Danh,

et al., 2009), *Myrtus communis* (Pereira, *et al.*, 2013; Ghasemi, *et al.*, 2011), *Satureja hortensis* (Khajeh, 2011), *Pimpinella affinis* (Dashtianeh, 2013), y *Piper nigrum* (Bagheri, *et al.*, 2014). Debido al gran número de variables a explorar, se requiere una primera etapa de tamizaje para seleccionar un conjunto reducido de factores que optimicen el dato observable de interés, que, usualmente, se trata del rendimiento (Sharif, *et al.*, 2014).

En este trabajo se buscaron las condiciones de extracción de hojas y tallos de *Salvia officinalis* con CO₂ supercrítico que permitieran maximizar un dato observable combinando el rendimiento de la extracción, el contenido de polifenoles (según el método de Folin-Ciocalteu) y la capacidad antioxidante del extracto (según el método ORAC, *oxygen radical absorbance capacity*). Se efectuó una primera etapa de tamizaje basada en un diseño factorial fraccionado 2⁷⁻², seguida de la optimización empírica por el método simplex (Nelder y Mead, 1965) de cuatro factores. Esto permitió obtener un resultado que no depende de un modelo matemático específico para describir la relación entre el rendimiento, la capacidad antioxidante, el contenido de fenoles y las condiciones de extracción. La composición de los extractos se determinó por cromatografía líquida con detector de arreglo de diodos y cromatografía de gases con detector selectivo de masas.

Materiales y métodos

Materiales

El material vegetal de la especie bajo estudio se cosechó en el municipio de Sucre, Santander, Colombia. La identificación taxonómica de las especies estudiadas se llevó a cabo en el Herbario Nacional Colombiano (COL, Bogotá) y estuvo a cargo del doctor J. L. Fernández-Alonso. La muestra permanente se registró con el N° 555848.

Se utilizó CO₂ de 99,9 % de pureza (Linde de Colombia, Bogotá, Colombia). El metanol y el etanol empleados como solventes fueron de grado analítico (Mallinckrodt Baker Inc., J.T. Baker, Phillipsburg, EE.UU.), al igual que el reactivo de Folin-Ciocalteu (2 N) y KH₂PO₄ (99 %). Se utilizó agua tipo I obtenida en un equipo Millipore (Millipore S.A., Molsheim, Francia). Además, se usaron los siguientes reactivos y patrones (Sigma-Aldrich®, St. Louis, EE.UU.): Trolox® (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico; 97 %), a-tocoferol (97 %), butilhidroxianisol (BHA, 99 %), butilhidroxitolueno (BHT, 99 %), ácido gálico (99 %), ácido carnósico (98 %), 1,8-cineol (99 %), *cis*-tujona (97 %), a-humuleno (98,0 %), fluoresceína (FL) y AAPH (2,2'-azobis(2-amidinopropano)hidrocloruro). El cloruro de potasio (99 %), el persulfato de potasio (PDS, 97 %), el hidróxido de sodio (NaOH) y el sulfato de sodio (Na₂SO₄) se adquirieron de Merck (Darmstadt, Alemania).

Pretratamiento de la muestra

Las hojas, tallos y flores procedentes de parcelas experimentales ubicadas en el municipio de Sucre, Santander, se secaron bajo condiciones de temperatura y humedad ambientales y protegidos de la luz solar y del agua. Luego se picó el material vegetal manualmente y se pasó por un molino de cuchillas (Wiley Mill, Standard Model N° 3, Pittsburgh, PA, EE.UU.), hasta alcanzar un tamaño promedio de 1 mm. La caracterización por tamaño del material vegetal se llevó a cabo en un tamiz Tyler Portable Sieve Shaker Model RX-24, (Columbus, MI, EE.UU.), equipado con mallas Sargent-Welch Scientific Company, (Buffalo, NY, EE.UU.). El material molido se sometió a un proceso de secado controlado en un horno eléctrico Indumegas (Bucaramanga, Colombia) hasta alcanzar valores de humedad menores de 10 % (base húmeda). De cada tamaño de partícula y temperatura de secado se realizaron extracciones por duplicado para determinar el rendimiento de extracción y así escoger los parámetros adecuados para los experimentos de análisis de variables y de optimización.

Extracción con dióxido de carbono supercrítico

Las extracciones con fluido supercrítico se llevaron a cabo en un equipo Thar SFE-2000-2-FMC50 (Thar Instruments, Inc., Pittsburgh, PA, EE.UU.), equipado con una cámara de extracción con capacidad de $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, un sistema de separación y recolección de los extractos de tipo ciclón con capacidad de $5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, un regulador automático de presión, bomba de alta presión P-200A (Thar Instruments, Inc., Pittsburgh, PA, EE.UU.) para el CO_2 , y bomba P-50 (Thar Instruments, Inc., Pittsburgh, PA, EE.UU.) para el modificador, y un medidor de flujo Sitrans FC Massflo® de tipo MASS 6000 (Siemens AG, Berlín, Alemania). Se seleccionaron siete variables de proceso para estudiar su efecto sobre el rendimiento, la capacidad antioxidante y el contenido de fenoles del extracto obtenido: tiempo de flujo del CO_2 a través de la cámara de extracción (D), tiempo de residencia del CO_2 en la cámara de extracción cuando se suspendía su flujo (E), flujo de CO_2 (F), presión en el recipiente colector (G), temperatura del colector (H), presión en la cámara de extracción (P), y temperatura de la cámara de extracción (T). La densidad de empaquetamiento del material vegetal en la cámara de extracción se mantuvo relativamente constante ($280 \pm 32 \text{ kg/m}^3$).

Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante se determinó en un lector de microplacas Turner Biosystems Inc., Modulus™ II Microplate Multimode Reader con microplacas de poliestireno de 96 pozos, equipado con un módulo de fluorescencia con filtros para longitudes de onda de 490 nm (excitación) y 510-570 nm (emisión) (Sunnyvale, CA, EE.UU.). La capacidad

antioxidante de las muestras se midió por la inhibición de la disminución de la fluorescencia. Para este propósito, se usó fluoresceína (FL) como indicador molecular y blanco de ataque de los radicales peroxilo generados por AAPH. Las muestras o el Trolox® se disolvieron en una mezcla de metanol y agua (50:50 v/v). Se agregaron tampón fosfato, FL y las soluciones de las muestras en la microplaca, y se agitó e incubó a 310 K. Cuando se alcanzó la temperatura estable, se añadió el AAPH y se inició la medición de la fluorescencia en función del tiempo. Como estándar de control en las mediciones se usó Trolox®, cuantificado mediante la curva de calibración.

Determinación del contenido de fenoles

Los fenoles totales se estimaron como equivalentes del ácido gálico y se expresaron como concentración equivalente (g/l) de ácido gálico. El volumen total de reacción fue de 200 ml. Se mezclaron 50 ml de solución de la muestra con 50 ml del reactivo de Folin-Ciocalteu y luego de 1 minuto, se adicionaron 100 ml de NaOH (0,175 M) y se prosiguió a medir la absorbancia de la mezcla a 750 nm, comparándola con la curva de calibración del ácido gálico elaborada con mediciones realizadas de la misma manera que las de las muestras de los extractos.

Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas

La separación e identificación de los metabolitos secundarios presentes en los extractos obtenidos con CO_2 supercrítico se hizo en un equipo GC Agilent Technologies 6890 Plus (Palo Alto, California, EE.UU.), acoplado a un detector selectivo de masas Agilent Technologies MSD 5975 Network, en una columna capilar con la fase estacionaria (f.e.) apolar de 5%-fenil-poli(metilsiloxano) (DB-5MS, J & W Scientific, Folsom, CA, EE.UU.) de 60 m x 0,25 mm, D.I. x 0,25 μm , d_p . Se empleó helio (99,995 %, gas AP, Linde Colombia, Bucaramanga, Colombia) como gas de arrastre, con una presión de entrada en la cabeza de la columna de 16,47 psi y una velocidad volumétrica de flujo de 1 ml/min. La temperatura del inyector fue de 250 °C, con modo de inyección *split* y un volumen de inyección de 2 μl . En el horno del cromatógrafo, la temperatura inicial fue de 45 °C (5 min), la cual se aumentó luego hasta 150 °C durante 2 minutos (a razón de 4 °C/min), después hasta 250 °C (a razón de 5 °C/min) y, finalmente, hasta 275 °C durante 15 minutos (a razón de 10 °C/min), con una velocidad de flujo de 26 cm/s. La cámara de ionización se mantuvo a 230 °C y el cuadrupolo, a 150 °C. Los iones fragmentados en los espectros de masas se obtuvieron por impacto con electrones de energía de 70 eV y se registraron en un rango de masas (m/z) de entre 45 y 450.

El muestreo de los compuestos volátiles en los extractos se realizó por microextracción en fase sólida, con una fibra de polidimetilsiloxano / divinilbenceno (PDMS/ DVB)

(Supelco, Bellefonte, PA, EE.UU.), la cual se sometió a desorción en el puerto de inyección de un cromatógrafo Agilent Technologies 6890N Network Series GC (Agilent Technologies, Palo Alto, California, EE.UU.), acoplado a un detector selectivo de masas Agilent Technologies 5975 Inert XL. La separación se llevó a cabo en una columna de sílice fundida DB-WAX (J & W Scientific, Folsom, CA, EE.UU.), con fase estacionaria entrecruzada e inmovilizada de polietilenglicol de 60 m x 0,25 mm, D.I. x 0,25 μm , d_p , con una presión de entrada de la columna de 20,75 psi. La temperatura del horno se programó en 45 °C durante los 5 minutos iniciales, se aumentó a 150 °C durante 3 minutos (a razón de 3 °C/min), y finalmente se llevó hasta 220 °C durante 5 minutos (a razón de 4 °C/min). Las demás condiciones operativas se mantuvieron iguales a las mencionadas anteriormente.

Cromatografía líquida

El análisis se realizó en un cromatógrafo Agilent Technologies 1200 (Miami, FL, EE.UU.), el cual consta de una bomba cuaternaria Agilent Technologies G1354A, un inyector manual Agilent Technologies Series 1200 G1328B y un detector UV-Vis de arreglo de diodos G1315B. Se empleó una columna Zorbax-Eclipse C_{18} 150x4,6 mm, tamaño de partícula 3,5 mm; los analitos se eluyeron con una fase móvil conformada por metanol y agua (ácido ortofosfórico al 0,1 %). El procesamiento de los datos se realizó con la aplicación Agilent ChemStation LC.

Resultados y discusión

El procedimiento utilizado para encontrar las condiciones de extracción óptimas constó de una primera etapa de tamizaje de variables, seguida por la búsqueda empírica (método simplex) del punto óptimo dentro del subespacio formado por los factores de mayor efecto significativo. Los experimentos preliminares permitieron seleccionar la temperatura y el tiempo de secado requeridos para reducir la humedad del material vegetal a un valor menor de 10 % (40 °C, 8 h o 50 °C, 7 h). Este contenido bajo de agua se requiere para reducir la competencia entre la fase acuosa y el CO_2 durante el proceso de extracción (Pereira y Meireles, 2010).

Análisis de las variables del proceso de extracción

El tiempo dinámico (D) en cada extracción correspondió al intervalo entre el logro de las condiciones de temperatura en la cámara de extracción y el momento en que se suspendió la operación de la bomba. Se realizaron experimentos preliminares para establecer los niveles inferior y superior de las siete variables de proceso bajo estudio (Tabla 1). Para la etapa de tamizaje de las variables, se empleó un diseño factorial fraccionado 2^{7-2} . La Tabla 2 contiene los resultados de rendimiento (% p/p), de capacidad antioxidante ORAC ($\mu\text{mol Trolox/mg}$ de extracto) y de contenido de fenoles

Tabla 1. Dominio experimental en la optimización de la extracción de antioxidantes a partir de salvia

N°	Símbolo	Variables	Dominio	
			-1	+1
1	P	Presión, MPa	30	50
2	T	Temperatura, K	313	353
3	F	Flujo, kg/h	1,2	3,6
4	D	Tiempo dinámico, min	30	120
5	E	Tiempo estático, min	0	30
6	G	Presión de separación, MPa	0,1	1
7	H	Temperatura de separación, K	301	331

(g/l de ácido gálico) determinados para los 32 extractos de *S. officinalis* obtenidos con este diseño experimental. El nombre de cada experimento se construyó por yuxtaposición de los nombres de las variables que presentaron niveles altos. Para estimar el efecto de cada variable se aplicó el método del producto vectorial punto entre las columnas de los niveles de las variables y las columnas de los resultados (Montgomery, 2008). Las figuras 1A a 1C contienen los gráficos de distribución normal para los efectos de primero, segundo, tercero y cuarto orden sobre los tres datos observables (rendimiento, capacidad antioxidante y contenido de fenoles). Los puntos alineados corresponden a efectos que por su tamaño no se distinguen del error experimental, mientras que los que se desvían son los efectos que pueden ser significativos. Se aprecia en las figuras 1A a 1C que el tiempo dinámico (D) y el flujo de CO_2 (F) tuvieron efecto sobre todos los datos observables, mientras que la temperatura (T) y la presión (P) de la cámara de extracción modificaron más el rendimiento. Con las variables que presentaron efecto se construyeron modelos polinómicos que se ajustaron por regresión lineal múltiple a los datos experimentales para cada uno de los tres datos observables. Se obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) de alrededor de 0,7, pero no se refinaron los modelos porque solamente se requerían para delimitar la región en donde se realizaría la búsqueda del máximo por el método simplex. Durante esta etapa de análisis de datos se examinaron los efectos significativos y el modelo matemático correspondiente para un dato observable Y, definido como la suma de los tres datos observables, con factores de peso 0,3, 0,4 y 0,3 para rendimiento, capacidad antioxidante y contenido de fenoles, respectivamente. La capacidad antioxidante y el contenido de polifenoles se trataron como variables independientes debido a su bajo coeficiente de correlación (ver discusión más adelante). Debido a sus escalas diferentes, los valores de estos tres datos observables se normalizaron (división por la resta de los valores máximo y mínimo) y su promedio se desplazó a cero (sustracción del promedio). La figura 1D muestra que las variables que pudieron tener efecto significativo sobre

Tabla 2. Resultados obtenidos a partir del diseño factorial fraccionado 2⁷⁻²

Número de experimento	Código*	Rendimiento, %	Capacidad antioxidante, $\mu\text{mol Trolox}^{\text{®}}/\text{mg}$ de extracto	Contenido total de fenoles equivalentes de ácido gálico, g/l
1	gh	0,7	0,93±0,04	372±4
2	p	0,7	0,92±0,03	456±3
3	t	1,0	0,79±0,01	495±9
4	ghpt	1,3	1,11±0,03	661±18
5	f	1,4	0,95±0,03	669±11
6	fg hp	0,6	1,05±0,01	640±10
7	fg ht	1,2	1,07±0,04	497±14
8	fp t	2,8	0,80±0,01	356±17
9	dh	1,2	0,89±0,03	434±7
10	dgp	1,9	0,89±0,05	461±8
11	dgt	1,5	1,20±0,02	560±10
12	dhpt	1,8	1,76±0,04	663±9
13	dfg	1,4	1,39±0,03	682±3
14	dfhp	2,0	1,66±0,04	668±10
15	dfht	2,2	1,59±0,01	747±8
16	dfgpt	3,3	1,41±0,02	733±4
17	eg	0,5	0,96±0,03	548±13
18	ehp	0,8	1,37±0,03	644±14
19	eht	0,7	0,91±0,02	348±12
20	egpt	1,2	1,09±0,02	463±15
21	efh	1,1	1,15±0,01	334±10
22	efhp	1,1	1,80±0,03	558±13
23	fgt	1,4	1,18±0,02	547±6
24	efhpt	2,4	0,86±0,02	598±7
25	de	1,0	1,57±0,04	587±3
26	deg hp	1,8	1,32±0,03	629±9
27	deg ht	2,5	0,83±0,03	434±8
28	dept	2,2	1,00±0,03	534±6
29	defgh	1,3	1,61±0,02	780±9
30	defp	1,9	1,12±0,02	626±8
31	deft	2,7	1,035±0,005	674±9
32	defghpt	3,8	1,70±0,05	620±9

* p: presión de extracción; t: temperatura de extracción; f: flujo del fluido; d: tiempo dinámico; e: tiempo estático; g: presión de separación; h: temperatura de separación

este dato observable Y fueron el tiempo dinámico (D), el flujo de CO₂ (F), la presión (P) y el producto de la presión y la temperatura del colector (H).

Una inspección de los resultados de la Tabla 2 muestra que en aquellos experimentos con nombre corto (pocas variables en nivel alto), los datos observables tuvieron valores bajos; por ejemplo, los experimentos gh, p, t, f, dh y eg tuvieron respuestas menores que las de los experimentos codificados como dfgpt, deg hp, defgh y defghpt. Esto sugiere que la búsqueda de las condiciones óptimas debe realizarse en la región de niveles altos de los factores.

La evaluación de la correlación lineal entre los tres datos observables produjo valores de $r = 0,372$ para la capacidad antioxidante y el contenido total de fenoles; de $r = 0,04$ para la capacidad antioxidante y el rendimiento, y de $r = 0,07$ para el contenido total de fenoles y el rendimiento. Esto muestra una correlación muy baja entre los tres aspectos determinados en cada experimento.

Puesto que los fenoles son los principales responsables de la capacidad antioxidante de la salvia (**Wang, et al., 1998; Djamarti, et al., 1991**), se esperaba un mayor coeficiente de correlación entre la capacidad antioxidante y el contenido

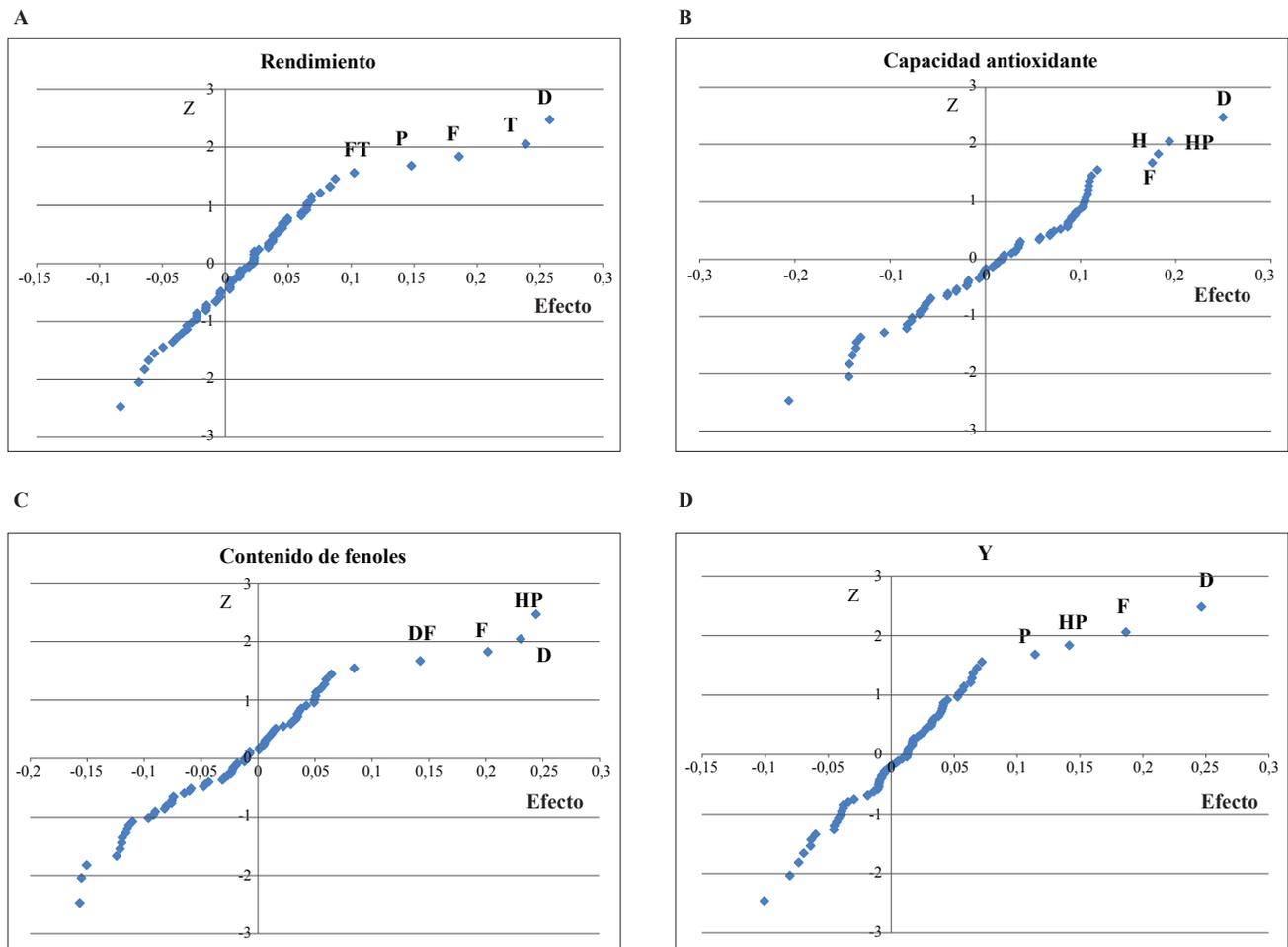


Figura 1. Gráfica de distribución normal para los efectos de primer a cuarto orden calculados con los resultados del diseño factorial fraccionado 2^{7-2} . A. Rendimiento de la extracción. B. Capacidad antioxidante del extracto según determinación ORAC. C. Contenido total de fenoles según el método Folin-Ciocalteu. D. Dato observable Y, combinación lineal de las respuestas de rendimiento (30 %), capacidad antioxidante (40 %) y contenido total de fenoles (30 %).

total de fenoles. Efectivamente, en un estudio de extractos acuosos de plantas medicinales y especias se encontró tal relación lineal ($r = 0,92$) entre la capacidad antioxidante ORAC y el contenido total de fenoles (Zheng y Wang, 2001). De forma similar, el contenido total de fenoles de los extractos en metanol, acetato de etilo o acetona de 12 plantas aromáticas tuvo un coeficiente de correlación de 0,84 con los resultados de la capacidad antioxidante obtenidos mediante el método ABTS (Miliauskas, et al., 2004). Sin embargo, en extractos de romero obtenidos con CO_2 se obtuvo una correlación baja ($r = -0,17$) entre el contenido total de fenoles y la capacidad antioxidante medida por el método de ABTS (TEAC, Trolox equivalent antioxidant capacity) (Celiktas, et al., 2007). La concentración del ácido carnósico, uno de los principales componentes antioxidantes del extracto de salvia, muestra

una correlación no muy alta con métodos como el DPPH ($r = 0,77$) y el del ácido β -linoleico ($r = 0,44$) (Wellwood y Cole, 2004).

Los rendimientos obtenidos fueron similares a los citados en la literatura científica para las extracciones con CO_2 supercrítico de la especie *S. officinalis*. Las extracciones a baja presión, 9-12,8 MPa, con temperaturas entre 298 y 323 K, flujos de 0,021 a 0,95 kg/h y tiempos dinámicos de 3 h, muestran rendimientos de 1,3 a 4,8 %; estos extractos estaban compuestos por terpenos volátiles (Aleksovski y Sovová, 2007; Reverchon, et al., 1995). Las extracciones a presiones más altas, entre 30 y 35 MPa, con temperaturas entre 313 y 373 K, flujos de 0,3 a 0,4 kg/h y tiempos dinámicos de 2,7 a 4,7 h han mostrado rendimientos de 1,3 a 4,6 % (Glisic, et al., 2010; Ivanović, et al., 2009; Babovic, et al., 2010). Las condiciones de extracción empleadas en

el experimento “dh” del presente trabajo fueron similares a las usadas en el trabajo de Ivanović y colaboradores. La presión y la temperatura fueron las mismas (30 MPa y 313 K), el flujo fue cuatro veces mayor (1,2 contra 0,3 kg/h), y el tiempo de extracción en el experimento citado fue menor (2 Vs. 3,7 h). Los rendimientos de extracción no difirieron en más del 10 % (1,2 % en este trabajo y 1,3 % en el de Ivanović, *et al.*, 2009). En el trabajo de Fornari y colaboradores se utilizó un equipo Thar-SF2000, similar al usado en la presente investigación, con presión y temperatura de extracción de 30 MPa y 313 K, tal como en el experimento dh (Fornari, *et al.*, 2012). El rendimiento de extracción global (suma de dos fracciones obtenidas) fue de 3,79 % y de 4,62 % después de 1,5 y 4,5 h de extracción. Este rendimiento mayor puede atribuirse al flujo de 2,4 kg/h, el doble del usado en el experimento dh. De igual manera, el experimento tdg se puede comparar con el trabajo de Babovic y colaboradores (Babovic, *et al.*, 2010), en el que bajo condiciones de 30 MPa, 373 K, 0,3 kg/h y 4,7 h, se obtuvo un rendimiento del 1,5 %, igual al obtenido en el presente trabajo. Babovic y colaboradores emplearon 1,4 kg de CO₂, lo cual representa la cuarta parte del usado en el experimento tdg. Además de las diferencias en las condiciones de extracción, entre los casos discutidos anteriormente las hay también en los tratamientos posteriores a la cosecha, en las condiciones de separación del extracto, en las variables agroclimáticas de cultivo y, parcialmente, en la planta utilizada en la extracción; este último factor es importante, pues los autores referenciados emplearon solo hojas y en el presente trabajo se hizo la extracción en hojas, tallos y flores.

Entre la amplia variedad de ensayos existentes para la evaluación de la capacidad antioxidante, el método ORAC se destaca por su reproducibilidad (Prior, *et al.*, 2005). Aunque se encuentran varios resultados de evaluaciones de la actividad antioxidante de extractos acuosos o hidroalcohólicos de *S. officinalis* con el método ORAC (Zheng y Wang, 2001), actualmente solo hay una publicación que presente esta medición para extractos con CO₂ supercrítico (Ramírez, *et al.*, 2012). El valor ORAC que aparece en este último trabajo (1,90 µmol Trolox/mg de extracto) es cerca de 10 % superior al valor más alto determinado en este trabajo para los extractos obtenidos con el diseño factorial fraccionado. Los valores ORAC que aparecen en la Tabla 2 están expresados por mg de extracto, pero es más común que se refieran a gramo de material vegetal. Al convertirlos a estas unidades, se encontró que los valores medidos para los 32 experimentos ocuparon el intervalo entre 13,4 y 30,6 µmol Trolox/g de material vegetal seco o, lo que es equivalente, 3,73 a 8,50 µmol Trolox/g de material vegetal fresco (con base en una humedad de 75 % medida en el material cosechado). Estos valores son menores que el medido para el extracto acuoso (pH 7) de *S. officinalis*, correspondiente a 13,28 µmol Trolox/g de material vegetal fresco (Zheng y Wang, 2001).

Caracterización cromatográfica

La Figura 2 muestra un perfil cromatográfico representativo de los componentes volátiles y semivolátiles de la fracción soluble en metanol de los extractos obtenidos de *S. officinalis* con CO₂ supercrítico. El sesquiterpeno oxigenado viridiflorol y el diterpeno manol fueron los componentes más abundantes

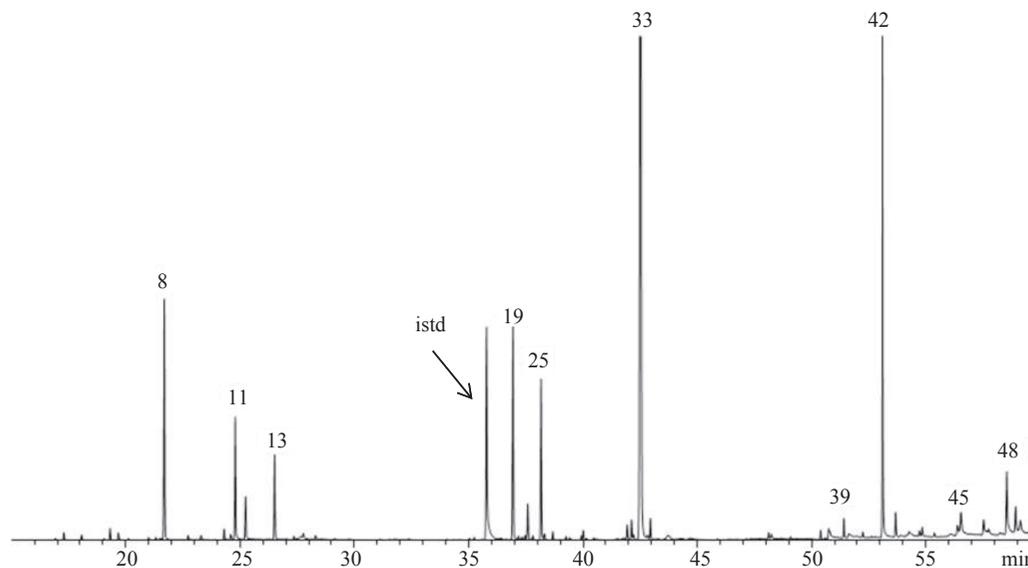


Figura 2. Perfil obtenido por cromatografía de gases y espectrometría de masas de los componentes volátiles y semivolátiles del extracto de *Salvia officinalis* obtenido con CO₂ supercrítico. Columna DB-5MS (60 m), Split 1:30. MSD (EI, 70 eV).

en esta fracción. Las cantidades relativas y la identificación tentativa (basada en la comparación de los índices de retención y los espectros de masas con datos publicados y registrados en bases de datos) de los componentes con abundancia > 0,1 % aparecen en la Tabla 3. Los perfiles de composición de los experimentos en los que las variables estuvieron principalmente en nivel bajo presentaron más abundancia de los compuestos de mayor masa molecular. Por ejemplo, las cantidades relativas de manol y viridiflorol se duplicaron al pasar del experimento defgph al experimento eht. Los intervalos de cantidades relativas y los compuestos identificados para las fracciones volátiles mostrados en la Tabla 3 no difirieron mucho de los valores reportados en otras investigaciones sobre extracción de *S. officinalis* con CO₂ supercrítico (Reverchon, et al., 1995; Aleksovski y Sovová, 2007; Ivanović, et al., 2009; Glisic, et al., 2010; Babovic, et al., 2010). La fracción no volátil de los extractos se sometió a un análisis por cromatografía líquida de alta eficiencia desarrollado para 11 compuestos fenólicos (ácidos caféico, *p*-cumárico, rosmarínico, carnósico y ursólico; apigenina, luteolina, quercetina, kaempferol, naringenina y pinocembrina), los cuales se han reportado como constituyentes del extracto de salvia o de tomillo (Areias, et al., 2000; Lu y Foo, 2001). Solo se detectaron los ácidos carnósico (ACA) y ursólico (AUR), probablemente porque estos terpenos no muy polares poseen mayor solubilidad en CO₂ supercrítico que en agua (Herrero, et al., 2010). En la Figura 3 se muestra el perfil cromatográfico obtenido a partir del extracto con mayor concentración de ácido carnósico y ursólico. Para confirmar la presencia de dichos compuestos se compararon sus tiempos de retención y espectros UV con los de los patrones de referencia certificados. Además, las muestras de los extractos se enriquecieron con los compuestos de interés y se corroboró el aumento en las áreas cromatográficas en cuestión. Con la longitud de onda seleccionada (333 nm), la respuesta del detector fue mayor para el ácido carnósico. Al comparar con otros perfiles cromatográficos de salvia y romero obtenidos en el mismo detector con fases estacionaria y móvil similares a las empleadas en el presente trabajo, se identificó tentativamente como carnosato de metilo el compuesto que eluye inmediatamente después del ácido carnósico. Este se cuantificó utilizando la curva de calibración del ACA. La Tabla 4 presenta la cuantificación de los ácidos carnósico y ursólico y del carnosato de metilo en 12 extractos de *S. officinalis* obtenidos según el diseño factorial 2⁷⁻². Con el fin de aclarar la incongruencia aparente en la correlación entre contenido de fenoles y capacidad antioxidante de los extractos, se calcularon los coeficientes de correlación entre las concentraciones de la Tabla 4 y los valores ORAC de estos extractos. Los resultados (Tabla 5) mostraron que, efectivamente, hubo una marcada correlación entre el contenido de ácido carnósico y la

capacidad antioxidante del extracto. El ACA es considerado el diterpeno con mayor actividad antioxidante entre los detectados en los extractos de salvia; además, la actividad antiinflamatoria de los extractos de salvia y romero se relaciona con el alto contenido de este componente (Peter, 2000); por esta razón, el ACA se considera el componente que le proporciona calidad a los extractos de romero y salvia y que, además, determina su precio. Glisic y colaboradores obtuvieron extractos con una alta proporción de diterpenos y sustancias semivolátiles (~40 % en peso) cuando sometieron el residuo de la extracción con agua asistida por ultrasonidos a extracción con CO₂ supercrítico (Glisic, et al., 2011). Aunque en ese trabajo no se realizó la evaluación de estos extractos, su composición hace esperar que estas fracciones poseen alta capacidad antioxidante.

Búsqueda empírica de las condiciones de extracción óptimas

Con base en el análisis de la varianza de los datos de la Tabla 2 y de las tendencias mostradas en las Figuras 1A – 1D, se seleccionó el espacio formado por las variables D, F, P y H para buscar las condiciones óptimas por medio del método simplex (Nelder y Mead, 1965). Se tomó como vértice inicial el nivel cero de estas cuatro variables. Los siguientes cuatro vértices del simplex de partida se calcularon según la ecuación 1, en la cual V_i es el vértice inicial, κ es una constante y Δ es el tamaño del paso.

$$V_{i+n} = V_i + (\kappa * \Delta) \quad (1)$$

Los valores de Δ empleados fueron de 15 minutos para el tiempo dinámico, 0,48 kg/h para el flujo, 4 Mpa para la presión de extracción y 6 K para la temperatura de separación. Una vez realizados los primeros cinco experimentos, se descartó aquel con el dato observable combinado Y más bajo y se calcularon las coordenadas del vértice nuevo según la ecuación 2 donde V_c es el centroide, el cual corresponde al promedio de las respuestas de los vértices no rechazados, y b es un factor que determina si el siguiente vértice corresponde a una reflexión ($b = 1$), una expansión ($b > 1$), una contracción ($b = 0,5$) o una contracción con cambio de sentido ($b = -0,5$).

$$V_{i+n+j} = V_c + b (V_c - V_p) \quad (2)$$

El vértice 6 se obtuvo por reflexión. Dado que la respuesta (Y) fue inferior a las de los demás vértices, se aplicó una expansión ($b = 2$). Los vértices 8 a 10 se obtuvieron por reflexión. Debido a que las respuestas de los vértices 8, 9 y 10 fueron las más altas obtenidas, se decidió hacer una contracción ($b = 0,5$) para hallar el vértice 11, cuya respuesta nuevamente fue superior. A continuación, se aplicaron reflexiones para obtener los siguientes dos vértices. La respuesta del vértice 12 fue considerablemente más alta que la del 11, y la del vértice 13 fue más baja. Por último, se realizó una expansión ($b = 4$) para obtener de nuevo una

Tabla 3. Reconocimiento, identificación y cantidades relativas (%) de los principales componentes volátiles y semivolátiles solubles en metanol encontrados en los extractos de *Salvia officinalis* obtenidos según el diseño 2⁷⁻²

Número de pico ^a	Compuesto	I _R ^b	Cantidad relativa, %±σ (n=3)						
			Experimento gh	Experimento eht	Experimento egpt	Experimento fgt	Experimento deght	Experimento deft	Experimento defghpt
1	α-Tujeno	933	0,161±0,002	0,205±0,004	0,22±0,01	0,24±0,01	0,25±0,02	0,266±0,005	0,200±0,002
2	α-Pineno	942	0,302±0,005	0,338±0,006	0,189±0,003	0,42±0,02	0,34±0,02	0,427±0,003	0,35±0,01
3	Canfeno	958	0,195±0,001	0,257±0,002	0,145±0,008	0,29±0,02	0,228±0,009	0,279±0,007	0,225±0,005
4	Sabineno	980	0,178±0,004	0,199±0,005	0,227±0,006	0,23±0,02	0,24±0,01	0,251±0,007	0,186±0,008
5	β-Pineno	984	0,455±0,001	0,418±0,005	0,29±0,01	0,50±0,03	0,44±0,01	0,512±0,008	0,421±0,005
7	α-Terpineno	1023	0,175±0,005	0,187±0,008	tr	0,21±0,02	tr	tr	tr
8	1,8-Cineol*	1039	6,74±0,04	6,69±0,03	4,92±0,05	6,41±0,07	5,96±0,07	6,58±0,08	5,0±0,1
11	cis-tujona*	1113	4,37±0,02	4,04±0,05	3,10±0,06	3,39±0,09	2,83±0,06	3,32±0,07	2,26±0,06
12	trans-tujona	1125	1,36±0,06	1,51±0,02	0,94±0,08	1,14±0,03	0,85±0,07	1,06±0,03	0,67±0,04
13	Alcanfor	1157	2,55±0,08	3,06±0,03	2,31±0,03	2,44±0,09	2,05±0,03	2,16±0,01	1,46±0,02
14	δ-Terpeneol	1178	0,483±0,003	0,37±0,02	tr	tr	tr	tr	tr
16	cis-cariofileno	1427	0,18±0,01	0,27±0,02	0,19±0,02	tr	tr	tr	tr
17	α-Gurjuneno	1431	0,127±0,008	0,217±0,009	tr	tr	tr	tr	tr
19	trans-β-Cariofileno	1442	6,11±0,03	6,62±0,02	6,11±0,02	5,41±0,09	5,02±0,07	5,48±0,03	3,56±0,05
22	β-Gurjuneno	1459	0,10±0,01	0,125±0,005	tr	tr	tr	tr	tr
23	Aromadendreno	1462	0,71±0,01	0,873±0,008	0,83±0,02	0,75±0,01	0,73±0,03	0,87±0,04	0,58±0,06
24	α-Guaieno	1465	0,16±0,02	0,203±0,007	0,17±0,01	0,17±0,03	0,21±0,02	0,29±0,06	tr
25	α-Humuleno*	1476	4,10±0,02	4,61±0,06	4,38±0,05	3,82±0,08	3,36±0,09	3,84±0,07	2,52±0,04
26	allo-Aromadendreno	1484	0,29±0,03	0,32±0,01	0,28±0,05	0,26±0,04	0,30±0,04	0,36±0,04	0,186±0,003
27	γ-Muuroleno	1494	0,27±0,03	0,226±0,006	0,26±0,05	0,20±0,02	0,24±0,03	tr	tr
28	Valenceno	1517	0,637±0,004	0,85±0,02	0,82±0,03	0,74±0,03	0,82±0,03	0,86±0,08	0,59±0,04
30	δ-Cadineno	1541	0,35±0,02	0,290±0,02	0,292±0,005	0,24±0,02	0,24±0,02	tr	tr
31	Espatuleno	1602	0,324±0,009	0,34±0,01	0,37±0,02	0,301±0,008	0,31±0,01		
32	Óxido de cariofileno	1610	0,49±0,02	0,51±0,02	0,50±0,02	0,435±0,005	0,40±0,01		
33	Viridiflorol	1620	14,0±0,1	14,3±0,8	14,0±0,2	12,2±0,1	12,7±0,2		
35	Epóxido de humuleno II	1638	0,65±0,03	0,73±0,04	0,62±0,04	0,56±0,04	0,56±0,05		
38	Neofitadieno	1957	0,402±0,003	0,415±0,002	0,495±0,007	0,39±0,01	0,43±0,05		
39	Ácido n-hexadecanoico	1968	1,71±0,04	1,42±0,05	2,66±0,05	1,87±0,04	2,29±0,05		
41	Hexadecanoato de etilo**	2012	0,494±0,006	0,52±0,02	0,55±0,04	0,51±0,04	1,30±0,04		
42	Manol	2094	29,0±0,2	29,7±0,8	28,8±0,4	25,8±0,2	27,3±0,4		
43	Ácido cis,cis-9,12-octadecanoico**	2149	0,66±0,04	tr	1,06±0,09	0,59±0,05	1,06±0,09		
44	Octadecanoato de etilo	2166	0,51±0,01	tr	tr	tr	tr		
45	Tricosano	2300	0,55±0,03	0,63±0,06	0,43±0,06	0,473±0,006	0,63±0,09		
46	trans-ferruginol**	2361	0,21±0,04		0,40±0,03	0,42±0,05	0,25±0,06		
47	Tetracosano	2412	1,25±0,02	1,43±0,02	1,7±0,1	2,27±0,07	2,5±0,1		
48	β-Sitosterol**	2843	1,56±0,02	1,50±0,04	1,6±0,1	1,77±0,07	1,55±0,08		
Compuestos reconocidos e identificados %			82,7	83,4	79,0	74,5	75,4		

Hidrocarburos monoterpénicos	1,9	1,6	1,1	1,9	1,5	1,7	1,4
Monoterpenos oxigenados	15,7	15,7	11,3	13,4	11,7	13,1	9,4
Hidrocarburos sesquiterpénicos	13,2	14,6	13,3	11,6	10,9	11,7	7,4
Sesquiterpenos oxigenados	15,4	15,9	15,5	13,5	14,0	12,8	8,2
Diterpenos	29,2	29,7	29,2	26,2	27,6	24,7	16,3
Triterpenos	1,6	1,5	1,6	1,8	1,6	2,7	6,9
Ácidos grasos y ésteres derivados	3,4	1,9	4,3	3,0	4,7	3,7	4,0
Ceras	2,2	2,5	2,6	3,1	3,5	4,2	4,6

^a Número de pico en la figura 2

^b Índice de retención calculado con base en los tiempos de retención obtenidos en una columna DB-5 (f.e. apolar)

* Identificado por comparación con los índices de retención y espectros de masas obtenidos de patrones de referencia certificados

** Reconocidos tentativamente

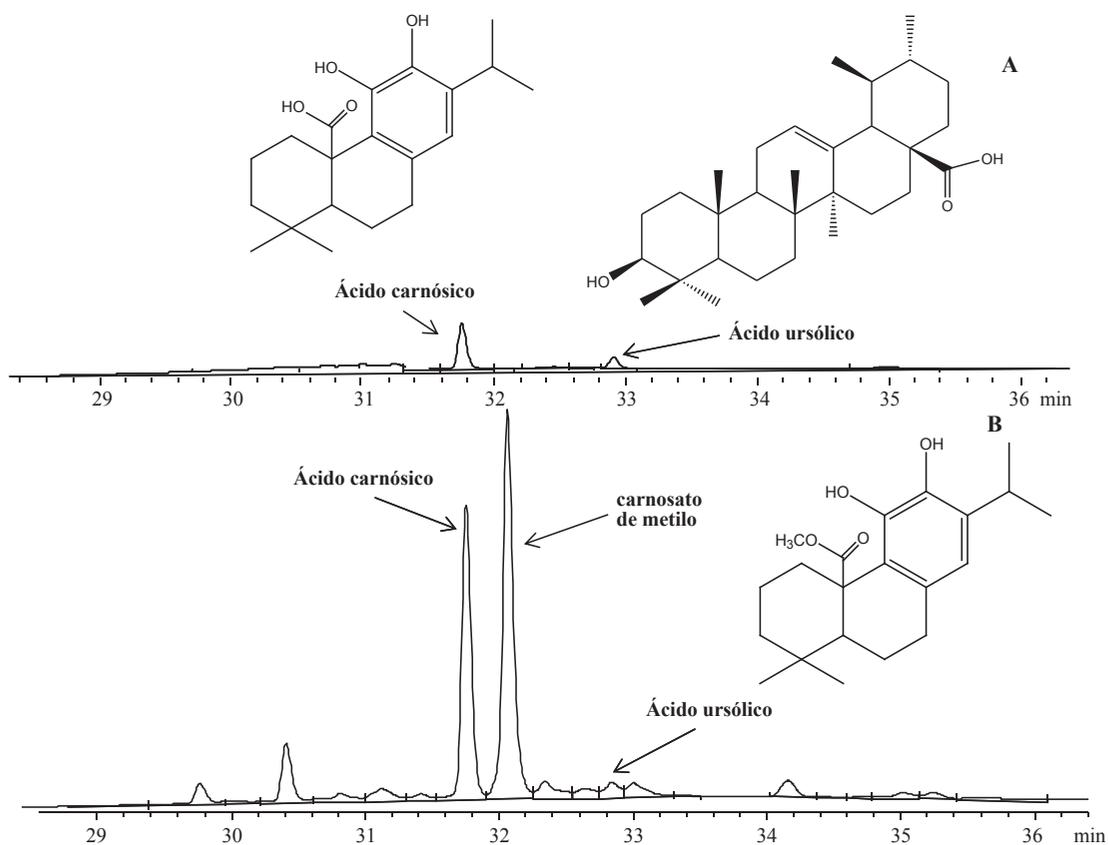


Figura 3. Perfiles obtenidos mediante cromatografía líquida de alta eficiencia con detector de arreglo de diodos de: A. Patrones de referencia certificados, B. Extracto obtenido con fluido supercrítico a partir de salvia (experimento defghpt). Fase móvil conformada por 80 % de metanol y 20 % de agua (ácido ortofosfórico al 0,1 %).

respuesta baja. Se optó por detener la optimización en el vértice 14 y se hizo una réplica del vértice 12, el de valor más alto (punto óptimo). La Tabla 6 contiene los valores de las variables D, F, P y H en los 14 vértices, así como los resultados obtenidos al evaluar el extracto aislado en cada experimento. Se establecieron tres grupos de experimentos según los valores de Y. Los vértices 2, 4, 5 y 6 tuvieron los

valores más bajos de Y (0,062 – 0,154), los vértices 1, 3, 7, 8, 9, 10 y 11 tuvieron valores intermedios (0,294 – 0,374) y los vértices 12 a 14 tuvieron los valores más altos de Y (0,496 a 0,625). Entre estos últimos se tomó el vértice 12 como el punto óptimo. Así, con 65,6 minutos de extracción a un flujo de 2,80 g de CO₂/min, una presión de 47,3 bar en la cámara de extracción y una temperatura de 313 K en el colector, se

Tabla 4. Concentraciones de los terpenos fenólicos detectados en 12 extractos seleccionados

Experimento	Concentración, mg/g de extracto ± s (n=2)		
	Ácido carnósico	Ácido ursólico	Carnosato de metilo
gh	16,4±0,3	46,0±0,6	41±2
dhpt	46,0±0,6	57±1	93,2±0,8
eht	20,4±0,7	64±2	57±2
egpt	28,3±0,4	56,2±0,8	70,56±0,02
efh	18,9±0,1	54,1±0,5	56,8±0,1
gft	19,0±0,4	50±1	54,1±0,5
efhpt	30,1±0,4	60,4±0,4	74±2
degth	18,6±0,5	50±2	54±1
dept	35,1±0,4	52,3±0,9	83,3±0,9
defgh	47,2±0,7	56,9±0,2	92,4±0,2
deft	33,6±0,2	61,7±0,1	93,9±0,8
defghpt	52,7±0,6	72,2±0,9	93±1

obtuvieron extractos con un capacidad antioxidante ORAC de 2,42 μmol de Trolox/mg de extracto (1,27 veces superior al valor reportado por Ramírez, *et al.*, 2012), un contenido total de fenoles equivalente a 753 ± 2 g/l de ácido gálico y un rendimiento de extracción de 1,7 %. En los experimentos del diseño factorial fraccionado hubo condiciones que permitieron obtener un rendimiento de extracción más alto (3,8 %) que el de este vértice. Sin embargo, la capacidad antioxidante y el contenido de fenoles de estos extractos fueron inferiores. Esto muestra el beneficio de usar como guía para la optimización un componente observable que combine tanto el rendimiento como la capacidad antioxidante y el contenido de fenoles.

Conclusiones

El tamizaje inicial basado en un diseño factorial fraccionado permitió identificar un conjunto reducido de variables en cuyo subespacio se hallaron condiciones para la extracción de

Tabla 5. Coeficientes de correlación (r) entre capacidad antioxidante, contenido de fenoles y concentración de compuestos activos en extractos de *Salvia officinalis*

	Ácido carnósico	Capacidad ‘antirradicalaria’	Contenido de fenoles	Carnosato de metilo
Capacidad antirradicalaria	0,812			
Contenido de fenoles	0,812	0,610		
Carnosato de metilo	0,924	0,644	0,846	
Ácido ursólico	0,614	0,397	0,345	0,605

Tabla 6. Resultados de la optimización mediante la metodología simplex

Vértice N°	Simplex N°	Vértices retenidos	D*, min	F*, g/min	P*, bar	H*, °C	R**, %	CA**, mmol Trolox/mg de extracto	CTF**, g/l de ácido gálico	Respuesta Y***
1			75	2,40	40,0	316	1,8	1,77±0,04	630±20	0,294
2			90	2,40	40,0	316	1,6	1,44±0,03	602±46	0,127
3			82,5	2,82	40,0	316	2,0	1,79±0,03	618±48	0,312
4			82,5	2,53	43,3	316	1,9	1,29±0,05	553±20	0,062
5	1		82,5	2,53	40,8	321	2,0	1,47±0,03	571±10	0,154
6	2	1,2,3,5	82,5	2,53	37,1	318	1,5	1,35±0,03	578±10	0,066
7	3	1,2,3,5	82,5	2,53	46,3	315	1,6	1,81±0,05	638±7	0,297
8	4	1,3,5,7	71,3	2,76	43,6	318	1,5	1,93±0,02	622±4	0,325
9	5	1,3,7,8	73,1	2,70	44,1	312	1,7	1,75±0,03	699±10	0,324
10	6	3,7,8,9	78,5	2,85	45,3	315	1,6	1,86±0,02	664±18	0,335
11	7	3,8,9,10	73,3	2,89	41,7	315	1,7	1,930±0,006	668±6	0,374
12	8	8,9,10,11	65,6	2,80	47,3	313	1,7	2,42±0,03	753±2	0,625
13	9	9,10,11,12	74,0	2,89	45,6	310	1,7	2,15±0,03	719±17	0,496
14	10	10,11,12,13	71,7	3,44	48,4	319	1,8	2,20±0,03	724±6	0,528

"Las condiciones de extracción consideradas como óptimas aparecen resaltadas en verde".

*D: tiempo dinámico; F: flujo; P: presión; H: temperatura de separación

**R: rendimiento; CA: capacidad antirradicalaria; CTF: contenido total de fenoles

***Combinación lineal Y = (0,3*R)+(0,4*CA)+(0,3*CTF)

metabolitos secundarios de *S. officinalis* con un desempeño superior en la combinación de capacidad antioxidante, contenido de fenoles y rendimiento de extracción. El carácter empírico de la búsqueda eliminó la incertidumbre que puede surgir en torno a la validez del modelo empleado cuando se utiliza el método de la superficie de respuesta para la optimización.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del Patrimonio Autónomo del Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Francisco José de Caldas, Contrato RC-572-2012.

Referencias

- Aleksovski, S.A., Sovová, H. 2007. Supercritical CO₂ extraction of *Salvia officinalis* L. J. Supercrit. Fluid. **40**: 239–245.
- Areias, F., Valentao, P., Andrade, P. B., Ferreres, F., Seabra, R. M. 2000. Flavonoids and phenolic acids of sage: Influence of some agricultural factors. J. Agric. Food Chem. **48**: 6081-6084.
- Babovic, N., Djilas, S., Jadranin, M., Vajs, V., Ivanovic, J., Petrovic, J., Zizovic, I. 2010. Supercritical carbon dioxide extraction of antioxidant fractions from selected Lamiaceae herbs and their antioxidant capacity. Innov. Food Sci. Emerg. **11**: 98-107.
- Bagheri, H., Manap, M. Y., Solati, Z. 2014. Response surface methodology applied to supercritical carbon dioxide extraction of *Piper nigrum* L. essential oil. LWT - Food Sci. Technol. **57**: 149-155.
- Celiktas, O., Bedir, E., Sukan, F. 2007. In vitro antioxidant activities of *Rosmarinus officinalis* extracts treated with supercritical carbon dioxide. Food Chem. **101**: 1457-1464.
- Danh, L.T., Mammucari, R., Truong, P., Foster, N. 2009. Response surface method applied to supercritical carbon dioxide extraction of *Vetiveria zizanioides* essential oil. Chem. Eng. J. **155**: 617-626.
- Dashtianeh, M., Vatanara, A., Fatemi, S., Sefidkon, F. 2013. Optimization of supercritical extraction of *Pimpinella affinis* Ledeb. using response surface methodology. J. CO₂ Util. **3-4**: 1–6.
- Djarmati, Z., Jankov, R., Schwirtlich, E., Djulinac, B., Djordjevic, A. 1991. High antioxidant activity of extracts obtained from sage by supercritical CO₂ extraction. J. Amer. Oil Chem. Soc. **68**: 731-734.
- Fornari, T., Ruiz-Rodríguez, A., Vicente, G., Vázquez, E., García-Risco, M., Reglero, G. 2012. Kinetic study of the supercritical CO₂ extraction of different plants from Lamiaceae family. J. Supercrit. Fluid. **64**: 1–8.
- Ghasemi, E., Raofie, F., Najafi, N.M. 2011. Application of response surface methodology and central composite design for the optimisation of supercritical fluid extraction of essential oils from *Myrtus communis* L. leaves. Food Chem. **126**: 1449–1453.
- Glisic, S., Ivanović, J., Ristic, M., Skala, D. 2010. Extraction of sage (*Salvia officinalis* L.) by supercritical CO₂: Kinetic data, chemical composition and selectivity of diterpenes. J. Supercrit. Fluid. **52**: 62-70.
- Glisic, S., Ristic, M., Skala, D. 2011. The combined extraction of sage (*Salvia officinalis*L.): Ultrasound followed by supercritical CO₂ extraction. Ultrason.Sonochem. **18**: 318–326.
- Herrero, M., Plaza, M., Cifuentes, A., Ibáñez, E. 2010. Green processes for the extraction of bioactives from rosemary: Chemical and functional characterization via ultra-performance liquid. J. Chromatogr. A **1217**: 2512-2520.
- Ivanović, J., Dilas, S., Jadranin, M., Vajs, V., Babović, N., Petrović, S., Žižović, I. 2009. Supercritical carbon dioxide extraction of antioxidants from rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) and sage (*Salvia officinalis* L.). J. Serb. Chem. Soc. **7**: 717-732.
- Khajeh, M. 2011. Optimization of process variables for essential oil components from *Satureja hortensis* by supercritical fluid extraction using Box-Behnken experimental design. J. Supercrit. Fluid. **55**: 944–948.
- Lu, Y., Foo, L.Y. 1999a. Rosmarinic acid derivatives from *Salvia officinalis*. Phytochemistry, **51**: 91-94.
- Lu, Y., Foo, L.Y., Wong, H. 1999b. Sagecoumarin, a novel caffeic acid trimer from *Salvia officinalis*. Phytochemistry. **52**: 1149-1152.
- Lu, Y., Foo, L.Y. 2001. Salvianolic acid L, a potent phenolic antioxidant from *Salvia officinalis*. Tetrahedron Lett. **42**: 8223-8225.
- Lu, Y; Foo, L.Y. 2000. Flavonoid and phenolic glycosides from *Salvia officinalis*. Phytochemistry, **55**, 263-267.
- Meyer, S., Suhr, K. I., Nielsen, P., Holm, F. 2002. Natural food preservatives, en: Thomas Ohlsson, Nils Bengtsson (editors?). Minimal processing technologies in the food industry. Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 288 p.
- Miliauskas, G., Venskutonis, P., van Beek, T.A. 2004. Screening of radical scavenging activity of some medicinal and aromatic plant extracts. Food Chem. **85**: 231-237.
- Montgomery, D. 2008. Design and Analysis of Experiments. 6a Ed. John Wiley and Sons, New York.
- Nelder, J. A., Mead, R. A. 1965. A simplex method for function minimization. Comput. J. **4**: 308-313.
- Pereira, C., Meireles, A. 2010. Supercritical fluid extraction of bioactive compounds: Fundamentals, applications and economic perspectives. Food Bioprocess. Technol. **3**: 340-372.

- Pereira, P., Bernardo-Gil, M.G., Cebola, M. J., Mauricio, E., Romano, A.** 2013. Supercritical fluid extracts with antioxidant and antimicrobial activities from myrtle (*Myrtus communis* L.) leaves. Response surface optimization. *J. Supercrit. Fluid.* **83**: 57–64.
- Peter, K. V.** (Ed.). 2000. Handbook of herbs and spices, volume 1. CRC Press LLC: Boca Raton, EE.UU., 269-275 p.
- Prior, R.L., Wu, X., Schaich, K.** 2005. Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *J. Agric. Food Chem.* **53**: 4290-4302.
- Ramírez, E. A., Árias, A. J. Vásquez, E. G., Martínez, J. R., Stashenko E. E.** 2012. Rendimiento y capacidad antioxidante de extractos de *Rosmarinus officinalis*, *Salvia officinalis* y *Psidium guajava* obtenidos con CO₂ supercrítico. *Rev. Acad.Colomb.Cienc.* **36**; (140): 305-316.
- Reverchon, E.** 1996. Mathematical modeling of supercritical extraction of sage oil. *AIChE J.* **42**; (6):1765-1771.
- Reverchon, E., Taddeo, R., Della Porta, G.** 1995. Extraction of sage oil by supercritical CO₂: Influence of some process parameters. *J. Supercrit. Fluid.* **8**: 302-309.
- Rizvi, S.** 1994. Supercritical fluid processing of food and biomaterials, Blackie Academic & Professional: Glasgow, UK. 103-113 p.
- Sebranek, J.G., Sewalt, V.J.H., Robbins, K.L., Houser, T.A.** 2005. Comparison of a natural rosemary extract and BHA/BHT for relative antioxidant effectiveness in pork sausage. *Meat Sci.* **69**: 289-296.
- Sharif, K.M., Rahman, M.M., Azmir, J., Mohamed, A., Jahurul, M.H.A., Sahena, F., Zaidul, I.S.M.** 2014. Experimental design of supercritical fluid extraction – A review. *J. Food Eng.* **124**: 105–116.
- Wang, M., Li, J., Rangarajan, M., Shao, Y., Lavoie, E., Huang, T., Ho, C.** 1998. Antioxidative phenolic compounds from sage (*Salvia officinalis*), *J. Agric. Food Chem.* **46**: 4869–4873.
- Wei Z., Wang, S.Y.** 2001. Antioxidant Activity and Phenolic Compounds in Selected Herbs. *J. Agric. Food Chem.* **49**: 5165-5170.
- Wellwood, C., Cole, R.** 2004. Relevance of carnosic acid concentrations to the selection of rosemary, *Rosmarinus officinalis* (L.), accessions for optimization of antioxidant yield. *J. Agric. Food Chem.* **52**: 6101-6107.
- Zulueta, A., Esteve, M. J., Frígola, A.** 2009. ORAC and TEAC assays comparison to measure the antioxidant capacity of food products. *Food Chem.* **114**: 310–316.

Dos décadas de estudio de la diversidad de hormigas en Colombia

Patricia Chacón de Ulloa*, Juan Carlos Abadía

Grupo de Investigación en Biología, Ecología y Manejo de Hormigas, Departamento de Biología,
Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad del Valle, Cali, Colombia

Resumen

El Grupo de Investigación en Biología, Ecología y Manejo de Hormigas de la Universidad del Valle ha publicado en las últimas dos décadas 60 estudios llevados a cabo en diferentes ecosistemas colombianos que abarcan paisajes rurales, áreas protegidas y zonas agrícolas y urbanas. El 70 % de las contribuciones se concentró en la región Andina, seguida de las regiones Pacífica, Insular, Amazonia y Orinoquia, cada una con el 7 %, y un 2 % en la región Caribe. En cuanto al número de especies de hormigas registradas, sobresalieron las zonas con mayor esfuerzo de muestreo como las tierras bajas del Pacífico (227 especies), el valle interandino del río Cauca (215 especies), el piedemonte amazónico en el departamento de Caquetá (132 especies), el Parque Nacional Natural Gorgona (129 especies) y la región Caribe (122 especies). Los estudios incluyeron algunas especies de hormigas clave, ya sea por su rareza, endemismo, amplia distribución o comportamiento invasivo, y, así mismo, aquellas catalogadas como indicadoras de hábitats o usos del suelo, de diversidad y de perturbación del ecosistema. Igualmente, en los estudios se mencionan los servicios ecosistémicos a los que contribuyen varias especies.

Palabras clave: áreas protegidas, bioindicadores, riqueza de especies, paisajes rurales, servicios ecosistémicos.

Two decades of study of the diversity of ants in Colombia

Abstract

The Research Group on the Biology, Ecology, and Management of Ants at the Universidad del Valle has published 60 studies in the last two decades on different Colombian ecosystems, including rural zones, protected areas, crops, and urban areas. Seventy percent of the contributions concentrated in the Andean region, followed by the Pacific, Insular, Amazon and Orinoco regions, each with 7%, and 2% in the Caribbean region. In terms of number of species, the ant diversity recorded reflects areas with greater sampling effort, such as the Pacific lowlands (227 species), the Andean valley of the Cauca river (215 species), the Amazon piedmont in the department of Caquetá (132 species), the Gorgona Natural National Park (129 species), and the Caribbean region (122 species). Studies include some key species of ants due to their rarity, endemism, wide distribution, or invasive behaviour, as well as those classified as indicators of habitats and land uses, diversity, and ecosystem disturbance. Ecosystem services to which various species contribute are also mentioned.

Key words: Protected areas, bioindicators, species richness, rural landscapes, ecosystem services.

Introducción

Las hormigas están agrupadas en la familia Formicidae y el orden Hymenoptera, que incluye también a las abejas, avispas y avispas sierra (Bolton, *et al.*, 2007). Se originaron hace alrededor de 120 millones de años (Brady, *et al.*, 2006) y se han convertido en el grupo de insectos sociales más diverso y exitoso, con cerca de 12.500 especies descritas (Bolton, *et al.*, 2007), divididas en 290 géneros y 21 subfamilias vivientes (Ward, 2007). Se distribuyen en todos los continentes a excepción de la Antártica y son organismos conspicuos de la mayoría de los ecosistemas terrestres, los cuales han alcanzado su mayor diversidad y biomasa en los trópicos (Fernández, 2003; Bolton, *et al.*, 2007).

Las hormigas presentan un amplio rango de hábitos de forrajeo y de asociación con otros organismos (Hölldobler & Wilson, 1990). Además, se las considera una de las herramientas más poderosas y útiles para vigilar cambios en los ecosistemas (Alonso, 2000) debido a su riqueza, abundancia, especialización, facilidad de muestreo, respuesta a cambios medioambientales, fidelidad ecológica, importancia funcional en un ecosistema y estrecha asociación con otras especies, así como al conocimiento taxonómico de la especie. Todos

*Correspondencia:

Patricia Chacón de Ulloa, patricia.chacon@correounivalle.edu.co

Recibido: 14 de febrero de 2014

Aceptado: 7 de abril de 2014

estos elementos hacen de estos insectos el mejor grupo indicador (**Majer**, 1983; **Brown**, 1991), principalmente en estudios que involucran procesos de perturbación (**Andersen & Majer**, 2004).

Desde comienzos de la década de los 90, el Grupo de Biología, Ecología y Manejo de Hormigas de la Universidad del Valle lleva a cabo estudios en diferentes líneas de investigación en este campo: biología y manejo, comunidades e indicadores, agroecología y ecología del paisaje (<http://hormigas.univalle.edu.co/>). El presente trabajo recopila las investigaciones del Grupo desarrolladas y publicadas bajo la orientación de la autora principal; se resaltan los principales aportes al conocimiento de la diversidad de las hormigas y su utilidad en los estudios ecológicos, así como al establecimiento de la línea de base para la toma de decisiones en el manejo y conservación de la biodiversidad.

Recopilación de la información

Se revisaron las publicaciones del Grupo de Biología, Ecología y Manejo de Hormigas en los últimos 21 años (1993-2014). Todas las contribuciones se agruparon según su ubicación en alguna de las seis regiones naturales de Colombia, incluida la región insular del Pacífico. Se examinaron las bases de datos y los resultados de cada trabajo con el fin de sintetizar la información sobre la riqueza y la diversidad de las especies de hormigas, el uso de algunas de ellas como indicadores biológicos, las especies comunes, las especies raras, las hormigas introducidas e invasoras y los servicios ecosistémicos que estos insectos prestan. Igualmente, se hizo una actualización taxonómica (<http://www.antweb.org>) para lograr uniformidad y fiabilidad en los datos. Todas las colecciones de referencia se encuentran depositadas en el Museo de Entomología de la Universidad del Valle (MUSENUV).

La información sobre las localidades muestreadas en cada región (Figura 1) se detalla a continuación.

Región Caribe: trece municipios de los departamentos de Bolívar, Cesar, Córdoba y Magdalena, donde se evaluó la fauna de hormigas asociadas a cultivos de naranja con diferentes tipos de manejo agronómico. Las condiciones de altitud variaban entre los 20 y los 896 metros y la temperatura entre 28 y 37 °C. (**Abadía, et al.**, 2013).

Región Andina: en esta región se concentró el mayor esfuerzo de muestreo, con investigaciones en bosques montanos (2.300 m de altura y 12 a 20 °C) como los de Hato Viejo en el Parque Nacional Natural Farallones de Cali (**Bustos & Ulloa-Chacón**, 1996-97) y el corregimiento Borrero Ayerbe en el municipio de Dagua (**Chacón de Ulloa, et al.**, 1996; **Jones, et al.**, 1999), departamento del Valle del Cauca; los paisajes subandinos del municipio de Aranzazu en el departamento de Caldas (**Abadía, et al.**, 2010), la

Reserva Forestal Natural de Bremen-La Popa en Quindío (**Chaves**, 2003; **Chaves, et al.**, 2008) y el paisaje cafetero del departamento de Risaralda, en el municipio de La Celia (**Zabala, et al.**, 2013).

La mayor área de estudio correspondió al bosque seco tropical del valle interandino del río Cauca, desde el centro de Risaralda hasta el norte del departamento del Cauca, con altitudes entre los 900 y los 1.100 metros y una temperatura promedio de 24 °C. El objetivo principal de los estudios fue el efecto de la transformación del paisaje sobre la diversidad de hormigas en los fragmentos de bosque y sus matrices (**Armbrecht & Chacón de Ulloa**, 1997; **Armbrecht & Chacón de Ulloa**, 1999; **Armbrecht, et al.**, 2001b; **Chacón de Ulloa & Armbrecht**, 2006; **Arcila-Cardona, et al.**, 2008; **Chacón de Ulloa, et al.**, 2008), seguido por el análisis sobre las relaciones entre especies y área en nueve bosques (**Lozano-Zambrano, et al.**, 2009), las relaciones biogeográficas de las hormigas ponerinas (**Zabala, et al.**, 2008), los patrones de diversidad alfa y beta (**Cabra-García, et al.**, 2012) y la síntesis de la riqueza taxonómica regional (**Chacón de Ulloa, et al.**, 2012).

En los mismos fragmentos de bosque se han descrito, así mismo, las relaciones entre plantas y hormigas y entre estas e insectos heterópteros (**Ramírez, et al.**, 2001), y la simbiosis entre hormigas y coleópteros estafilínidos (**García, et al.**, 2001; **García & Chacón de Ulloa**, 2005). Otros trabajos se enfocaron en la biología reproductiva, la ecología y el control de algunas especies nativas dominantes como la pequeña hormiga de fuego *Wasmannia auropunctata* (**Armbrecht & Ulloa-Chacón**, 2003; **Chacón de Ulloa**, 2003a; **Achury, et al.**, 2008; **López, et al.**, 2008; **Achury, et al.**, 2012), e invasoras, como la hormiga loca *Nylanderia (Paratrechina) fulva* (**Chacón de Ulloa, et al.**, 1994; **Aldana, et al.**, 1995a; **Chacón de Ulloa**, 1998; **Chacón de Ulloa, et al.**, 2000; **Arcila, et al.**, 2002a; **Arcila, et al.**, 2002b) y la hormiga fantasma *Tapinoma melanocephalum* (**Jaramillo & Chacón de Ulloa**, 2003). Los estudios sobre las hormigas como plagas potenciales en criaderos de mariposas (**Sanabria-Blandón & Chacón de Ulloa**, 2009) y las hormigas en suelos cultivados con maracuyá (**Arenas, et al.**, 2013), han contribuido al conocimiento del papel de algunas especies depredadoras en sistemas productivos. En cuanto a las hormigas urbanas, son trabajos pioneros en Colombia el inventario hecho en siete ciudades del Valle del Cauca (**Chacón de Ulloa, et al.**, 1996; **Chacón de Ulloa**, 2003b; **Chacón de Ulloa, et al.**, 2006; **Achury, et al.**, 2011; **Chacón de Ulloa & Achury**, 2011; **Chacón de Ulloa, et al.**, 2013), el estudio sobre la importancia de algunas especies comunes como vectores de patógenos nosocomiales (**Olaya, et al.**, 2005) y la evaluación de diferentes métodos de control químico de la hormiga fantasma (**Ulloa-Chacón & Jaramillo**, 2004). Por último, cabe mencionar que el trabajo sobre la incidencia de la hormiga

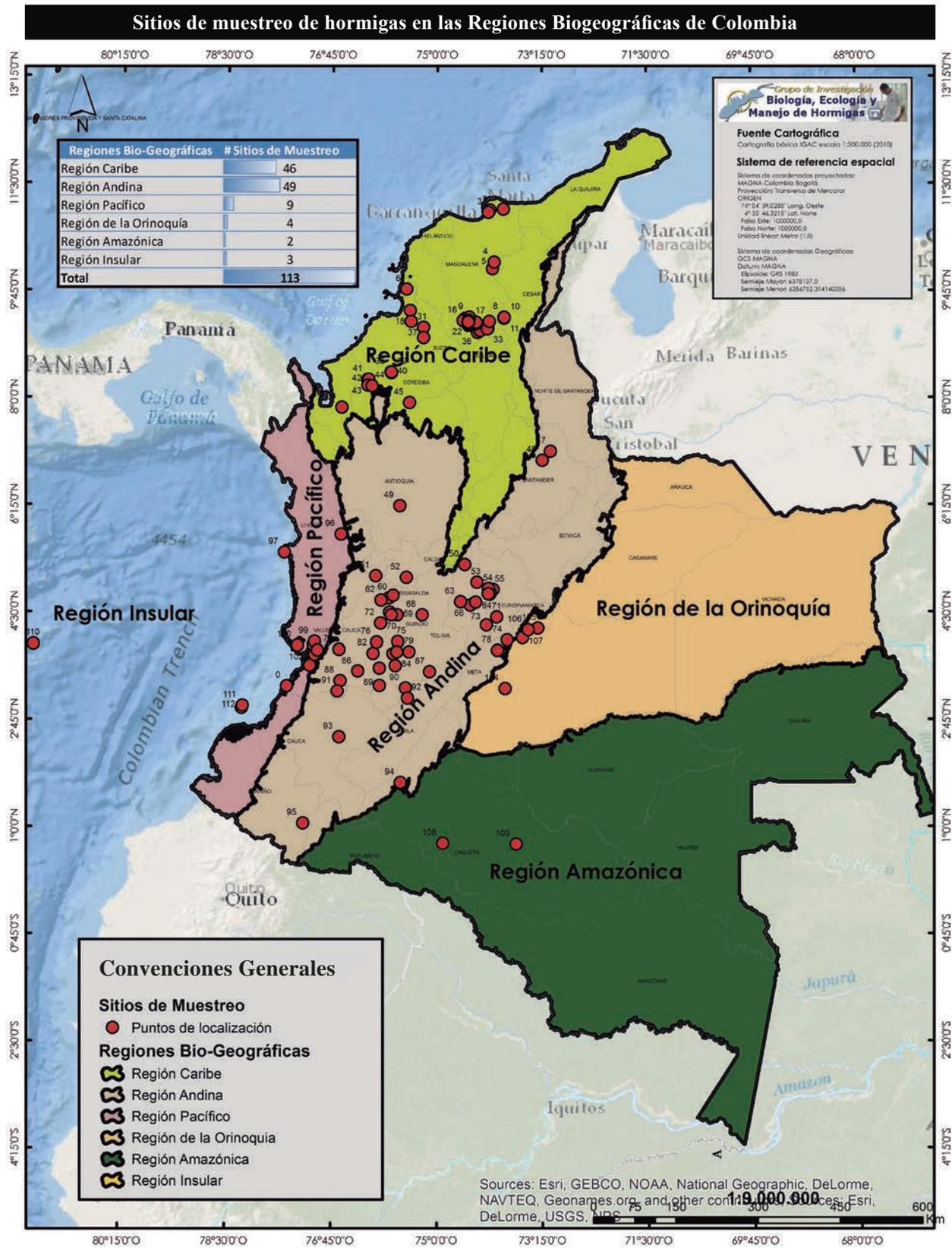


Figura 1. Sitios de muestreo de hormigas en las regiones naturales de Colombia.

cortadora de hojas (*Atta cephalotes*) en zonas verdes de la ciudad de Cali (Montoya, *et al.*, 2006) fue uno de los primeros estudios sobre esta especie en ambientes urbanos en Colombia (Chacón de Ulloa, *et al.*, 2013).

Región Pacífica: esta incluye la zona de vida del bosque muy húmedo tropical (bmh-T), con temperaturas entre los 24 y 28 °C y altitudes entre 39 y 1.520 metros. Los trabajos se centraron en la diversidad de hormigas en cuatro localidades de la llanura del Pacífico en el municipio de Buenaventura (Chacón de Ulloa, *et al.*, 1996) y la cuenca media del río Calima (Aldana & Chacón de Ulloa, 1995b; 1999); también se observaron las relaciones existentes en un mosaico de hormigas del bosque lluvioso del Chocó (Armbrecht, *et al.*, 2001a) y se propuso cuantificar la protección que confieren las hormigas mirmicinas (*Pheidole*) a plantas melastomátaceas del género *Tococa* (Álvarez, *et al.*, 2001).

Región Amazónica: en esta se evaluaron sistemas productivos de pastizales del departamento del Caquetá con alturas entre los 200 y 400 metros y temperaturas entre los 18 y 36 °C (Sanabria-Blandón, 2011). Se analizó el gremio de hormigas cazadoras (Sanabria-Blandón & Chacón de Ulloa, 2011), la riqueza de hormigas legionarias Dorylinae (Ecitoninae) (Sanabria-Blandón & Achury, 2011) y, además, se reportaron nuevos registros de especies para Colombia (Guerrero & Sanabria, 2012).

Región de la Orinoquia: la mayoría de los trabajos relativos a esta región se llevaron a cabo en el Centro de Investigación del CIAT en Carimagua, municipio de Puerto Gaitán (Meta), a 200 metros de altitud y una temperatura media de 27 °C, y su objetivo fue registrar las especies de hormigas asociadas a la sabana nativa y a las pasturas introducidas (Medina, *et al.*, 1993; Medina, 1994; Medina, 1995). Igualmente, se evaluó el establecimiento de posibles hormigas indicadoras de los servicios ecosistémicos del suelo en diferentes sistemas productivos del departamento del Meta (Sanabria, *et al.*, 2012).

Región Insular: en esta región se hicieron estudios en las islas de Gorgona y Malpelo, con altitudes entre los 300 y 340 metros y una temperatura promedio de 26 °C. En el Parque Nacional Natural Gorgona se estimaron los cambios ocurridos en un período de 24 años en la fauna de formícidos del suelo y sotobosque, comparando muestreos de fines de la década de los 80 (Baena & Alberico, 1991) con evaluaciones hechas en el 2010 (Valdés-Rodríguez, *et al.*, 2014); también se registró por primera vez en Colombia información sobre la riqueza y las características particulares de especies de hormigas presentes en el dosel en Gorgona (Chacón de Ulloa, *et al.*, 2014). En el Santuario de Fauna y Flora Malpelo se estudió la composición y la estructura trófica de los invertebrados terrestres (Calero, *et al.*, 2011), entre los cuales se hallaron algunas especies de hormigas introducidas (Calero, *et al.*, 2008).

Resultados y discusión

Los 60 artículos que ha publicado el Grupo de Investigación en Hormigas en el lapso de 21 años (1993 - 2014) incluyen todas las regiones naturales de Colombia en menor o mayor proporción (Figura 1). La mayor parte de la información se refería a la región Andina, con una representación del 70 % de los estudios, en contraste con el 2 % de la zona Caribe. Los estudios sobre otras regiones naturales (Amazónica, Orinoquia, Pacífica e Insular) tuvieron menor representación, 7 % en cada una, pero incluyeron diferentes ecosistemas.

La ubicación geográfica de la Universidad del Valle ha influido favorablemente en el número de estudios sobre los parches de bosque orientados a evaluar el efecto de la fragmentación sobre la diversidad de las hormigas. La importancia de dicha evaluación radicó en su aporte a los planes de conservación del bosque seco tropical, zona de vida que se encuentra entre los ecosistemas más amenazados del mundo como consecuencia de perturbaciones antropogénicas intensivas (Janzen, 1988; Hoekstra, *et al.*, 2005); en el caso de la cuenca alta del río Cauca, solo queda 1,76 % de cobertura boscosa (10.716 hectáreas) representada en pequeños fragmentos aislados (Arcila, *et al.*, 2012).

Los trabajos han abarcado diferentes tipos de ambientes (Figura 1S, <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SuppFile/124/390>); los más estudiados han sido los paisajes rurales, predominantemente los fragmentos de bosque secundario y sus matrices (cultivos, pastizales, guaduales, bosques riparios y corredores). En menor proporción, aunque relevante, han figurado las áreas protegidas del Parque Nacional Natural Gorgona y el Santuario de Fauna y Flora Malpelo (región Insular), el Parque Nacional Natural Farallones de Cali, el Parque Natural Regional El Vínculo y la Reserva Forestal de Bremen (región Andina). En tercer lugar estuvieron los trabajos llevados a cabo en zonas de regeneración y en las principales ciudades del departamento del Valle del Cauca (Cali, Jamundí, Palmira, Buga, Tulúa, Cartago y Buenaventura). Los ecosistemas agrícolas, donde además de la estimación de la diversidad de hormigas, se han registrado especies con potencial para el control biológico (Chacón de Ulloa, 1994), ocuparon el último lugar en cuanto a la representatividad de los hábitats estudiados.

En cada región natural continental (Caribe, Andina, Pacífica, Orinoquia y Amazónica), se estudió un tipo de paisaje y sus respectivos elementos o usos del suelo, con el fin de cuantificar la riqueza y diversidad de la mirmecofauna (Tabla 1). Todos los trabajos evidenciaron una acentuada disminución en la riqueza de las especies de hormigas en elementos del paisaje sin cobertura vegetal natural comparados con los bosques secundarios. Ejemplo de ello es el trabajo de Bustos & Ulloa (1996, 1997), quienes recolectaron 25 especies de hormigas en tres estados sucesionales de bosque nublado del Parque

Tabla 1. Riqueza de la mirmecofauna en los diferentes paisajes de las regiones naturales y la zona insular de Colombia. *Elemento del paisaje / usos del suelo*: bosques (bq), corredor ripario (cr), gradual (gd), potrero (pt), silvopastoriles (sp), cultivos anuales (ca), sustrato rocoso (sr), zona en regeneración (zr), zonas perturbadas (zp), agroforestal (ag), rastrojo (rt), huerto habitacional (hh).

Región natural	Tipo de paisaje	Elementos del paisaje - Usos del suelo	N. de géneros	N. de especies
Caribe	Ecosistemas agrícolas	Cultivos de naranja	44	122
	Cafetero (Risaralda)	Bosque continuo, parche de bosque y café de sol	34	96
	Cuenca media del río Chambery (Caldas)*	Bosques, corredor ripario, pastizal	13	23
Andina	Reserva Natural Forestal y de Investigación Bremen-La Popa (Quindío)	Bosque, pastizal	28	58
	Parque Natural Nacional Los Farallones de Cali	Bosque, zona en regeneración	19	25
	Valle interandino del río Cauca	Parches de bosque, gradual, caña de azúcar, potrero	63	215
Pacífica	Cuenca media del río Calima (Valle del Cauca)	Bosques, zonas en regeneración y perturbadas	53	227
	Cabo Corrientes (Chocó)	Bosque primario	29	117
Amazonía	Piedemonte amazónico (Caquetá)	Agroforestal, huertos, pastos, rastrojo	42	132
Orinoquia	Sistemas productivos (C.I. Carimagua, Meta)	Pastos mejorados	19	41
	Sistemas productivos del Departamento del Meta	Agroforestal, cultivos anuales, pastizales, sabana	33	92
Insular	Parque Nacional Natural Gorgona	Bosques, zonas en regeneración	47	130
	Santuario de Fauna y Flora Malpelo	Sustrato rocoso	3	3

* Estudio realizado solo con el grupo de hormigas cazadoras

Nacional Natural Farallones de Cali y encontraron un mayor número de especies en el bosque primario, seguido del bosque secundario y la zona en regeneración.

En el paisaje cafetero de Risaralda se registraron 96 especies de hormigas, 74 de las cuales se hallaron en el bosque continuo, 49 en los parches de bosque y solo 41 en los cafetales a libre exposición (Zabala, *et al.*, 2013). En el valle interandino del río Cauca se ha evaluado el mayor número de elementos del paisaje (fragmentos de bosque secundario, bosques riparios, graduales, potreros y cultivos, principalmente de caña de azúcar), que, en su conjunto, albergan una importante riqueza regional representada por 215 especies de hormigas, es decir, el 24 % de las conocidas en el país (Chacón de Ulloa, *et al.*, 2012). Debido al muestreo efectuado durante períodos secos y lluviosos a lo largo de varios años, y al empleo de una variedad de métodos complementarios de recolección, el Grupo de Biología, Ecología y Manejo de Hormigas ha podido estudiar profusamente la riqueza de hormigas del bosque seco del valle geográfico del río Cauca. Sin embargo, en los estudios se ha recomendado muestrear el dosel para tener una estimación más acertada de la diversidad de la mirmecofauna (Chacón de Ulloa, *et al.*, 2012).

En los estudios sobre el valle geográfico del río Cauca, los servicios ecosistémicos y el papel ecológico de las hormigas, se evidenciaron las relaciones entre estas y las plantas (Ramírez, *et al.*, 2001) en el control de posibles plagas, principalmente por la depredación que llevan a cabo las hormigas cazadoras (Arcila-Cardona, *et al.*, 2008; Chacón de Ulloa, *et al.*, 2008), y en las interacciones competitivas entre hormigas (Achury, *et al.*, 2008; Achury, *et al.*, 2012).

En la región Pacífica las investigaciones se han centrado en el bosque primario, las zonas en proceso de regeneración y las zonas perturbadas de la cuenca media del río Calima, donde se han registrado un total de 227 especies de hormigas (Tabla 1) que, en su momento, representaron el 33 % de las especies conocidas en Colombia (Aldana & Chacón de Ulloa, 1999). Además, se ha indagado sobre la importancia de las hormigas dominantes en bosques lluviosos del Chocó biogeográfico tanto desde el punto de vista temporal como espacial (Armbrecht, *et al.*, 2001).

En la región de la Amazónica se evaluaron sistemas productivos del piedemonte llanero y se detectaron nueve tipos de usos del suelo (pasturas tradicionales, sistemas silvopastoriles y agroforestales, cultivos de palma) (Tabla 1). Del grupo de hormigas cazadoras se registraron 35 especies, con una mayor riqueza en la ventana agroforestal (24 especies), mientras que en el sistema silvopastoril se encontraron 19, y en el tradicional, solamente ocho (Sanabria-Blandón & Chacón de Ulloa, 2012). También se hizo un inventario de hormigas legionarias, grupo de gran importancia para la dinámica de la red trófica en la zona, y se registraron cinco especies en siete tipos de uso del suelo, y se reportaron por primera vez para el departamento de Caquetá las especies *Cheliomyrmex andicola* y *Eciton dulceum* (Sanabria & Achury, 2011).

Se destaca el aporte de los estudios de la zona Insular, donde se ha muestreado el sustrato rocoso del Santuario de Fauna y Flora Malpelo (Calero, *et al.*, 2011). Los estudios reflejan la intensificación del estudio de la mirmecofauna del suelo, sotobosque y dosel en el Parque Nacional Natural Gorgona, incluida la pequeña isla de Gorgonilla (Chacón

de Ulloa, *et al.*, 2014; Valdés-Rodríguez, *et al.*, 2014). Los investigadores han concluido que después de 24 años de recuperación, Gorgona alberga una gran riqueza (129 especies) (Tabla 1), y que los mecanismos ecológicos y los procesos de recuperación natural han generado microhábitats, permitiendo así la coexistencia de muchas especies (Valdés-Rodríguez, *et al.*, 2014).

En la Orinoquia se documentó la presencia de 41 especies en sistemas productivos (Tabla 1). Los primeros trabajos reconocieron la fauna asociada a forrajeras tropicales y su implicación como depredadoras de huevos y ninfas del salivazo de los pastos; en los trabajos se destacan las hormigas generalistas de los géneros *Solenopsis*, *Wasmannia* y *Pheidole* (Medina, *et al.*, 1993; Medina, 1994; Medina, 1995). Igualmente, se han evaluado cinco usos del suelo (plantaciones de caucho, de palma, cultivos anuales, sabana nativa y pasturas mejoradas), donde se encontraron 92 especies, 14 de ellas catalogadas como indicadoras de servicios ecosistémicos del suelo, entre las que sobresalen las que anidan en el suelo, dado su efecto sobre la morfología del mismo, y las hormigas vagabundas como indicadoras de la macrofauna (Sanabria, *et al.*, 2012).

Por último, en el Caribe colombiano se reconocieron 122 especies de hormigas en cultivos de naranja con diferentes tipos de manejo ubicados en la zona de vida de bosque seco tropical (Tabla 1S, <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SuppFile/124/378>). Además de evidenciar la sensibilidad de las hormigas a los agroquímicos, se destacó el grupo de las hormigas cazadoras y las mirmicinas crípticas como potenciales controladores biológicos de las termitas que afectan los árboles de cítricos (Abadía, *et al.*, 2013).

Especies raras, comunes, endémicas e introducidas

En los estudios sobre las diferentes regiones se mencionan con especial énfasis las especies de hormigas que aportan información sobre el estado de equilibrio y heterogeneidad de la localidad evaluada (Tabla 1S). Se señaló a la subfamilia Myrmicinae como la más diversa y la que contiene el mayor número de especies consideradas raras, endémicas, comunes o introducidas; le siguieron las subfamilias Ponerinae, Formicinae y Dolichoderinae, en tanto que de las subfamilias más pequeñas, Amblyoponinae, Cerapachyinae y Proceratiinae, solamente se hallaron una o dos especies. De las 34 especies raras (aquellas presentes solo en un hábitat de un elemento del paisaje), el 26,5 % correspondió a mirmicinas, especialmente de la especie en peligro de extinción *Oxyepoecus inquilinus* (Fernández, 2002), la cual se halló en la región Caribe (Abadía, *et al.*, 2013). En segundo lugar se registró la subfamilia Ponerinae (20,6 %), con cinco especies de hormigas cazadoras del género *Pachycondyla*. Con un menor porcentaje (11,8 %) se menciona el género *Gracilidris* (Dolichoderinae), con su única

especie *Gracilidris pombero*, en la región de la Amazonia (Guerrero & Sanabria, 2012). Es importante resaltar que, según los estudios, la mayoría de las especies consideradas raras se recolectaron en hábitats con cobertura boscosa (Bustos & Ulloa-Chacón, 1996-97; Armbrrecht & Chacón de Ulloa, 1997; Armbrrecht & Chacón de Ulloa, 1999; Aldana & Chacón de Ulloa, 1999; Arcila-Cardona, *et al.*, 2008; Chacón de Ulloa, *et al.*, 2008; Chaves, *et al.*, 2008; Zabala, *et al.*, 2008; Abadía, *et al.*, 2010; Chacón de Ulloa, *et al.*, 2012; Zabala, *et al.*, 2013; Chacón de Ulloa, *et al.*, 2014; Valdés-Rodríguez, *et al.*, 2014).

En el ecosistema de bosque seco del río Cauca, los bosques en su conjunto aportaron más especies propias y raras que los otros hábitats (bosques riparios, guaduales, cultivos, potreros), por lo que se ha propuesto que la conservación de uno o pocos fragmentos boscosos no es suficiente para la preservación de la fauna de hormigas en el valle del río Cauca y que, por el contrario, conservar todos los fragmentos es un punto clave para el mantenimiento de la diversidad regional (Armbrrecht & Ulloa-Chacón, 1999; Chacón de Ulloa, *et al.*, 2012).

Entre las 30 especies consideradas comunes (Tabla 1S), es decir, aquellas presentes en casi todos los hábitats y de amplia distribución geográfica, en los estudios se mencionan las mirmicinas generalistas, como la hormiga nativa de fuego *Solenopsis geminata*, las hormigas cabezonas *Pheidole biconstricta*, *Pheidole radoszkowskii*, *Pheidole susannae*, y la pequeña hormiga de fuego *Wasmannia auropunctata* (Armbrrecht & Chacón de Ulloa, 1997; Armbrrecht & Chacón de Ulloa, 1999; Armbrrecht & Ulloa-Chacón, 2003; Achury, *et al.*, 2011; 2012; Chacón de Ulloa, *et al.*, 2012; Abadía, *et al.*, 2013; Zabala, *et al.*, 2013). Este grupo de hormigas se encuentra frecuentemente en ecosistemas perturbados, en zonas muy intervenidas, como jardines y terrenos baldíos, en áreas urbanas y campos cultivados, donde encuentran un entorno apropiado para incrementar sus poblaciones y dominar aprovechando eficientemente los recursos (Chacón de Ulloa, 2003; Chaves, *et al.*, 2008; Jiménez, *et al.*, 2008; Achury, *et al.*, 2012; Chacón de Ulloa, *et al.*, 2012).

Entre las hormigas cazadoras más comunes objeto de los estudios sobresale la hormiga cachona *Ectatomma ruidum* en los Llanos Orientales (Medina, 1995), en varias localidades del bosque seco tropical del valle geográfico del río Cauca y en cultivos de naranja de la región Caribe (Arcila-Cardona, *et al.*, 2008; Chacón de Ulloa, *et al.*, 2012; Abadía, *et al.*, 2013). Otros autores han descrito esta especie como posible agente de control natural en pasturas de la región Andina (Santamaría, *et al.*, 2009).

El 35,6 % de las especies endémicas son ectatominas del género *Gnamptogenys* (Tabla 1S) y se encuentran principalmente en los bosques lluviosos del Chocó biogeográfico

(Fernández & Sendoya, 2004; Zabala, *et al.*, 2008). El Pacífico colombiano es una de las regiones con mayor riqueza en recursos naturales y con altos índices de biodiversidad y endemismos, ya que posee una de las selvas primarias tropicales más exuberantes y diversas del mundo (Zabala, *et al.*, 2008). Se ha explicado que eventos como el levantamiento de los Andes, particularmente el de la cordillera Occidental, tuvieron gran efecto sobre la distribución y diversificación de la biota, aislándola progresivamente y sometiéndola a diferentes condiciones climáticas por el efecto de sombra de lluvia (Zabala, *et al.*, 2008). Igualmente, los refugios pleistocénicos ubicados en el Chocó biogeográfico han sido centros de especiación y endemismo importantes y han permitido la diversificación de grupos como *Gnamptogenys* y *Pachycondyla* (Zabala, *et al.*, 2008; Baena, 1993).

Por último, entre las especies introducidas se destacan las hormigas oportunistas con hábitos generalistas que pueden llegar a comportarse como invasoras; es el caso de la hormiga loca *Nylanderia fulva*, que fue introducida a Colombia en la década de los años 70 y llegó a distribuirse en ocho departamentos (Chacón de Ulloa, *et al.*, 1994; Aldana, *et al.*, 1995a; Arcila & Quintero, 2005; Chacón de Ulloa, *et al.*, 2006).

Especies indicadoras

Hormigas identificadas hasta el nivel específico se han propuesto como especies indicadoras de los elementos del paisaje estudiados en cada región natural (Tabla 2S, <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SuppFile/124/392>). En la mayoría de los trabajos la atención se enfocó en el grupo de las hormigas cazadoras, pues debido a sus requerimientos de microhábitat (nidifican entre hojarasca y madera en descomposición), son susceptibles a los cambios en el ambiente (Arcila-Cardona, *et al.*, 2008; Chacón de Ulloa, *et al.*, 2008; Chaves, *et al.*, 2008; Abadía, *et al.*, 2010; Sanabria-Blandón & Chacón de Ulloa, 2011; Cabra-García, *et al.*, 2012). En los trabajos se han propuesto cuatro especies para el bosque primario de la región Andina, entre las que se destacan dos del género *Heteroponera* (*H. inca* y *H. monticola*) (Bustos & Ulloa-

Chacón, 1996-97; Armbrrecht & Chacón de Ulloa, 1997; Armbrrecht & Chacón de Ulloa, 1999; Abadía, *et al.*, 2010). Por el contrario, para el corredor ripario solo se menciona la especie *Gnamptogenys bisulca*; para el guadual, *Mayaponera* (*Pachycondyla*) *constricta*, y para las zonas en regeneración, *Labidus predator* (Bustos & Ulloa-Chacón, 1996-97; Arcila-Cardona, *et al.*, 2008; Abadía, *et al.*, 2010).

En la región natural del Pacífico también se han seleccionado especies bioindicadoras, principalmente de bosques poco perturbados, como *Acanthoponera mucronata*, *Belonopelta deletrix*, *Cyphomyrmex cornutus*, *Dolichoderus shattucki* y *Odontomachus cornutus* (Aldana & Chacón de Ulloa, 1999). En la Amazonia, diez especies de hormigas resultaron indicadoras de hábitats con cobertura arbórea, sobresaliendo tres del género *Pachycondyla* y la hormiga conga *Paraponera clavata*, en tanto que en el sistema silvopastoril se mencionó la hormiga carpintera *Camponotus simillimus indianus* (Sanabria, 2011; Sanabria-Brandón & Chacón de Ulloa, 2011).

En la Orinoquia se han registrado *Hypoconera punctatissima* y *Pseudomyrmex gracilis* como especies con valor indicador para el uso del suelo de cultivos anuales (arroz, maíz y soya). En zonas muy perturbadas se destacan aquellas hormigas vagabundas y oportunistas de los géneros *Pheidole*, *Solenopsis* y *Wasmannia* (Armbrrecht & Chacón de Ulloa, 1997; Aldana & Chacón de Ulloa, 1999; Armbrrecht & Chacón de Ulloa, 1999; Armbrrecht & Ulloa-Chacón, 2003; Achury, *et al.*, 2011). Además, la pequeña hormiga de fuego *W. auropunctata* se ha propuesto como indicadora negativa de la riqueza y abundancia de hormigas del bosque seco (Armbrrecht & Ulloa-Chacón, 2003; Achury, *et al.*, 2012).

En conclusión, mediante el estudio de la ecología, el comportamiento, los servicios ecosistémicos, la distribución y la historia natural de las hormigas, el Grupo de Investigación en Biología, Ecología y Manejo de Hormigas de la Universidad del Valle ha contribuido al conocimiento de su diversidad en el país y a demostrar su valor como herramienta eficiente y rápida para la conservación e identificación del estado de un hábitat o paisaje.

Información suplementaria

Figura 1S. Tipos de ambientes explorados en estudios de la mirmecofauna de Colombia

Tabla 1S. Especies de hormigas que revisten mayor importancia en los paisajes estudiados en las regiones naturales de Colombia: Caribe (ca), Andina (an), Pacífica (pa), Orinoquia (or), Amazónica (am), Insular (in)

Tabla 2S. Especies de hormigas con valor significativo como indicadoras de los elementos del paisaje en las diferentes regiones naturales de Colombia

Agradecimientos

A todas las personas que durante 20 años han contribuido al desarrollo de los diferentes proyectos y a la elaboración de los trabajos que se recopilan en el presente escrito. Al Departamento de Biología de la Universidad del Valle, por su apoyo económico y de logística; a las siguientes instituciones por la cofinanciación de las investigaciones: Colciencias, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Banco Mundial, Instituto Humboldt, National Geographic, National Science and Engineering Research Council Canada, Invemar, Corpoica, Wild Life Conservation Society, Fundación Farallones de Cali, Fundación José Celestino Mutis (FEN de Colombia). A David Calero, por la elaboración del mapa, a Carmen Elisa Posso, por sus valiosos aportes al manuscrito, y a Philip Silverstone-Psokin, por la revisión del resumen en inglés.

Bibliografía

- Abadía, J. C., Bermúdez, C., Lozano-Zambrano, F. & Chacón, P. 2010. Hormigas cazadoras en un paisaje subandino de Colombia: riqueza, composición y especies indicadoras. *Revista Colombiana de Entomología* **36** (1): 127-134.
- Abadía, J. C., Arcila, A. M. & Chacón de Ulloa, P. 2013. Hormigas en cultivos de naranja (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) de la costa Caribe de Colombia. *Biota Colombiana* **14** – Suplemento especial – Artículos de datos: 13-19.
- Achury, R., Chacón de Ulloa, P. & Arcila, A. M. 2008. Composición de hormigas e interacciones competitivas con *Wasmannia auropunctata* en fragmentos de bosque seco tropical. *Revista Colombiana de Entomología* **34** (2): 209-216.
- Achury, R., Arcila, A. M. & Chacón de Ulloa, P. 2011. The Myrmicinae ant *Pheidole susannae* as potencial urban pest in Colombia. En: *Proceeding of the 7th International Conference on Urban Pests*. (Robinson, W. H. & De Carvalho-Campos, A. E. (eds.). Ouro Preto, Brazil. 417 p.
- Achury, R., Chacón de Ulloa, P. & Arcila, A. 2012. Effects of the Heterogeneity of the Landscape and the Abundance of *Wasmannia auropunctata* on Ground Ant Assemblages in a Colombia Tropical Dry Forest. *Psyche*. Doi:10.1155: 1.12.
- Aldana, R. C., Baena, M. & Chacón de Ulloa, P. 1995a. Introducción de la hormiga loca (*Paratrechina fulva*) a la Reserva Natural Laguna de Sonso (Valle del Cauca, Colombia). *Bol Mus Ent Universidad Valle* **3** (1): 15-28.
- Aldana, R. C. & Chacón de Ulloa, P. 1995b. Nuevos registros de hormigas (Hymenoptera: Formicidae) para Colombia. *Bol Mus Ent Universidad Valle* **3** (2): 55-59.
- Aldana, R. C. & Chacón de Ulloa, P. 1999. Megadiversidad de hormigas (Hymenoptera: Formicidae) de la cuenca media del río Calima. *Revista Colombiana de Entomología* **25** (1-2): 37-47.
- Álvarez, G., Armbrrecht, I., Jiménez, E., Armbrrecht, H. & Ulloa-Chacón, P. 2001. Ant-plant association in two *Tococa* species from a primary rain forest of Colombian Chocó (Hymenoptera: Formicidae). *Sociobiology* **38**: 585-602.
- Alonso, L. E. 2000. Ants as indicators of diversity. En: *Ants standard methods for measuring and monitoring biodiversity*. Agosti, D., Majer, J., Alonso, L. & Schultz, T. (eds.). Smithsonian Institution Press, Washington. 304 p.
- Andersen, A. N. & Majer, J. D. 2004. Ants show the way Down-Under: Invertebrates as bioindicators in land management. *Frontiers in Ecology and the Environment* **2**: 291-298.
- Arcila, A., Gómez, L. A. & Ulloa-Chacón, P. 2002a. Immature development and colony growth of crazy ant *Paratrechina fulva* (Mayr) under laboratory conditions. *Sociobiology* **39** (2): 307-321.
- Arcila, A., Ulloa-Chacón, P. & Gómez, L. A. 2002b. Factors that influence fecundity of queens and queen production in crazy ant *Paratrechina fulva* (Hymenoptera: Formicidae). *Sociobiology* **39** (2): 323-334.
- Arcila, A & Quintero, M. 2005. Impacto e historia de la introducción de la hormiga loca (*Paratrechina fulva*) a Colombia. Informe final, contrato de prestación de servicios No. 136 Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt 91 p.
- Arcila-Cardona, A., Osorio, A. M., Bermúdez, C. & Chacón de Ulloa, P. 2008. Diversidad de hormigas cazadoras asociadas a los elementos del paisaje del bosque seco. En: *Sistemática, biogeografía y conservación de las hormigas cazadoras de Colombia*. Lozano-Zambrano, F., Fernández, F., Jiménez, E. & Árias, T. (eds.). Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D. C. Colombia. 617 p.
- Arcila Cardona, A. M., Valderrama Ardila, C. & Chacón de Ulloa, P. 2012. Estado de fragmentación del bosque seco de la cuenca alta del río Cauca. *Biota Colombiana, especial bosque seco en Colombia* **13** (2): 86-100.
- Arenas, A., Armbrrecht, I. & Chacón, P. 2013. Carábidos y hormigas del suelo en dos áreas cultivadas con maracuyá amarillo (*Passiflora edulis*) en el Valle del Cauca, Colombia. *Acta Biológica Colombiana* **18** (3): 439-448.
- Armbrrecht, I. & Chacón de Ulloa, P. 1997. Composición y diversidad de hormigas en bosques secos relictuales y sus alrededores, en el Valle del Cauca, Colombia. *Revista Colombiana de Entomología* **23** (1-2): 45-50.
- Armbrrecht, I. & Ulloa-Chacón, P. 1999. Rareza y diversidad de hormigas en fragmentos de bosque seco colombianos y sus matrices. *Biotropica* **31** (4): 646-653.
- Armbrrecht, I., Jiménez, E., Álvarez, E. G., Ulloa-Chacón, P. & Armbrrecht, H. 2001a. An ant mosaic in the Colombian rain forest of Chocó (Hymenoptera: Formicidae). *Sociobiology* **37** (3B): 491-509.
- Armbrrecht, I., Tischer, I. & Chacón, P. 2001b. Nested subsets and partition patterns in ant assemblages (Hymenoptera, Formicidae) of Colombian dry forest fragments. *Pan Pacific Entomologist* **77** (3): 196-209.

- Armbrecht, I. & Ulloa-Chacón, P.** 2003. The little fire ant *Wasmannia auropunctata* (Roger) (Hymenoptera: Formicidae) as a diversity indicator of ants in tropical dry forest fragments of Colombia. *Environmental Entomology* **32** (3): 542-547.
- Baena, M. L.** 1993. Hormigas cazadoras del género *Pachycondyla* (Hymenoptera: Ponerinae) de la Isla Gorgona y la planicie pacífica colombiana. *Bol Mus Ent. Universidad Valle* **1**: 13-21.
- Baena, M.L. & M. Alberico.** 1991. Relaciones biogeográficas de las hormigas de la Isla Gorgona. *Revista Colombiana de Entomología* **17**: 24-31.
- Brown Jr. K. S.** 1991. Conservation of neotropical environment: Insects as indicators. In: *Conservation of insects and their habitats*. Collins, N. M. & Thomas, J. (eds.). London, Academic Press. 430 p.
- Bustos, J. & Ulloa-Chacón, P.** 1996-97. Mirmecofauna y perturbación en un bosque de niebla neotropical (Reserva Natural Hato Viejo, Valle del Cauca, Colombia). *Revista de Biología Tropical* **44** (3)/**45** (1): 259-266.
- Bolton, B.** 2007. Taxonomy of the dolichoderine ant genus *Technomyrmex* Mayr (Hymenoptera: Formicidae) based on the worker caste. *Contributions of the American Entomological Institute* **35** (1):1-150.
- Brady, S.G., Schultz, T. R., Fisher, B.L. & Ward, P. S.** 2006. Evaluating alternative hypotheses for the early evolution and diversification of ants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **103**: 18172-18177.
- Cabra-García, J. C., Bermúdez, C., Osorio, A. M., & Chacón, P.** 2012. Cross-taxon congruence of α and β diversity among five leaf litter arthropod groups in Colombia. *Biodiversity and Conservation*. Doi 10.1007/s10531-012-0259-5.
- Calero, D., López-Victoria, M. & Chacón, P.** 2008. Alien species on a very isolated island: The case of Malpelo, 35 years after the first invertebrate records. In: *Towards a synthesis: Neobiota book of abstracts*. Pyseck, P. & Pergl, J. (eds.). Institute of Botany Pruhonice, Academy of Sciences, Czech Republic. 250 p.
- Calero, D., López-Victoria M. & Chacón de Ulloa, P.** 2011. Composición y estructura trófica de los invertebrados terrestres de la Isla Malpelo, Pacífico colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* **40** (supl. Esp.): 155-173.
- Chacón de Ulloa, P.** 1994. Biología e impacto económico de las hormigas. *Palmas* **15** (4): 25-30.
- Chacón de Ulloa, P.** 1998. Introducción de la hormiga loca en Colombia. En: *Informe Nacional sobre el estado de la biodiversidad. Causas de Pérdida de la Biodiversidad*. Chaves, M.E. & Arango, N. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, 99-100 p.
- Chacón de Ulloa, P.** 2003a. Biología Reproductiva de *Wasmannia auropunctata* (R.) (Hymenoptera: Formicidae). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* **27** (104): 441-447.
- Chacón de Ulloa, P.** 2003b. Hormigas urbanas. En: *Introducción a las hormigas de la región Neotropical*. Fernández, F. (ed.). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá. 424 p.
- Chacón de Ulloa, P., Baena, M. L. & Aldana, R. C.** 1994. Efecto de dos análogos de la hormona juvenil, fenoxycarb y metopreno, sobre la hormiga loca *Paratrechina fulva* (Hymenoptera: Formicidae). *Revista Colombiana de Entomología* **20** (3): 193-198.
- Chacón de Ulloa, P., Baena, M. L., Bustos, J., Aldana, R. C. & Gamboa, M.** 1996. Fauna de hormigas del departamento del Valle del Cauca. En: *Insectos de Colombia. Estudios escogidos*. Andrade, G. Amat-García, G. Fernández, F. (eds.). Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colección Jorge Álvarez Llenar Número 10. Coedición con el Centro Editorial Javeriano. Bogotá, Colombia. 413-451 p.
- Chacón de Ulloa, P., Bustos, J., Aldana, R. C. & Baena, M. L.** 2000. Control de la hormiga loca, *Paratrechina fulva* (Hymenoptera: Formicidae) con cebos tóxicos en la Reserva Natural Laguna de Sonso (Valle, Colombia). *Revista Colombiana de Entomología* **26** (3-4): 151-156.
- Chacón de Ulloa, P. & Armbrecht, I.** 2006. Las hormigas del Bosque seco Tropical. En: *Informe sobre el avance en el conocimiento y la información de la biodiversidad 1998-2004*. Chávez, M. E. & Santamaría, M. (eds.). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá. 459 p.
- Chacón de Ulloa, P., Jaramillo, G. I. & Lozano, M. M.** 2006. Hormigas urbanas en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* **30** (116): 435- 441.
- Chacón de Ulloa, P., Armbrecht, I. & Lozano-Zambrano.** 2008. Aspectos de la ecología de hormigas cazadoras en bosques secos colombianos. En: *Sistemática, biogeografía y conservación de las hormigas cazadoras de Colombia*. Lozano-Zambrano, F., Fernández, F., Jiménez, E. & Arias, T. (eds.). Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D. C. Colombia. 617 p.
- Chacón de Ulloa, P. & Achury, R.** 2011. The introduced big-headed ant *Pheidole megacephala* Forel in southern Colombia. En: *Proceeding of the 7th International Conference on Urban Pests*. (Robinson, W. H. & De Carvalho-Campos, A. E. (eds.). Ouro Preto, Brazil. 417 p.
- Chacón de Ulloa, P., Osorio, A. M., Achury, R. & Bermúdez, C.** 2012. Hormigas (Hymenoptera: Formicidae) del bosque seco tropical de la cuenca alta del río Cauca (Colombia). *Biota Colombiana* **13** (2): 165-181.
- Chacón de Ulloa, P., Ramírez, L. & Rodríguez, M.** 2013. Capítulo Colombia. En: *Ecología Urbana: Experiencias en América Latina*. Ortega, R. & McGregor-Fors, I. (eds.). Instituto de Ecología, México. 130 p.

- Chacón de Ulloa, P., Valdés-Rodríguez, S., Hurtado-Giraldo, A. & Pimienta, M. C.** 2014. Hormigas arbóreas del Parque Nacional Natural Gorgona (Colombia). *Revista de Biología Tropical* **62** (Sup. 1): 227-287.
- Chaves, M. C.** 2003. Riqueza y composición de especies de la comunidad de hormigas del suelo (Hymenoptera: Formicidae) en un gradiente espacial bosque-borde-matriz de pastizal. Tesis de pregrado. Universidad del Valle, Cali. Colombia. 65 p.
- Chaves, M. C., Chacón de Ulloa, P. & Lozano-Zambrano, F.** 2008. Riqueza y rareza de hormigas cazadoras en el gradiente bosque-borde-pastizal de un fragmento de bosque subandino (Quindío, Colombia). En: *Sistemática, biogeografía y conservación de las hormigas cazadoras de Colombia*. Lozano-Zambrano, F., Fernández, F., Jiménez, E. & Arias, T. (eds.). Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D. C. Colombia. 617 p.
- Fernández, F.** 2002. New ant records for Colombia and South America Hymenoptera Formicidae. *Revista Colombiana de Entomología* **28** (2): 215.
- Fernández, F. (Ed.)**. 2003. Introducción a las hormigas de la región neotropical. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá D. C. Colombia. 398 p.
- Fernández, F. & Sendoya, S.** 2004. Lista de las hormigas neotropicales. *Biota Colombiana* **5** (1): 3-109.
- García, R., Armbrecht, I., Ulloa-Chacón, P.** 2001. Staphylinidae (Coleoptera): composición y mirmecofilia en bosques secos relictuales de Colombia. *Folia Entomológica Mexicana* **40** (1): 1-10.
- García, R. & Chacón de Ulloa, P.** 2005. Estafilínidos (Coleoptera: Staphylinidae) en fragmentos de bosque seco del valle geográfico del río Cauca. *Revista Colombiana de Entomología* **31** (1): 43-50.
- Guerrero, R. J. & Sanabria, C.** 2012. The first record of the genus *Gracilidris* (Hymenoptera: Formicidae: Dolichoderinae) from Colombia. *Revista Colombiana de Entomología* **37** (1): 159-161.
- Hoekstra, J., Boucher, T., Ricketts, T. & Roberts, C.** 2005. Confronting a biome crisis: Global disparities of habitat loss and protection. *Ecology Letters* **8**: 23-29.
- Hölldobler, B. & Wilson, E. O.** 1990. The ants. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts. 732 p.
- Janzen, D.** 1988. Tropical dry forests. The most endangered major tropical ecosystem. In: *Biodiversity*. Wilson, E. O. (ed.). National Academy of Sciences, Smithsonian Institution. Washington. 538 p.
- Jaramillo, G. I. & Chacón de Ulloa, P.** 2003. La hormiga fantasma *Tapinoma melanocephalum* (Hymenoptera: Formicidae): fecundidad de reinas y desarrollo de colonias experimentales. *Revista Colombiana de Entomología* **29** (2): 227-230.
- Jones, T. H., Woscichowski, T. J., Snelling, R., Torres, J. A., Chacón, P. & Devries, P. J.** 1999. Dialkylpyrrolidines from the ants *Megalomyrmex cyendyra* B. and *M. latreille* E. *Caribbean Journal of Science* **35** (3-4): 310-311.
- López, M. P., Arcila, A. M. & Chacón de Ulloa, P.** 2008. Ausencia del parasitoide *Orasema minutissima* en poblaciones de la hormiga *Wasmannia auropunctata* del sur occidente de Colombia. *Bol Mus Ent Universidad Valle* **9** (1): 17-21.
- Lozano-Zambrano, F. H., Ulloa-Chacón, P. Armbrecht, I.** 2009. Hormigas: relaciones especies-área en fragmentos de bosque seco tropical. *Neotropical Entomology* **38** (1): 44-54.
- Majer, J. D.** 1983. Ants: Bio-indicators of minesite rehabilitation, land use and land conservation. *Environmental Management* **7**: 375-383.
- Medina, C. A., Chacón de Ulloa, P. & Lapointe, S.** 1993. Fauna de hormigas en pasturas introducidas y sabana nativa, Carimagua, Llanos Orientales de Colombia. *Revista Colombiana de Entomología* **19** (4): 143-150.
- Medina, C. A.** 1994. Nidificación y patrones de distribución espacial de nidos de hormigas en una sabana tropical, Carimagua: Llanos Orientales de Colombia. *Bol Mus Ent. Universidad Valle* **2** (1,2): 31-42.
- Medina, C. A.** 1995. Hormigas depredadoras de huevos de salivazo de los pastos *Aeneolamia varia* (Hemiptera: Cercopidae) en pasturas de *Brachiaria*, en los Llanos Orientales de Colombia. *Bol Mus Ent Universidad Valle* (1): 1-13.
- Montoya, J. P., Chacón de Ulloa P. & Manzano M. R.** 2006. Caracterización de nidos de la hormiga arriera *Atta cephalotes* (Hymenoptera: Myrmicinae) en Cali (Colombia). *Revista Colombiana de Entomología* **32** (2): 151-158.
- Olaya, L. A., Chacón de Ulloa, P. & Payán, A.** 2005. Hormigas (Hymenoptera: Formicidae) en centros hospitalares del Valle del Cauca como vectores de patógenos nosocomiales. *Revista Colombiana de Entomología* **31** (2): 183-187.
- Ramírez, M., Chacón de Ulloa, P., Armbrecht, I. & Calle, Z.** 2001. Contribución al Conocimiento entre plantas, hormigas y homópteros en bosques secos de Colombia. *Caldasia* **23** (2): 523-536.
- Sanabria-Blandón, M. C. & Chacón de Ulloa, P.** 2009. Hormigas como plagas potenciales en tres criaderos de mariposas del suroccidente de Colombia. *Acta Agronómica* **58** (1): 47-52.
- Sanabria-Blandón, M. C.** 2011. Ensamblaje de hormigas del suelo en ventanas productivas del piedemonte amazónico colombiano. Tesis de maestría, Universidad del Valle. Cali, Colombia. 89 p.
- Sanabria-Blandón, M. & Achury, R.** 2011. Hormigas legionarias (Formicidae: Ecitoninae) en sistemas productivos de Caquetá (Colombia). *Acta biológica Colombiana* **16** (1): 219-224.
- Sanabria-Blandón, M.C. & Chacón de Ulloa, P.** 2011. Hormigas cazadoras en sistemas productivos del piedemonte amazónico colombiano: diversidad y especies indicadoras. *Acta Amazonica* **41** (4): 503-512.

- Sanabria, C., Chacón, P., Rodríguez, E. A. & Lavelle, P.** 2012. Soil ants as indicators of provision of ecosystem services in production system of the Eastern plains of Colombia. En: XVI Congreso colombiano de la ciencia del suelo "La Ciencia del Suelo al Servicio de la Sociedad y del Ambiente". Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo. Riohacha, Colombia. 611 p.
- Santamaría, C., Armbrrecht, I. & Lachaud, J. P.** 2009. Nest distribution and food preferences of *Ectatomma ruidum* (Hymenoptera: Formicidae) in shaded and open cattle pastures of Colombia. *Sociobiology* **53** (2): 1-25.
- Ulloa-Chacón, P. & Jaramillo, G.** 2003. Effects of boric acid, fipronil, hydramethylnon and diflubenzuron on colonies of the ghost ants (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology* **96** (3): 856-862.
- Valdés-Rodríguez, S., Chacón de Ulloa, P. & Armbrrecht, I.** 2014. Riqueza de hormigas del suelo en el Parque Nacional Natural Gorgona, Pacifico colombiano. *Revista de Biología Tropical* **62** (Sup 1): 265-276.
- Ward, P. S.** 2007. Phylogeny, classification, and species-level taxonomy of ants (Hymenoptera: Formicidae). *Zootaxa* **1668**: 549-563.
- Zabala, G. A., Gutiérrez, C. & Chacón de Ulloa, P.** 2008. Biogeografía provincial: ponerofauna del Valle del Cauca. En: *Sistemática, biogeografía y conservación de las hormigas cazadoras de Colombia*. Lozano-Zambrano, F., Fernández, F., Jiménez, E. & Arias, T. (eds.). Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D. C. Colombia. 617 p.
- Zabala, G. A., Arango, L. M. & Chacón de Ulloa.** 2013. Diversidad de hormigas (Hymenoptera: Formicidae) en un paisaje cafetero de Risaralda, Colombia. *Revista Colombiana de Entomología* **39** (1): 141-149.

Sinopsis de la familia Myrtaceae y clave para la identificación de los géneros nativos e introducidos en Colombia

Carlos Parra-O.

Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Resumen

Se presenta una sinopsis taxonómica de la familia Myrtaceae en Colombia que incluye los géneros nativos e introducidos en el país. Se analiza la diversidad de la familia en términos de la riqueza de especies, la distribución geográfica y altitudinal y la representatividad en las regiones naturales del país. Se describen los caracteres morfológicos que permiten diferenciar los géneros, así como los caracteres diagnósticos de cada uno, la distribución geográfica y una estimación preliminar del número de especies de estos. Se concluye con una clave para la identificación de los géneros de la familia en Colombia.

Palabras clave: Colombia, *Calyptanthes*, *Eugenia*, flora de Colombia, *Myrcia*, Myrtaceae.

Synopsis of the plant family Myrtaceae and key for the identification of the native and introduced genera in Colombia

Abstract

A taxonomic synopsis of Myrtaceae in Colombia is presented, including all native and introduced genera of the family growing in the country. The family diversity is analyzed in terms of species richness, geographic and altitudinal distribution, and representativeness in the country's natural regions. Morphological characters that facilitate differentiation of the genera present in the country are described with information on diagnostic characters, geographic distribution, and a preliminary estimate of the number of species for each genus. A key to separate the genera in Colombia is also given.

Key words: *Calyptanthes*, Colombia, *Eugenia*, flora of Colombia, *Myrcia*, Myrtaceae.

Introducción

En la flora nativa colombiana la familia Myrtaceae es reconocida por su presencia en todas las formaciones vegetales y en todo el gradiente altitudinal del país. Con base en estimativos del posible número de angiospermas en Colombia (23.089 especies; **Bernal, et al.**, 2007), y teniendo en cuenta que en nuestro país existen entre 160 y 180 especies de Myrtaceae (datos preliminares), la familia representa entre el 0,7 y el 0,8 % de las plantas angiospermas en el territorio nacional. A pesar de este bajo porcentaje, en áreas como la Amazonia colombiana, específicamente en el Parque Nacional Natural Amacayacu, las mirtáceas se encuentran entre las 15 familias de plantas vasculares más diversas (**Rudas & Prieto**, 2005). Igualmente, en las franjas de páramo de los macizos de Chingaza y Sumapaz, las mirtáceas están entre las 15 familias con mayor número de especies y de géneros (**Rangel-Ch.**, 2000). En diversos estudios taxonómicos de Myrtaceae en Colombia llevados a cabo en los últimos quince años se han encontrado interesantes

endemismos en especies de *Calyptanthes* Sw., *Myrcia* DC. ex Guill. y *Myrcianthes* O. Berg (**Parra-O.**, 2001, 2002, 2004a, 2012), y se ha registrado el redescubrimiento de un género nativo recolectado en el país una sola vez hace más de 140 años (**Parra-O.**, 2003).

Los trabajos taxonómicos en Myrtaceae de Colombia son escasos y se han orientado a describir nuevas especies (**Parra-O.**, 2001, 2002, 2004a, 2011a, 2012, 2013), a elaborar listados regionales (**Parra-O.**, 2004b, 2011b) y a documentar nuevos registros o registros corológicos interesantes (**Parra-O.**, 2003, 2004c). Desde el punto de vista taxonómico, la mayor dificultad para estudiar las mirtáceas es que en la mayoría de las ocasiones debe contarse con flores o frutos para poder determinar los especímenes a nivel de género. Además, algunos de los caracteres clave para delimitar

Correspondencia:

Carlos Parra-O., caparrao@unal.edu.co

Recibido: 6 de febrero de 2014

Aceptado: 1 de mayo de 2014

géneros de Myrtaceae, especialmente los relacionados con la morfología del embrión, son de difícil interpretación y pocas veces se explican en los tratamientos taxonómicos de las floras locales. Si bien existen tratamientos taxonómicos y otras publicaciones que permiten identificar los géneros de Myrtaceae presentes en Colombia (Landrum & Kawasaki, 1997; McVaugh, 1956, 1958, 1963, 1968), varios de estos trabajos fueron elaborados para Myrtaceae de otros países e incluyen taxones de la familia que no están en nuestro país. Por ejemplo, el excelente trabajo de Landrum & Kawasaki (1997), que estudia la composición genérica de Myrtaceae en el Brasil, incluye entre los géneros de ese país a siete que no crecen naturalmente ni en forma cultivada en Colombia.

En el momento no se dispone del tratamiento taxonómico de Myrtaceae ni de ninguno de los géneros de la familia que crecen en Colombia. El objetivo de este trabajo es presentar una sinopsis de los géneros de Myrtaceae nativos e introducidos en el país, precisando los caracteres morfológicos que permiten diferenciarlos entre sí. Se incluye, igualmente, una clave genérica y una estimación preliminar del número de especies de cada uno de los géneros de Myrtaceae presentes en el país.

Consideraciones generales sobre la familia Myrtaceae en Colombia

En Colombia existen 24 géneros y 165 especies de la familia Myrtaceae. De estos, nueve géneros (*Acca* O. Berg, *Corymbia* K. D. Hill & L. A. S. Johnson, *Eucalyptus* L'Hér., *Leptospermum* J. R. Forst. & G. Forst, *Melaleuca* L., *Metrosideros* Banks ex Gaertn., *Myrtus* L., *Pimenta* Lindl., *Syzygium* P. Brown ex Gaertn.) y 26 especies son introducidos. Las especies nativas de Myrtaceae pertenecen a 15 géneros (*Calycolpus* O. Berg, *Calycorectes* O. Berg, *Calyptranthes*, *Campomanesia* Ruiz & Pav., *Eugenia* L., *Marlierea* Cambess., *Myrcia*, *Myrcianthes*, *Myrciaria* O. Berg, *Myrrhinium* Schott, *Myrteola* O. Berg, *Plinia* L., *Pseudanmomis* Kausel, *Psidium* L., *Ugni* Turcz.) y comprenden en total 139 especies, de las cuales solo catorce son endémicas; seis de estas especies endémicas pertenecen a *Calyptranthes*, lo que corresponde a un 26 % de las especies del género presentes en el país. El género de Myrtaceae con el mayor número de especies endémicas del país es *Calyptranthes* (seis especies), aunque este número puede estar sobreestimado debido a la falta de estudios taxonómicos más detallados en géneros como *Eugenia* y *Myrcia*; la mayor parte de las publicaciones taxonómicas en Myrtaceae colombianas se ha enfocado en *Calyptranthes* (Parra-O., 2001, 2002, 2004a, 2004c). *Myrcia* y *Eugenia* son los géneros con mayor número de especies endémicas, con cuatro, seguido de *Calyptranthes*, con tres.

Eugenia es el género más diverso entre las Myrtaceae colombianas, con 42 especies, seguido de *Myrcia*, con 27 especies, y de *Calyptranthes*, con 23 especies. La familia

tiene una amplia distribución altitudinal en el territorio nacional, con excepción de *Marlierea* y *Pseudanmomis* (especies restringidas a altitudes por debajo de los 1.000 m), y *Myrteola* y *Ugni* (especies restringidas a altitudes por encima de los 2.200 m). El 52 % de las especies nativas de Myrtaceae en Colombia se distribuye exclusivamente entre los 0 y los 1.000 metros y tan sólo cerca del 10 % es exclusivo de altitudes entre los 2.000 y 3.500 metros. La mayoría de las mirtáceas nativas del país crecen en las zonas de vida tropical y subandina, aunque existen géneros casi exclusivos (e.g., *Myrcianthes*) o exclusivos (e.g., *Myrteola*, *Ugni*) de las franjas andinas y del límite con el páramo.

En las regiones naturales de Colombia, las mirtáceas nativas están mejor representadas en la Amazonia (65 especies), seguida por la región Andina (43 especies) y por la Orinoquia (24 especies). Las regiones de la Amazonia y la Pacífica son las más interesantes en Colombia para el estudio de las mirtáceas nativas, debido al elevado número de especies de la familia en la primera de dichas regiones y al mayor número de endemismos en la segunda. Se estima que dentro de géneros como *Eugenia* y *Myrcia* existen al menos 0,5 veces más especies nativas sin describir, en comparación con el número de especies reconocidas para el país. Posiblemente, el número total de plantas Myrtaceae nativas del país se incrementará a unas 180 especies cuando se complete la revisión taxonómica de géneros como *Eugenia* y *Myrcia*.

Hoy se estima que hay un gran riesgo de que varias especies de *Eucalyptus* introducidas en nuestro país (e.g., *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., *Eucalyptus globulus* Labill.) se conviertan en invasoras (Baptiste, M., et al., 2010), o que ya lo sean en ecosistemas naturales como los humedales de la Sabana de Bogotá, debido a sus diversos y exitosos tipos de reproducción, y a que compiten ventajosamente con las especies nativas por recursos como los nutrientes, el agua y la luz (Díaz-Espinosa, et al., 2012).

Caracteres morfológicos de las especies de Myrtaceae colombianas a nivel de familia

Las especies de Myrtaceae nativas de Colombia son fáciles de reconocer vegetativamente porque poseen hojas simples, opuestas y con glándulas translúcidas inmersas en la lámina foliar; cuando se estruja la lámina foliar, las glándulas se rompen y liberan compuestos fragantes. Además, la lámina foliar casi siempre presenta un nervio marginal al cual se unen los nervios secundarios e intersecundarios. La combinación de todos estos caracteres es prácticamente exclusiva de nuestras especies nativas de Myrtaceae, las cuales no poseen estípulas ni cicatrices interpeciolares como se observa en otras familias de plantas nativas colombianas con hojas simples y opuestas.

Landrum & Kawasaki (1997) analizaron las familias de angiospermas que pueden confundirse con Myrtaceae y los

caracteres que permiten diferenciar a esas familias de las de Myrtaceae nativas de Brasil. Algunos géneros o especies de estas familias (Clusiaceae, Hippocrateaceae, Loranthaceae, Lythraceae, Malpighiaceae, Melastomataceae, Monimiaceae, Rubiaceae, Rutaceae y Vochysiaceae), también podrían confundirse en nuestro país con especies de la familia Myrtaceae. En los herbarios colombianos es común que se encuentren mal determinados, como supuestas Myrtaceae, especímenes de *Mouriri* (Melastomataceae) y de *Alzatea verticillata* Ruiz & Pav. (Alzateaceae). *Mouriri* y *Alzatea*, aunque presentan hojas opuestas, no poseen glándulas translúcidas, que sí son propias de Myrtaceae. En cuanto a los caracteres reproductivos, *Mouriri* se diferencia claramente de las mirtáceas por presentar pocos estambres con dehiscencia poricida y frutos con canales verticales en la superficie interna de los restos del tubo del hipanto (Landrum & Kawasaki, 1997). A su vez, *Alzatea* siempre presenta hojas coriáceas y subsésiles, inflorescencias en panículas, flores con cinco a seis lóbulos del cáliz, corola ausente, cinco estambres alternos a los lóbulos de la corola, ovario súpero y frutos en cápsulas loculicidas (Graham, 2004); ninguna de las mirtáceas nativas presenta solo cinco estambres, ovario súpero ni frutos en cápsulas.

Si bien los caracteres vegetativos son útiles para reconocer con precisión una mirtácea a nivel de familia, estos mismos caracteres son prácticamente inservibles para determinar el mismo espécimen a nivel de género. Los caracteres vegetativos de los géneros de Myrtaceae son convergentes y, en

algunos casos, se encuentran asociados a adaptaciones particulares al hábitat. Un notorio ejemplo de convergencia de ciertos caracteres vegetativos entre géneros colombianos de Myrtaceae se presenta en las especies de *Myrcianthes* y *Calyptanthes lozanoi* C. Parra-O. (Figura 1). En Colombia, la mayoría de especies de *Myrcianthes* se encuentra en la franja andina, por encima de los 2.000 metros, principalmente en el bosque andino y altoandino, así como en el subpáramo y el páramo. En estas especies de *Myrcianthes* es común observar el desarrollo de una corteza engrosada de color grisáceo o amarillento en las ramitas jóvenes, y de hojas con láminas foliares coriáceas con nerviación prominente, especialmente en el envés; en general, las hojas de estas especies tienen menor tamaño que las de las mirtáceas que crecen en tierras bajas. Todas estas características están presentes en *Calyptanthes lozanoi* var. *lozanoi*, que es endémica de la Sierra Nevada de Santa Marta y crece entre los 2.000 y los 3.000 metros (Parra-O., 2001). En la revisión taxonómica inédita de *Myrcianthes* (Grifo, 1992), unos especímenes fueron determinados y citados erróneamente como *Myrcianthes leucoxylla* (Ort.) McVaugh; esos mismos especímenes fueron designados posteriormente como el holotipo y paratipo de *C. lozanoi* (Parra-O., 2001).

Con relación a las especies de la familia introducidas en nuestro país, estas presentan hojas simples, con glándulas translúcidas inmersas en la lámina foliar, alternas (*Corymbia*, *Eucalyptus*, *Leptospermum*, *Melaleuca*) u opuestas (*Acca*, *Eucalyptus*, *Metrosideros*, *Myrtus*, *Pimenta* y *Syzygium*).



Figura 1. Convergencia de caracteres vegetativos entre géneros de Myrtaceae colombianos. a) *Calyptanthes lozanoi* C. Parra-O. subsp. *lozanoi*. (Parra-O. 784, COL); b) *Myrcianthes leucoxylla* (Ort.) McVaugh (Parra-O. 777, COL). Escala = 1 cm.

Es de anotar que la mayoría de especies de *Eucalyptus* presentan hojas alternas en estado adulto, mientras que en estado juvenil, o en los retoños, las hojas son opuestas, observándose en ocasiones hojas alternas y opuestas en un mismo individuo.

Clasificaciones taxonómicas supragenéricas en Myrtaceae neotropicales nativas con frutos en baya

En las clasificaciones taxonómicas clásicas (Berg, 1855-1856, 1857-1859) las subtribus y los géneros dentro de las mirtáceas neotropicales con frutos en baya se delimitaron con base en caracteres reproductivos, tales como el tipo de cáliz (y su apertura durante la antesis), el número de sépalos, el tipo de inflorescencia, el número de óvulos y, uno de los más importantes para Berg, la relación y el tamaño de los cotiledones, el hipocótilo y la radícula en el embrión. Este último conjunto de caracteres del embrión fue empleado por Berg para delimitar tres subtribus en la tribu Myrteae DC. (Myrciinae, Myrtinae y Eugeniinae), dentro de las cuales se clasificaron todos los géneros nativos de mirtáceas neotropicales con frutos en baya. A pesar de seguir esta división de subtribus para el tratamiento de Myrtaceae de la flora del Perú (McVaugh, 1958), posteriormente el mismo McVaugh (1968) consideró que tales subtribus eran grupos artificiales. Más que proponer nuevas categorías taxonómicas supragenéricas, McVaugh (1968) delimitó seis grupos (a los que no asignó ningún rango taxonómico), que representaban “líneas de especialización” en la evolución de los géneros de Myrtaceae de frutos con baya en el continente americano. A pesar de las críticas de McVaugh (1968) a las subtribus de Berg, estas siguieron empleándose en diferentes sinopsis y tratamientos taxonómicos (e.g., Landrum, 1986; Landrum & Kawasaki, 1997), inclusive por el mismo McVaugh (McVaugh, 1969). Así mismo, en la delimitación de la mayoría de nuevos géneros de Myrtaceae suramericanos (Landrum, 1990, 1991; Salywon & Landrum, 2007), las referencias a las subtribus de Berg son inevitables y tales géneros fueron asignados a una de sus tres subtribus. Sin embargo, Snow, *et al.*, (2003) decidieron abandonar la clasificación de las tres subtribus por considerarla arquetípica y producto del pensamiento tipológico en la taxonomía de la familia. Wilson, *et al.*, (2005) reconocieron a la tribu Myrteae como un grupo monofilético, pero no a las subtribus de Berg. Además, en un género de Myrtaceae recientemente descrito en Brasil (*Algrizea* Proença & NicLugh.; Proença, *et al.*, 2006), se observó que el embrión posee características exclusivas que no permiten que sea ubicado en ninguna de las tres subtribus de Berg. Por otra parte, con base en estudios filogenéticos de los caracteres moleculares, Lucas, *et al.*, (2007) concluyeron que las subtribus delimitadas por Berg no son monofiléticas. Basados en un análisis filogenético y en el estudio de caracteres morfológicos, estos autores propusieron siete subtribus informales dentro de la tribu

Myrteae; seis de estas subtribus informales contienen la mayoría de los géneros de Myrtaceae con frutos en baya que crecen espontáneamente en Suramérica.

Caracteres morfológicos importantes para el reconocimiento de los géneros de Myrtaceae en Colombia

A continuación se hace un análisis de los caracteres relevantes para delimitar los géneros en las Myrtaceae colombianas. Es necesario anotar que los géneros se caracterizan por un conjunto de caracteres, y ninguno de ellos, por sí solo, sirve para diferenciar un género de los otros. Además, los estados de los caracteres aquí mencionados como propios de un género, solo hacen referencia a la variación encontrada dentro de las especies de los géneros que crecen en Colombia. Por ejemplo, la única especie de *Campomanesia* que crece en Colombia tiene el cáliz con sépalos libres en el botón floral (ver la sinopsis del género abajo), pero existen especies de este género que presentan sépalos fusionados en el botón antes de la antesis (Landrum, 1986), y que no crecen de forma espontánea ni son cultivadas en nuestro país.

Inflorescencia

Las mirtáceas que crecen en Colombia poseen desde flores solitarias hasta inflorescencias muy ramificadas. En las inflorescencias básicas de las especies nativas de Myrtaceae colombianas existen dicasios (simples o compuestos; Figuras 2a, 2b), racimos propiamente dichos (Figura 2c), fascículos (Figura 2d), glomérulos (Figura 2e) y panículas (Figura 2f).

De acuerdo con McVaugh (1956) y Landrum & Kawasaki (1997), en Myrtaceae existen modificaciones de las inflorescencias en racimo con relación al desarrollo del eje central. Aunque el eje central existe en algunas inflorescencias racemosas, este se acorta notoriamente y puede ser más corto incluso que los pedicelos florales; en estos casos se puede definir la inflorescencia como cortamente racemosa. En algunos casos, el eje central del racimo es muy corto y se observan tan solo dos flores que parecen estar una al lado de la otra, como en algunas especies de *Calycolpus*. En los casos más extremos, el eje central del racimo se reduce tanto que las flores ya no comparten un eje en común, sino que se originan de un mismo punto en una ramita, y la inflorescencia se denomina fascículo (cuando las flores son pediceladas; Figura 2d) o glomérulo (cuando las flores son sésiles, Figura 2e).

En las mirtáceas nativas colombianas existen variaciones importantes entre las inflorescencias descritas arriba. Por ejemplo, algunos géneros nativos como *Myrrhinium* poseen inflorescencias particulares descritas como dicasios simples agregados en racimos cortos (Parra-O., 2003; véase su figura 1), que se desarrollan en ejes de ramas maduras desprovistos de hojas, aparentando ser caulinares (Weberling, 1988). En algunas especies de *Myrcianthes* colombianas (e.g., *M. karsteniana* (Berg) McVaugh) los dicasios compuestos

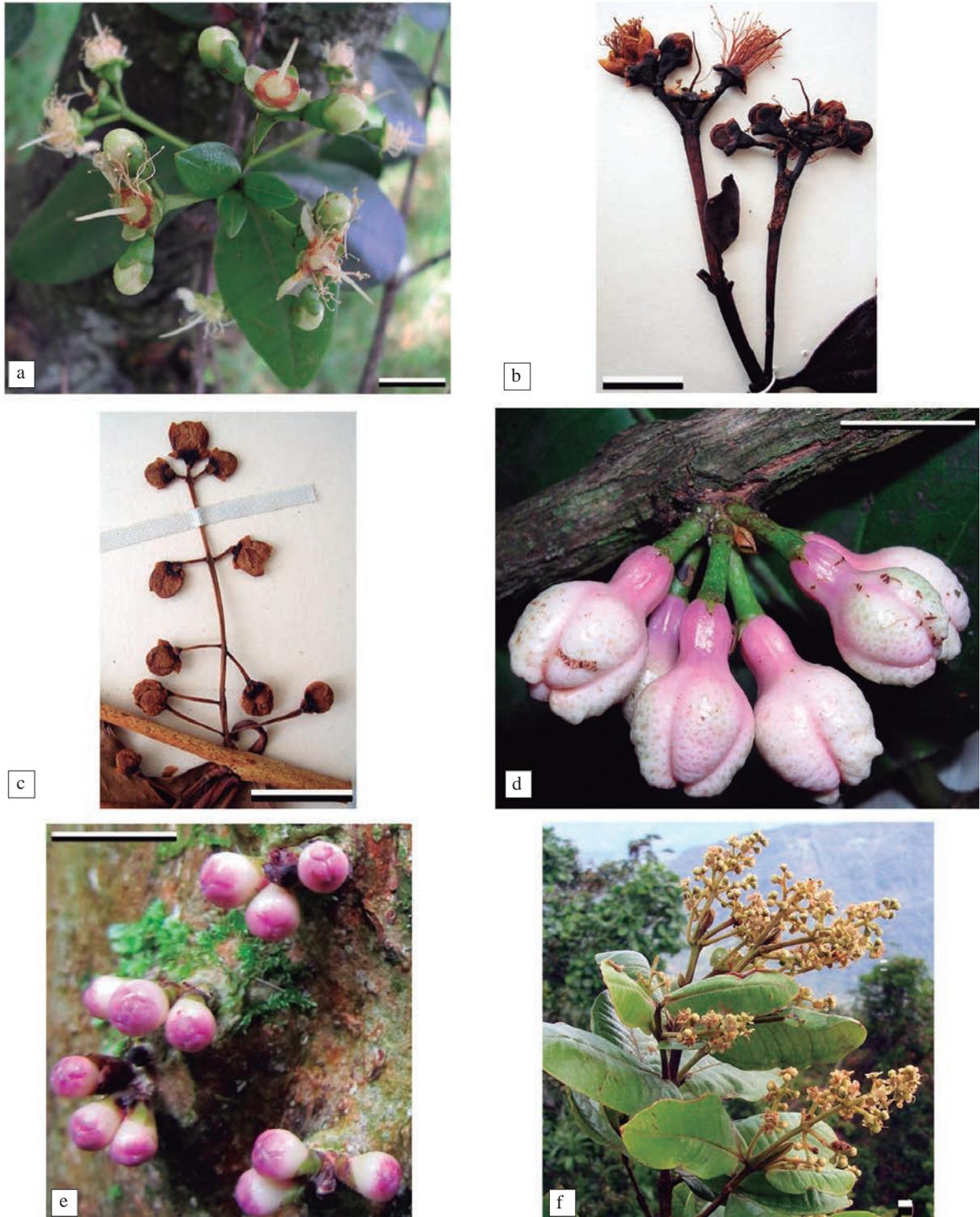


Figura 2. Inflorescencias básicas de las especies nativas de Myrtaceae colombianas. a) Diciasios simples (*Myrcianthes* sp., Parra-O. 794, COL); b) Diciasios compuestos [*Myrcianthes rhopaloides* (Kunth) McVaugh, González et al. 1684, COL]; c) Racimos propiamente dichos (*Eugenia florida* DC., Uribe 1045, COL); d) Fascículos (*Eugenia* sp., Parra-O. 720, COL); e) Glómérulos (*Plinia* sp., Raz 1309, COL. Foto L. Raz); f) Panículas (*Myrcia* sp., Parra-O. 781, COL). Escala = 1 cm

forman nuevos ejes florales (ramas accesorias *sensu* **Weberling**, 1988) en las ramificaciones de segundo orden y lucen como panículas irregulares (=dicasios irregularmente ramificados *sensu* **Grifo**, 1992). En *Pseudanmomis* se observa frecuentemente que la inflorescencia básica, un dicasio simple, puede desarrollar flores adicionales que la hacen ver como una umbela; en estos casos, generalmente ambos tipos de inflorescencia (dicasios e inflorescencias umbeloides) están presentes en un mismo individuo.

En los géneros y las especies nativas colombianas de Myrtaceae, las flores solitarias se presentan en algunas especies de *Calycolpus*, *Campomanesia*, *Eugenia*, *Myrcianthes* y *Psidium*, y de forma exclusiva en *Myrteola* y *Ugni*. Los dicasios son comunes en la mayoría de las especies de *Myrcianthes*, en *Pseudanmomis* (presentado también inflorescencias umbeloides, ver párrafo anterior), y en algunas especies de *Psidium*. Los racimos propiamente dichos se encuentran en *Campomanesia* y en algunas especies de *Eugenia* y *Psidium*; el racimo con un eje supremamente corto que porta solo dos flores es característico de *Calycolpus*. Los glomérulos son evidentes en *Plinia* y en algunas especies de *Myrciaria*; los fascículos se encuentran en *Calycorectes* y en algunas especies de *Eugenia* y de *Myrciaria*. *Calyptanthes*, *Marlierea* y *Myrcia* generalmente presentan panículas bien desarrolladas, en tanto que *Myrrhinium* posee inflorescencias en dicasios simples que se agregan en racimos cortos.

En los géneros y las especies de Myrtaceae introducidas en Colombia, *Leptospermum* y *Myrtus* poseen flores solitarias, *Melaleuca* presenta inflorescencias en espigas, *Syzygium* desarrolla racimos y panículas, y *Pimenta* posee panículas. *Corymbia* y *Eucalyptus* presentan inflorescencias particulares en las que la unidad básica de la inflorescencia es una umbela con cinco a siete flores (algunas veces la umbela es irregular), y varias de estas umbelas pueden disponerse en racimos o panículas de diferente longitud. *Metrosideros* tiene una inflorescencia compleja, definida como una inflorescencia compuesta que posee un eje principal a su vez ramificado en varios ejes secundarios, en los cuales los ejes secundarios terminan en cimas con tres flores (**Schmidt-Adam & Gould**, 2000). *Acca* presenta variación en la disposición de sus flores, pues puede presentar flores solitarias, inflorescencias en racimos muy cortos con solo dos flores o dicasios con tres flores y el eje principal muy corto.

Cáliz

En las Myrtaceae colombianas, las características del cáliz son muy importantes para diferenciar géneros nativos entre sí. El primer carácter que debe analizarse es el tipo de cáliz, para verificar si los sépalos se encuentran fusionados unos con otros en el botón floral (Figura 3a); si es así, este primer estado de carácter se denomina cáliz cerrado. En el segundo

estado de carácter los sépalos son libres (Figura 3b) y se denomina cáliz abierto. En caso de poseer cáliz cerrado, la fusión de los sépalos puede ser incompleta, casi completa o completa. Cuando existe la fusión completa de los sépalos es frecuente que así soldados formen una estructura en forma de capuchón (denominada caliptra) en la porción apical del botón floral; en estos casos, el botón floral se define como botón floral caliptrado. Esta caliptra puede presentar o no un apículo en su ápice; cuando este se presenta puede extenderse hasta un tercio de la longitud total del botón floral. El botón caliptrado presenta dos tipos de dehiscencia en la antesis; en el primero, la caliptra se desprende claramente como una unidad (Figura 3c), que puede caer durante la antesis o permanecer adherida al hipanto a lo largo de todo el desarrollo de la flor. El primer tipo de dehiscencia, típico de géneros de Myrtaceae nativos de Colombia como *Calyptanthes*, conduce a la formación de una cicatriz anular en la parte superior del fruto que la mayoría de las veces es fácil de distinguir (Figura 3d). Sin embargo, el fruto de *Myrciaria* O. Berg presenta una cicatriz similar, que no corresponde a la dehiscencia del cáliz durante la antesis sino a la de todo el hipanto (**Landrum & Kawasaki**, 1997). El género introducido *Corymbia* (con frutos capsulares) también presenta el cáliz fusionado en forma de caliptra. En el segundo tipo de dehiscencia del botón caliptrado, el cáliz fusionado no se desprende como una sola unidad sino que se rasga longitudinalmente en lóbulos irregulares o relativamente regulares (Figura 3e). Este tipo de dehiscencia es propia de géneros como *Marlierea* y, de hecho, es el único carácter que diferencia a este género de *Calyptanthes*. Algunas especies de *Psidium* que crecen en Colombia (e.g., *P. friedrichsthalianum* (O. Berg) Nied.), también presentan este tipo de dehiscencia. En géneros como *Calycorectes* y *Plinia* el cáliz está fusionado o parcialmente fusionado, y en el segundo, el cáliz también se rasga en lóbulos irregulares.

Aunque la presencia del cáliz cerrado en el botón floral parece ser convergente a nivel genérico y su uso ha sido criticado para delimitar géneros dentro de Myrtaceae (**Landrum**, 1984), en la práctica este carácter, conjuntamente con otros, permite la identificación de géneros como *Calyptanthes* y *Marlierea*. Cuando los especímenes carecen de flores y solo poseen frutos, con frecuencia se puede observar en su parte apical remanentes de los sépalos, los lóbulos, la caliptra, o cicatrices que permiten deducir el tipo de cáliz que la flor posea.

Entre los géneros y las especies nativas colombianas de Myrtaceae, *Calycolpus*, *Campomanesia*, *Eugenia*, *Myrcia*, *Myrcianthes*, *Myrciaria*, *Myrrhinium*, *Myrteola*, *Pseudanmomis*, y algunas especies de *Psidium* y *Ugni* se caracterizan por tener sépalos libres. Los sépalos libres son exclusivamente cuatro (*Eugenia*, *Myrciaria* y *Myrrhinium*) o exclusivamente cinco (*Calycolpus*, *Campomanesia* y *Psidium*). En la mayoría de especies de *Myrcia* hay cinco

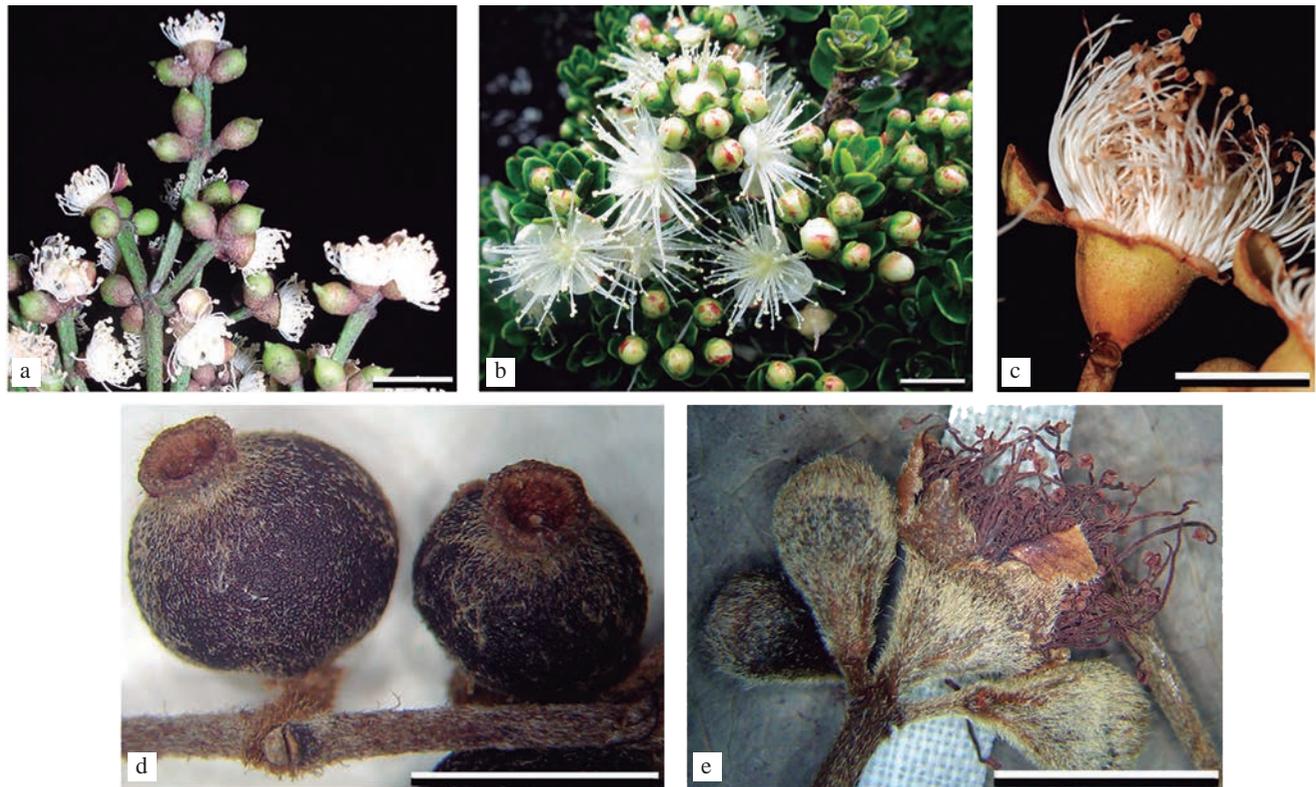


Figura 3. Características del cáliz en los géneros de Myrtaceae que crecen en Colombia. a) Cáliz cerrado, con los sépalos fusionados en los botones florales (*Calyptanthes* sp., Parra-O. 789, COL); b) Cáliz abierto, con los sépalos claramente diferenciados en los botones florales [*Myrcianthes myrsinoides* (Kunth) Grifo, Rodríguez-C. 2206, COL. Foto B. V. Rodríguez]; c) Antesis en la que el cáliz cerrado se desprende como una unidad en forma de caliptra (*Calyptanthes maxima* McVaugh, González & Isaza 699, COL. Foto M. F. González); d) Cicatriz anular en la parte superior del fruto producto del desprendimiento de la caliptra después de la antesis [*Calyptanthes chytraculia* (L.) Sw. var. *americana* McVaugh, Moreno 546, COL]; e) Antesis en la que el cáliz cerrado se desprende rasgándose longitudinalmente en lóbulos irregulares (*Marlierea spruceana* O. Berg, Prance et al. 2686, COL). Escala = 0.5 cm.

sépalos (algunas especies presentes en Colombia tienen sólo cuatro), mientras que en la mayoría de especies de *Myrcianthes* se presentan cuatro sépalos (una sola especie de este género en Colombia tiene individuos con cuatro, o con cinco sépalos). En ocasiones se presentan cuatro o cinco sépalos incluso en flores diferentes de un mismo individuo [*Myrteola* (generalmente cuatro, algunas veces cinco), *Pseudanmomis* (cuatro o cinco) y *Ugni* (generalmente cinco, algunas veces, cuatro)]. Por el contrario, *Calycorectes* O. Berg, *Calyptanthes*, *Marlierea*, *Plinia* y algunas especies de *Psidium* poseen botones con los sépalos fusionados, en los cuales la fusión es incompleta o casi completa (*Calycorectes* y *Plinia*), o totalmente completa con la formación de caliptra (*Calyptanthes*, *Marlierea* y algunas especies de *Psidium*). La caliptra en *Calyptanthes* se desprende como una sola unidad, mientras que en *Marlierea* y en algunas especies de *Psidium* se rasga en lóbulos irregulares o más o menos regulares. En cuanto a los géneros introducidos, *Corymbia* y *Eucalyptus* poseen cáliz cerrado con caliptra; *Acca*,

Leptospermum, *Melaleuca*, *Metrosideros*, *Myrtus*, *Pimenta* y *Syzygium* presentan sépalos libres, con cuatro sépalos (*Acca* y *Syzygium*), con cinco (*Leptospermum*, *Melaleuca*, *Metrosideros* y *Myrtus*) o entre cuatro o cinco (*Pimenta*).

Fruto y embrión

Con relación a los frutos de las mirtáceas nativas colombianas, todos los géneros de Myrtaceae nativos del continente americano presentan frutos en baya, con excepción de *Tepualia* Griseb. (género monoespecífico nativo de Argentina y Chile).

De los géneros de Myrtaceae introducidos en nuestro país, cuatro presentan frutos en baya (*Acca*, *Myrtus*, *Pimenta* y *Syzygium*), mientras que cinco poseen frutos capsulares (*Corymbia*, *Eucalyptus*, *Leptospermum*, *Melaleuca* y *Metrosideros*).

Con relación al embrión, y como se mencionó anteriormente (véase el apartado “Clasificaciones taxonómicas supragenéricas en las Myrtaceae nativas neotropicales con frutos en baya”), un

conjunto de caracteres del embrión se utilizó como base de la delimitación de tres subtribus en la tribu Myrteae, subtribus que actualmente no se consideran como grupos monofiléticos. Para analizar los caracteres del embrión es necesario abrir el fruto, extraer la semilla y retirar cuidadosamente la testa; en el embrión es necesario identificar los cotiledones, el hipocótilo y la radícula, así como su tamaño y su relación.

En algunos embriones se pueden observar los cotiledones libres, foliáceos, contortuplicados, más anchos que el hipocótilo y rodeados por él; en estos casos, el hipocótilo y los cotiledones tienen aproximadamente la misma longitud (McVaugh, 1958; Landrum & Kawasaki, 1997; Figura 4a). Este tipo de embrión, denominado mircioide, definía a la subtribu Myrciinae de Berg (1855-1856, 1857-1859). En los

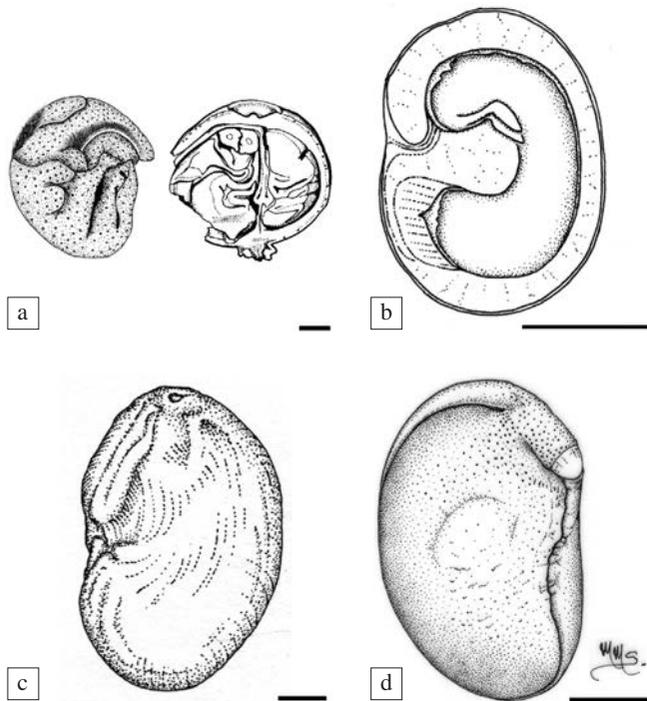


Figura 4. Tipo de embrión en las semillas de los géneros nativos de Myrtaceae colombianas. a) A la izquierda, semilla sin testa, en la que se observa el embrión mircioide; a la derecha, corte transversal del fruto en el que se observa el interior de dos semillas con los cotiledones contortuplicados, propios del embrión mircioide (*Calypttranthes buchenavioides* C. Parra-O., Parra-O., 2004a; *Calypttranthes lozanoi* C. Parra-O. var. *lozanoi*, Parra-O. 2001); b) Corte transversal de la semilla que muestra el embrión mirtoide con los cotiledones y el hipocótilo (*Psidium laruotteanum* Cambess., Parra-O. & Rodríguez 762, COL); c) Semilla sin testa en la que se observa el embrión eugenioide con los cotiledones totalmente fusionados (*Eugenia fernandez-alonsoi* C. Parra-O.; Parra-O., 2011a); d) Semilla sin testa en la que se observa el embrión eugenioide con los cotiledones separados y el hipocótilo evidente (*Myrcianthes* sp., Parra-O. 805, COL). Escala = 2 mm

géneros de Myrtaceae nativos de Colombia, dicho embrión es característico de algunos como *Calypttranthes*, *Marlierea* y *Myrcia*. Otros embriones presentan, por el contrario, los cotiledones angostos y de la misma longitud o mucho menores que el hipocótilo y, a veces, en forma de 'C' (McVaugh, 1958; Landrum & Kawasaki, 1997; fig. 4b); este embrión, llamado mirtoide, definía a la subtribu Myrtinae de Berg (1855-1856, 1857-1859), y es característico de los géneros nativos *Calycolpus*, *Campomanesia*, *Myrrhinium*, *Myrteola*, *Psidium* y *Ugni*, y de los géneros introducidos *Acca*, *Myrtus* y *Pimenta*.

El otro tipo de embrión que se observa en las mirtáceas colombianas es el denominado embrión eugenioide, que definía a la subtribu Eugeniinae de Berg (1855-1856, 1857-1859), y se caracteriza por un corto hipocótilo y unos cotiledones grandes plano-convexos que pueden estar separados o, por el contrario, estar parcial o completamente fusionados en una sola masa indistinguible del hipocótilo (McVaugh, 1958; Landrum & Kawasaki, 1997; Figura 4c, d). Este tipo de embrión se presenta en los géneros nativos *Calycorectes*, *Eugenia*, *Myrcianthes*, *Myrciaria*, *Plinia* y *Pseudanammis*, y en el género introducido *Syzygium*.

Para los demás géneros de Myrtaceae introducidos en Colombia (*Corymbia*, *Eucalyptus*, *Leptospermum*, *Melaleuca* y *Metrosideros*), los caracteres del embrión no se han usado de forma individual para caracterizar grupos supragenéricos que los incluyan, pero sí han tenido alguna relevancia para definir secciones, por ejemplo, dentro de *Eucalyptus* (Chippendale, 1988).

Genéros de Myrtaceae introducidos en Colombia

Las mirtáceas introducidas en Colombia pertenecen a nueve géneros, cinco de los cuales (*Corymbia*, *Eucalyptus*, *Leptospermum*, *Melaleuca* y *Metrosideros*) presentan frutos capsulares; los otros cuatro (*Acca*, *Myrtus*, *Pimenta* y *Syzygium*) poseen frutos en baya. La mayoría de estos géneros provienen de Australia, aunque también hay géneros de Europa, Asia, el Caribe y Suramérica.

Acca O. Berg

Género compuesto por tres especies nativas del Perú y del área comprendida entre el sureste brasileño y Uruguay (Landrum, 1986). En Colombia está representado solamente por *Acca sellowiana* (Berg) Burret, especie introducida y cultivada como planta frutal (feijoa) u ornamental. *Acca* no debe considerarse como un género naturalizado en Colombia, ya que su única especie no crece de forma espontánea y siempre está asociada a cultivos, granjas o áreas de ornato controladas por la mano del hombre. *A. sellowiana* se caracteriza por tener hojas opuestas con el envés grisáceo, flores solitarias, inflorescencias en racimos muy cortos con solo dos flores, o dicasios de eje principal muy corto con tres flores, pétalos

carinosos con margen fuertemente involuta de color rosado a púrpura por la haz, filamentos de los estambres de color rojo, frutos en baya con mesocarpio blancuzco y numerosas semillas con embrión mirtoide.

***Corymbia* K.D. Hill & L.A.S. Johnson**

Género de 113 especies que crecen principalmente en el norte de Australia, con algunas especies en Papua Nueva Guinea (Hill & Johnson, 1995). Aunque solía considerarse parte de *Eucalyptus*, en estudios recientes se establece su monofilia y su estatus genérico (Parra-O., et al., 2006, 2009). En Colombia existen tres especies introducidas que han sido utilizadas como árboles ornamentales, entre las que se destaca *Corymbia ficifolia* (F. Muell.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson, por sus flores vistosas con numerosos estambres de color rosado a rojizo. Las especies que crecen en Colombia se distinguen por presentar un exudado rojizo al hacer un corte en el tronco, hojas adultas alternas, botones florales caliptrados, inflorescencias en umbelas dispuestas a su vez en racimos o en panículas, pétalos blancos o rojizos y frutos capsulares urceolados.

***Eucalyptus* L'Her**

Este género está constituido por más de 600 especies, la mayoría de las cuales son nativas de Australia (Ladiges, et al., 2003). En Colombia se encuentran cerca de 10 especies introducidas que se usan como plantas ornamentales, medicinales o maderables (Pérez-Arbeláez, 1996). Las especies de este género cultivadas en Colombia se pueden reconocer por tener botones florales caliptrados, generalmente hojas adultas alternas (algunas opuestas), inflorescencias en umbelas y frutos capsulares globulares u ovoides.

***Leptospermum* J. R. Forst. & G. Forst**

Género de 79 especies que crecen en el sureste de Asia, Nueva Guinea, Australia y Nueva Zelanda (Thompson & Logan, 1991). En Colombia se encuentra una especie introducida que se cultiva para uso ornamental; esta especie se caracteriza por tener hojas alternas, coriáceas y casi sésiles, flores solitarias con cinco sépalos libres, con pétalos blancos a rojizos, numerosos estambres más cortos que los pétalos y frutos capsulares.

***Melaleuca* L.**

Este género posee cerca de 220 especies que crecen en Australia, Nueva Guinea y la región de Malasia (Wilson, 1991). En este artículo se sigue el criterio de Craven (2006) de que *Callistemon* R. Br. no tiene caracteres lo suficientemente estables para ser considerado como un género separado de *Melaleuca*, y que debe ser incluido en este. En Colombia se encuentran cinco especies introducidas que se cultivan como ornamentales, las cuales se reconocen por tener hojas alternas, inflorescencias en espiga con numerosas flores de

largos estambres de color rojo (de ahí que algunas especies se conocen comúnmente como “escobillón rojo” o “árbol del cepillo”), y frutos capsulares.

***Metrosideros* Banks ex Gaertn.**

Género con cerca de 50 especies que crecen principalmente en Nueva Zelanda, Nueva Caledonia, Hawai y Nueva Guinea, algunas pocas especies en islas distribuidas a lo largo del Pacífico y una sola en Suráfrica (Wright, et al., 2000; Mabberley, 2008). En Colombia se encuentra una especie introducida, la cual se cultiva como planta ornamental; se caracteriza por poseer hojas opuestas con el envés grisáceo, inflorescencia muy ramificada cuyos ejes secundarios terminan en cimas con tres flores, botones florales y sépalos con pubescencia grisáceo-verdosa, estambres de color rojo, estilos largos y frutos capsulares.

***Myrtus* L.**

Género compuesto por dos especies que crecen naturalmente en la región mediterránea y en el norte de África (Mabberley, 2008). En Colombia se encuentra una especie introducida, utilizada como planta ornamental, que presenta hojas opuestas con el ápice agudo, flores solitarias con largos pedicelos y con cinco sépalos libres, con pétalos blancos, numerosos estambres tan largos como los pétalos y frutos en baya cuyas semillas presentan embrión de tipo mirtoide.

***Pimenta* Lindl.**

Este género posee 15 especies que crecen de forma natural principalmente en el Caribe y Centroamérica, y una sola de ellas en el sureste de Brasil (Landrum, 1986). En Colombia existen dos especies, una de las cuales (*P. dioica* (L.) Merr.) se encuentra en las Islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina; es posible que *P. dioica* esté naturalizada en las Islas, aunque no existe evidencia sobre esto, por lo que en este trabajo se considera al género como introducido; *P. racemosa* (Mill.) J. W. Moore, la otra especie del género presente en Colombia, se cultiva en el territorio nacional continental. Estas especies se reconocen por sus hojas opuestas y aromáticas, inflorescencias en panículas, flores con cuatro o cinco sépalos libres, frutos en baya y semillas con embrión mirtoide.

***Syzygium* Gaertn.**

Con más de 1.000 especies que crecen en África, Asia y Australia (Chantaranothai & Parnell, 1994), *Syzygium* es uno de los géneros más diversos entre las mirtáceas. En Colombia está representado por cinco especies introducidas, las cuales se cultivan como árboles ornamentales o frutales (‘pomarrosos’). Por las mismas consideraciones mencionadas con respecto a *Acca* (ver arriba), no se considera aquí a *Syzygium* como un género naturalizado en Colombia. Las especies de *Syzygium* que crecen en el país presentan hojas opuestas, inflorescencias en racimos cortos o panículas,

pétalos de color blanco o rosado, filamentos de los estambres de color blanco o rosado, frutos rosados o púrpuras en la madurez, globosos, elipsoides o piriformes, y una sola semilla por fruto cuyo embrión es similar al eugenioide, pero con los cotiledones divididos.

Géneros de Myrtaceae nativos de Colombia

Las mirtáceas nativas de Colombia pertenecen a 15 géneros, ninguno de los cuales es endémico; todos ellos presentan frutos en baya. Algunas especies de *Campomanesia*, *Eugenia*, *Myrciaria* y *Psidium* se utilizan en nuestro país principalmente como recurso alimenticio (e.g., **Romero-Castañeda**, 1991; **Pérez-Arbeláez**, 1996; **Lozano, et al.**, 2002; **Hernández & Barrera**, 2010; **Balaguera-López**, 2011; **Barrera, et al.**, 2011; **Balaguera-López & Herrera**, 2012). Es posible que exista en Colombia el género *Amomyrtella*, del que se encontró una especie recientemente en Ecuador (**Landrum & Morocho**, 2011), el cual se asemeja a algunas especies colombianas de *Myrcianthes* (**Parra-O.**, 2012). Además, se han encontrado individuos de *Blepharocalyx eggersii* (Kiaerskou) Landrum en el norte de Brasil, muy cerca de la frontera con Colombia (**Landrum**, 1986), por lo que es posible que el género también se encuentre en nuestros bosques amazónicos. No obstante, hasta el momento no se han encontrado en las colecciones de herbario especímenes de estos dos géneros recolectados en Colombia.

Calycolpus O. Berg

Este género posee 15 especies que se distribuyen desde Centroamérica hasta Brasil (**Landrum**, 2008, 2010). En Colombia crecen dos especies que se reconocen por su cáliz abierto con cinco sépalos y por poseer flores solitarias o inflorescencias en racimos muy cortos con solo dos flores que parecen adyacentes; además, el género se caracteriza por presentar ovario con dos a seis lóculos, testa de la semilla lisa y lustrosa con células isodiamétricas y embrión mirtoide (**Landrum & Kawasaki**, 1997; **Landrum**, 2008, 2010).

Calycorectes O. Berg

Este género presenta problemas de delimitación y algunos autores consideran que debe incluirse dentro de *Eugenia* (**Landrum & Kawasaki**, 1997; **Holst**, 2003a). Si se lo considera como género separado de *Eugenia*, posee cerca de 13 especies distribuidas en México y en un área que va desde Colombia hasta la provincia de Corrientes en Argentina (**Legrand & Klein**, 1972; **Rotman**, 1982). El género se caracteriza por tener el cáliz cerrado o escasamente abierto, con cuatro a seis lóbulos pequeños, regulares o irregulares, inflorescencias cortamente racemosas que asemejan fascículos, hipanto prolongado sobre la porción superior del ovario, ovario bilocular con tres o más óvulos por lóculo y embrión eugenioide (**Rotman**, 1982; **Holst**, 2003a). En Colombia solo se tiene registro de una sola especie de este género.

Calyptranthes Sw.

Este género está compuesto por cerca de 100 especies distribuidas desde el estado de Florida en Estados Unidos hasta Centroamérica y las Antillas, y desde el noreste de Suramérica hasta el norte de Argentina y Uruguay (**McVaugh**, 1958; **McVaugh**, 1963; **Sánchez-Vindas**, 1990). En Colombia crecen entre 23 y 25 especies distribuidas principalmente en la Amazonia, las cuales frecuentemente poseen pelos en forma de T, cáliz cerrado y caliptrado en el que la caliptra se desprende claramente como una unidad en la anthesis, inflorescencias en panículas pareadas (algunas veces reducidas), a menudo terminales, ovario con 2(-3) lóculos y embrión mircioide (**Landrum & Kawasaki**, 1997; **Holst**, 2002; **Parra-O.**, 2004a). **Lucas, et al.**, (2011) hicieron un análisis filogenético de *Myrcia s.l.* y de los géneros relacionados con base en marcadores moleculares y encontraron que, aunque *Calyptranthes* es un grupo monofilético, está incluido dentro de *Myrcia*. Con base en el análisis anterior, **Lucas, et al.**, (2011) propusieron que *Calyptranthes*, *Gomidesia* O. Berg y *Marlierea* debían ser parte de *Myrcia*, y no seguir considerándose como géneros diferentes. **Lucas & Sobral** (2011) propusieron conservar el nombre *Myrcia* en lugar de *Calyptranthes* para hacer los cambios de nomenclatura necesarios si se acepta que *Calyptranthes*, *Gomidesia* y *Marlierea* deben ser incluidos en *Myrcia*. Como las propuestas de **Lucas, et al.**, (2011) y **Lucas & Sobral** (2011) todavía no han sido formalizadas, en este trabajo *Calyptranthes* y *Marlierea* se siguen considerando como otros géneros diferentes de *Myrcia*.

Campomanesia Ruiz & Pav.

Con 25 especies, este género suramericano crece en Trinidad, y desde Colombia hasta el norte de Argentina (**Landrum**, 1986). En Colombia hay una sola especie del género que se reconoce por su cáliz abierto con cinco sépalos y por tener flores solitarias; además, el género se caracteriza por presentar ovario con (3) 4-18- lóculos, de cuatro a 20 óvulos por lóculo, biseriados, una a cuatro semillas por fruto y embrión mirtoide (**Landrum & Kawasaki**, 1997; **Landrum**, 2003a).

Eugenia L.

Este es uno de los géneros más diversos de las mirtáceas, con aproximadamente 900 especies distribuidas desde Florida hasta Centroamérica, las Antillas, Suramérica, África y el sureste de Asia (**Barrie**, 2009). En Colombia se conocen actualmente 42 especies, pero se estima que pueden existir al menos 60 en el territorio nacional. Las especies de *Eugenia* en Colombia se caracterizan por poseer flores solitarias o en racimos, fascículos o glomérulos, cáliz abierto en el botón floral con cuatro sépalos bien diferenciados, ovario con dos lóculos, frutos con una a dos semillas y embrión eugenioide (**Sánchez-Vindas**, 1990; **Landrum & Kawasaki**, 1997; **Parra-O.**, 2011a).

***Marlierea* Cambess.**

En sentido estricto, este género tiene alrededor de 100 especies distribuidas en las Antillas, Panamá y el este de los Andes suramericanos (Holst, 2003b). Sin embargo, el límite genérico entre *Marlierea* y algunas especies de *Myrcia* siempre ha sido difícil de establecer, por lo que se discute si debe mantenerse aparte de *Myrcia* (Landrum & Kawasaki, 1997; Holst, 2003b). Lucas, *et al.*, (2011) propusieron considerar a *Marlierea* y a otros géneros como parte de *Myrcia*, y no seguir tratándolos como géneros aparte (ver la discusión en torno a *Calypttranthes*). En Colombia crecen entre seis y ocho especies de *Marlierea s. str.*, distribuidas principalmente en la Amazonia y en áreas de la Orinoquia aledañas a reductos del Escudo Guayanés; generalmente, estas especies se reconocen por tener cáliz cerrado que en la antesis se rasga longitudinalmente en lóbulos irregulares o relativamente regulares, inflorescencias en panículas (algunas veces reducidas) y a menudo pareadas, ovario con 2(-3) lóculos y embrión mircoide (Holst, 2003b; Rosário & Secco, 2006).

***Myrcia* DC. ex Guill.**

Este género de distribución neotropical tiene en sentido estricto aproximadamente 350 especies y crece desde México y el Caribe hasta el norte de Argentina (Landrum & Kawasaki, 1997; Holst, 2003c; Lucas & Sobral, 2011). En Colombia crecen actualmente 27 especies, pero se estima que pueden existir al menos 35 especies en el territorio nacional. El género se caracteriza por tener el cáliz abierto con cinco sépalos (raramente cuatro) bien diferenciados, inflorescencias en panículas, ovario con 2-3 (4)- lóculos, dos óvulos por lóculo, generalmente una a dos semillas y embrión mircoide (Landrum & Kawasaki, 1997; Holst, 2003c). *Gomidesia* O. Berg, reportado ocasionalmente para Colombia, fue descrito como un género afín a *Myrcia* pero distinto de este; en la actualidad, se acepta que *Gomidesia* debe ser parte de *Myrcia* y algunos autores lo consideran como una sección dentro del primero (Lucas, *et al.*, 2007; Lughadha, *et al.*, 2010; Lucas, *et al.*, 2011).

***Myrcianthes* O. Berg**

Este género consta de 30 a 35 especies, distribuidas en el sur de Florida, el Caribe y México hasta Chile (Grifo, 1992; Landrum & Kawasaki, 1997; Proença, *et al.*, 2011; Parra-O., 2012). En Colombia se encuentran entre 12 y 13 especies, que crecen principalmente en la cordillera de los Andes entre 1.800 y 3.500 metros. Las especies de este género se reconocen por poseer hojas frecuentemente coriáceas, generalmente inflorescencias en dicasios regular o irregularmente ramificados y raramente flores solitarias, cáliz abierto en el botón floral con cuatro sépalos bien diferenciados (raramente cinco), ovario usualmente con dos lóculos (a veces tres), cinco a 30 óvulos por lóculo, generalmente frutos con una a dos semillas (a veces hasta

cuatro) y embrión con dos cotiledones plano-convexos y separados (Landrum & Kawasaki, 1997; Proença, *et al.*, 2011; Parra-O., 2012).

***Myrciaria* O. Berg**

Comprende 15 a 20 especies que crecen en Centroamérica, las islas del Caribe y el este de los Andes en Suramérica (Sobral, 1993; Holst, 2003d). El género se caracteriza por presentar flores agrupadas generalmente en glomérulos que poseen el hipanto extendido más allá del ovario, el cual cae en conjunto con el cáliz como una sola unidad después de la antesis; además, presenta bractéolas connatas en el tercio inferior, cáliz abierto en el botón floral con cuatro sépalos y embrión eugenioide con los cotiledones soldados (Sobral, 1993; Landrum & Kawasaki, 1997; Holst, 2003d). En Colombia crecen tres especies, distribuidas en la mayoría de regiones biogeográficas del país.

***Myrrhinium* Schott**

Este género monotípico se caracteriza por poseer inflorescencias en dicasios simples (que a su vez se disponen agregados en racimos), flores tetrámeras, cáliz abierto con cuatro sépalos, pétalos rosados con apéndices setosos en la base, cuatro a ocho estambres por flor, erectos, rígidos y de color rojo, ovario con dos lóculos y embrión mirtoide (Landrum, 1986; Landrum & Kawasaki, 1997; Parra-O., 2003). *Myrrhinium atropurpureum*, con dos variedades, se distribuye en Suramérica en Brasil, Uruguay y a lo largo de los Andes desde Argentina hasta Colombia (Landrum, 1986); en Colombia crece *M. atropurpureum* Schott var. *octandrum* Benth. (Parra-O., 2003).

***Myrteola* O. Berg**

Este género presenta tres especies distribuidas desde Venezuela y Colombia hasta Chile (incluidas las islas Malvinas y Juan Fernández; Landrum, 1988). En Colombia se encuentran dos especies que crecen en los Andes entre los 2.300 y 3.500 metros. El género se caracteriza por poseer hojas coriáceas, cáliz abierto con cuatro sépalos bien diferenciados, flores solitarias y erectas, estambres exsertos, ovario con dos a tres lóculos y embrión mirtoide (Landrum, 1988; Landrum, 2003b).

***Plinia* L.**

Este género tiene cerca de 40 especies distribuidas en las Antillas occidentales, Cuba, Centroamérica y Suramérica, excepto Chile (Landrum, 1998; Barrie, 2004; Kawasaki & Pérez, 2012). Se reconoce por poseer cáliz cerrado o casi cerrado que se separa en la antesis en cuatro lóbulos irregulares, inflorescencias generalmente en glomérulos, hipanto prolongado más allá de la porción superior del ovario, óvulo bilocular con dos óvulos por lóculo, frutos con una o varias semillas y embrión con dos cotiledones plano-convexos y separados con hipocótilo reducido (Barrie, 2004;

Kawasaki & Pérez, 2012). En Colombia se encuentran entre tres y cuatro especies que crecen desde la Amazonia hasta la zona Andina.

***Pseudanmomis* Kausel**

Este género monoespecífico distribuido en las Antillas, Colombia, Venezuela, Trinidad y la Guayana (**Grifo, 2003**) se caracteriza por presentar el ápice de la lámina foliar retuso o emarginado, los lóbulos del cáliz caedizos, las inflorescencias en dicasios simples que frecuentemente desarrollan flores adicionales (asemejándose a una umbela) y los cotiledones parcialmente fusionados (**Grifo, 1992, 2003**). En Colombia *Pseudanmomis umbellulifera* (Kunth) Kausel crece en zonas semidesérticas de la costa Caribe (Guajira) a 200 metros de altitud (**Parra-O., 2012**).

***Psidium* L.**

Se reconocen en este género al menos 50 especies, pero se estima que podría tener cerca de 100 distribuidas naturalmente en el Caribe, y desde México hasta Argentina y Uruguay (**Landrum & Sobral, 2006; Landrum & Funch, 2008; Soares-Silva & Proença, 2008**). En Colombia crecen entre 12 y 13 especies del género que se reconocen, entre otros, por tener cáliz cerrado (a veces formando una caliptra) que en la anthesis se rasga en lóbulos irregulares o relativamente regulares, o cáliz abierto con cinco sépalos, flores solitarias o en dicasios generalmente simples (raramente compuestos) u ocasionalmente en racimos; además, el género se caracteriza por presentar en el ovario lóculos con numerosos óvulos, pocas o numerosas semillas con la testa ósea cubierta con una capa pulposa y embrión mirtoide (**Landrum & Kawasaki, 1997; Landrum, 2003c; Landrum, 2003e**).

***Ugni* Turcz.**

Con cuatro especies, este género se distribuye desde México hasta Chile (**Landrum & Kawasaki, 1997; Rosário, et al., 2004**). La única especie del género que crece en Colombia (*U. myricoides* (Kunth) O. Berg) se caracteriza por poseer hojas coriáceas, cáliz abierto con cinco sépalos bien diferenciados, flores solitarias que se doblan y apuntan hacia abajo, corola campanulada, estambres no prolongados más allá del borde de la corola, ovario usualmente con tres lóculos, frutos con 15 a 20 semillas y embrión mirtoide (**Landrum & Kawasaki, 1997; Landrum, 2003d**).

Clave para la identificación de los géneros de Myrtaceae presentes en Colombia

Esta clave incluye tanto los géneros de Myrtaceae nativos de Colombia, como los que han sido introducidos al país. En la clave se señalan con asterisco (*) los géneros introducidos.

1. Frutos en cápsulas; plantas exclusivamente cultivadas 2
- 1.' Frutos en baya; plantas cultivadas o nativas 6

2. Sépalos fusionados unos con otros en el botón floral (cáliz cerrado) y caliptrados; inflorescencias en umbelas simples o en umbelas simples dispuestas en racimos 3
- 2.' Sépalos libres en el botón floral; flores solitarias, inflorescencias en espigas o muy ramificadas en las que los ejes secundarios terminan en cimas con tres flores 4
3. Inflorescencias en umbelas a su vez dispuestas en racimos o en panículas terminales; frutos *Corymbia**
- 3.' Inflorescencias en umbelas axilares a las hojas; frutos ovoides o globulares pero nunca urceolados *Eucalyptus**
4. Hojas alternas; inflorescencias en espigas con numerosas flores *Melaleuca**
- 4.' Hojas alternas u opuestas; flores solitarias o inflorescencias muy ramificadas en las que los ejes secundarios terminan en cimas con tres flores 5
5. Hojas alternas; lámina foliar con el envés concóloro o discóloro, pero no grisáceo; flores solitarias *Leptospermum**
- 5.' Hojas opuestas; lámina foliar con el envés grisáceo; inflorescencias muy ramificadas en las que los ejes secundarios terminan en cimas con tres flores *Metrosideros**
6. Sépalos fusionados unos con otros en el botón floral (cáliz cerrado), que se desprenden en la anthesis como una caliptra o se rasgan en lóbulos irregulares o relativamente regulares; parte superior de los frutos con una cicatriz anular apical producto del desprendimiento del cáliz 7
- 6.' Sépalos libres en el botón floral (cáliz abierto) en el que los sépalos se diferencian claramente unos de otros; parte superior de los frutos con los restos de los sépalos del cáliz claramente diferenciados, sin cicatriz anular 11
7. Inflorescencias en panículas; embrión de tipo mircioide 8
- 7.' Flores solitarias o inflorescencias en fascículos, glomérulos o dicasios generalmente simples u ocasionalmente compuestos; embrión de tipo eugenioide o mirtoide 9
8. Cáliz cerrado en el botón floral que en la anthesis se desprende claramente como una unidad (caliptra) *Calyptanthes*
- 8.' Cáliz cerrado en el botón floral que en la anthesis se rasga longitudinalmente en lóbulos irregulares o relativamente regulares *Marlierea*
9. Inflorescencias en fascículos o glomérulos; hipanto prolongado sobre o más allá de la porción superior del ovario; semillas con la testa cartácea o ligeramente coriácea 10
- 9.' Flores solitarias o dicasios generalmente simples u ocasionalmente compuestos; hipanto no prolongado sobre o más allá de la porción superior del ovario; semillas con la testa ósea *Psidium*

10. Inflorescencias en fascículos; ovario bilocular con tres o más óvulos por lóculo; embrión eugenioide (con los cotiledones fusionados y sin distinción del hipocótilo) *Calycorectes*
- 10.' Inflorescencias en glomérulos; ovario bilocular con dos óvulos por lóculo; embrión con dos cotiledones planoconvexos y separados con hipocótilo reducido *Plinia*
11. Subarbustos erectos o postrados; láminas foliares siempre coriáceas; flores siempre solitarias; embrión exclusivamente mirtoide; plantas nativas que crecen principalmente en el subpáramo o páramo 12
- 11.' Árboles, arbolitos o arbustos, ocasionalmente subarbustos; láminas foliares cartáceas o coriáceas; flores solitarias, en racimos (cortos o largos), fascículos, glomérulos, dicasios (a veces agregados en racimos o con flores adiciones, y que lucen como umbelas) o panículas; embrión mircioide, eugenioide o mirtoide; plantas cultivadas o nativas, estas últimas crecen en diferentes ecosistemas del gradiente altitudinal 13
12. Cáliz floral con cinco sépalos bien diferenciados; flores que se doblan y apuntan hacia abajo; corola campanulada; estambres no prolongados más allá del borde de la corola *Ugni*
- 12.' Cáliz floral con cuatro sépalos bien diferenciados, flores erectas; corola no campanulada; estambres exsertos *Myrteola*
13. Lóbulos del cáliz siempre en número de cuatro (observados en el botón floral o como remanentes en la parte superior del fruto) 14
- 13.' Lóbulos del cáliz siempre en número de cinco (observados en el botón floral o como remanentes en la parte superior del fruto) 23
14. Inflorescencias en panículas 15
- 14.' Flores solitarias, en racimos (cortos o largos), fascículos, glomérulos o dicasios (a veces agregados en racimos o con flores adiciones y que lucen como umbelas), nunca en panículas 17
15. Frutos nunca piriformes ni rosados, generalmente globosos o elipsoides; embrión mircioide o mirtoide; plantas nativas o cultivadas 16
- 15.' Frutos piriformes rosados o elipsoides negruzcos; embrión similar al eugenioide pero con los cotiledones divididos; plantas exclusivamente cultivadas *Syzygium**
16. Hojas escasa a moderadamente aromáticas; ovario con dos lóculos; embrión mircioide; plantas nativas *Myrca*
- 16.' Hojas muy aromáticas; ovario con un solo lóculo; embrión mirtoide; plantas exclusivamente cultivadas *Pimenta**
17. Inflorescencias en dicasios simples agregados en racimos; pétalos rosados con apéndices setosos en la base; 4-8 estambres por flor, erectos, rígidos y de color rojo *Myrrhinium*
- 17.' Flores solitarias, en racimos (cortos o largos), fascículos, glomérulos o dicasios (a veces con flores adiciones y que lucen como umbelas); pétalos blancos o rosados sin apéndices setosos en la base; numerosos estambres por flor (más de 10) erectos o no, generalmente de color blanco 18
18. Lámina foliar con el envés grisáceo; pétalos carnosos con margen fuertemente involuta, de color rosado a púrpura por la haz; filamentos de los estambres de color rojo; semillas con embrión mirtoide *Acca**
- 18'. Lámina foliar que nunca exhibe el envés grisáceo; pétalos no carnosos con margen plana o ligeramente involuta, de color blanco o rosado por la haz; filamentos de los estambres de color blanco o rosado; semillas con embrión eugenioide o similar al eugenioide pero con los cotiledones divididos 19
19. Estambres siempre de color rosado; plantas exclusivamente cultivadas *Syzygium**
- 19.' Estambres siempre de color blanco; plantas generalmente nativas, raramente cultivadas 20
20. Inflorescencias en glomérulos; flores con el hipanto extendido más allá del ovario, el cual cae en conjunto con el cáliz, como una sola unidad, después de la antesis; bractéolas connatas en el tercio inferior *Myrciaria*
- 20.' Flores solitarias, en racimos (cortos o largos), fascículos o dicasios (a veces con flores adiciones y que lucen como umbelas); flores sin el hipanto extendido más allá del ovario, el cual no se desprende después de la antesis; bractéolas connatas en la base o libres 21
21. Ápice de la lámina foliar exclusivamente retuso o emarginado; lóbulos del cáliz caedizos; inflorescencias en dicasios simples que frecuentemente desarrollan flores adicionales semejantes a umbelas; cotiledones parcialmente fusionados; plantas que crecen exclusivamente en zonas semidesérticas de la costa Caribe (Guajira) *Pseudanamomis*
- 21.' Ápice de la lámina foliar agudo, obtuso, retuso o emarginado; lóbulos del cáliz persistentes; flores solitarias o inflorescencias en racimos, fascículos o dicasios (que no desarrollan flores adicionales asemejando umbelas); cotiledones totalmente fusionados o separados; plantas que crecen en diferentes regiones naturales de Colombia 22
22. Flores solitarias o inflorescencias en racimos o fascículos; embrión con los cotiledones completamente fusionados en una sola masa y sin distinción del hipocótilo *Eugenia*

- 22.' Inflorescencias en dicasios simples o compuestos (raramente flores solitarias); embrión con los cotiledones separados e hipocótilo diferenciable *Myrcianthes*
23. Inflorescencias en panículas 24
- 23.' Flores solitarias o inflorescencias en racimos cortos, fascículos o dicasios (a veces con flores adicionales y que lucen como umbelas) 25
24. Hojas poco a moderadamente aromáticas; ovario con dos lóculos; embrión mircioide; plantas nativas *Myrcia*
- 24.' Hojas muy aromáticas; ovario con un solo lóculo; embrión mirtoide; plantas exclusivamente cultivadas *Pimenta**
25. Inflorescencias en dicasios simples o compuestos
..... *Myrcianthes*
- 25.' Flores solitarias o inflorescencias en racimos cortos, fascículos o dicasios que tienen flores adicionales y lucen como umbelas (nunca dicasios simples o compuestos) 26
26. Semillas con la testa ósea cubierta con una capa pulposa en fresco; embrión exclusivamente mirtoide *Psidium*
- 26.' Semillas con la testa membranosa o ligeramente dura, pero nunca ósea, y sin capa pulposa; embrión con los cotiledones parcialmente fusionados o mirtoide 27
27. Ápice de la lámina foliar exclusivamente retuso o emarginado; lóbulos del cáliz caedizos; inflorescencias en dicasios simples que frecuentemente desarrollan flores adicionales que semejan umbelas; cotiledones parcialmente fusionados; plantas que crecen exclusivamente en zonas semidesérticas de la costa Caribe (Guajira) *Pseudanmomis*
- 27.' Ápice de la lámina foliar agudo u obtuso; lóbulos del cáliz persistentes; flores solitarias o inflorescencias en racimos cortos; embrión de tipo mirtoide; plantas cultivadas o que crecen naturalmente en diferentes regiones naturales de Colombia 28
28. Plantas de hábito arbustivo; ápice de la lámina foliar acuminado con mucrón evidente; ancho del pedicelo floral menor o igual a 0,4 mm; plantas exclusivamente cultivadas ...
..... *Myrtus**
- 28.' Plantas de hábito arbóreo; ápice de la lámina foliar caudado o ligeramente atenuado sin mucrón evidente; ancho del pedicelo floral mayor o igual a 0,6 mm; plantas nativas que ocasionalmente pueden ser cultivadas (i.e., *Campomanesia*) 29
29. Vena marginal de la lámina foliar claramente diferenciable, paralela a la margen de la lámina; lámina foliar elíptica u oblanceolada, fruto no mayor a 1,3 cm de diámetro en la madurez *Calycolpus*
- 29.' Vena marginal de la lámina foliar no diferenciable; lámina

foliar anchamente ovada; fruto de cerca de 7 cm de diámetro en la madurez *Campomanesia*

Conflicto de interés

El autor declara que no tiene conflicto de interés.

Agradecimientos

A los herbarios CAS, CAUP, COAH, COL, CUVC, FMB, GH, HUA, JAUM, LLANOS, MEDEL, MICH, MO, NY, PSO, SURCO, TOLI, US y UTMC por permitir el acceso a sus colecciones. Al Jardín Botánico de Missouri (Estados Unidos) y a su programa de becas "Alwyn H. Gentry" para Estudios en Botánica Suramericana, por permitir mi estadía y trabajo en esa institución como investigador visitante en taxonomía de Myrtaceae colombianas (junio a julio del 2003). A la Academia de Ciencias de California – Herbario CAS (Estados Unidos) y al programa de becas de la Fundación Lakeside, por permitir mi estadía y trabajo en esa institución como investigador visitante en taxonomía y sistemática de Myrtaceae colombianas (abril de 2013). A la Asociación Colombiana de Herbarios (ACH) por su invitación a la gira de especialistas entre 2013 y 2014 para revisar material de Myrtaceae en diferentes herbarios colombianos. A María Fernanda González, Lauren Raz y Betsy Viviana Rodríguez, por permitir el uso de fotos selectas de Myrtaceae en este artículo. A Marcela Morales por algunas de las ilustraciones que acompañan este artículo. A los dos evaluadores anónimos por sus comentarios y sugerencias que ayudaron a enriquecer el manuscrito. Agradezco especialmente al Herbario Nacional Colombiano (COL) – Instituto de Ciencias Naturales – Universidad Nacional de Colombia por todo el apoyo recibido.

Bibliografía

- Balaguera-López, H.** 2011. Estudio del crecimiento y desarrollo del fruto de champa (*Campomanesia lineatifolia* Ruiz & Pav.) y determinación del punto óptimo de cosecha. Tesis de Maestría, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. 138 p.
- Balaguera-López, H. & A. Herrera.** 2012. Determining optimal harvest point for champa (*Campomanesia lineatifolia* Ruiz & Pav.) fruit based on skin color. *Ingeniería e Investigación*. **32** (1): 88-93.
- Baptiste, M. P., N. Castaño, D. Cárdenas, F. Gutiérrez, D. Gil & C. Lasso.** (eds.). 2010. Análisis de riesgo y propuesta de categorización de especies introducidas para Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá.
- Barrera, J., Hernández, M. & L. Melgarejo.** (comp.). 2011. Estudios ecofisiológicos en la Amazonia colombiana 1. Arazá (*Eugenia stipitata*, McVaugh). Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas – Sinchi, Bogotá.
- Barrie, F.** 2004. Synopsis of *Plinia* (Myrtaceae) in Mesoamerica. *Novon* **14**: 380-400.

- Barrie, F.** 2009. *Eugenia*. Págs.: 81-129. En: G. Davidse, M. Sousa, S. Knapp, F. Chiang & F. Barrie (eds.). Flora Mesoamericana. Volumen 4, parte 1, Cucurbitaceae a Polemoniaceae. Universidad Nacional Autónoma de México – Missouri Botanical Garden – The Natural History Museum (London).
- Berg, O.** 1855-1856. Revisio Myrtacearum Americae. *Linnaea* **27**: 1-472.
- Berg, O.** 1857-1859. Myrtaceae. En: C. F. P. von Martius. Flora Brasiliensis **14** (1): 1-655.
- Bernal, R., M. Celis & R. Gradstein.** 2007. Plant diversity of Colombia catalogued. *Taxon* **56** (1): 273.
- Chantaranothai, P. & J. Parnell.** 1994. A revision of *Acmena*, *Cleistocalyx*, *Eugenia* s.s. and *Syzygium* (Myrtaceae) in Thailand. *Thai For. Bull.* **21**: 1-123.
- Chippendale, G. M.** 1988. *Eucalyptus*. Págs. 1-448. En: A. George (ed.). Flora of Australia. Volume 19. Myrtaceae, *Eucalyptus*, *Angophora*. Australian Government Publishing Service, Canberra.
- Craven, L.** 2006. New combinations in *Melaleuca* for Australian species of *Callistemon*. *Novon* **16**: 468-475.
- Díaz-Espinosa, A., J. Díaz-Triana & O. Vargas** (eds.). 2012. Catálogo de plantas invasoras de los humedales de Bogotá. Grupo de Restauración Ecológica de la Universidad Nacional de Colombia y Secretaría Distrital de Ambiente. Bogotá.
- Graham, S.** 2004. Alzateaceae. Págs. 11-13. En: Smith, N., S. Mori, A. Henderson, D. Stevenson & S. Heald (eds.). Flowering Plants of the Neotropics. The New York Botanical Garden – Princeton University Press. New York.
- Grifo, F.** 1992. A revision of *Myrcianthes* Berg (Myrtaceae). Disertación doctoral, Cornell University, Ithaca, Nueva York (inérita).
- Grifo, F.** 2003. *Pseudanmomis*. Págs. 87-88. en: J. Steyermark, P. Berry, K. Yatskievych & B. Holst (eds.). Flora of the Venezuelan Guayana. Volume 7. Myrtaceae-Plumbaginaceae. Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Hernández, M. & J. Barrera** (comp.). 2010. Camu camu. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas – Sinchi, Bogotá.
- Hill, K. D. & Johnson, L. A. S.** 1995. Systematic studies in the eucalypts 7. A revision of the bloodwoods, genus *Corymbia* (Myrtaceae). *Telopea* **6**: 185–504.
- Holst, B.** 2002. New species and notes on Myrtaceae from Northern South America. *Selbyana* **23** (2): 137-180.
- Holst, B.** 2003a. *Calycorectes*. Págs. 8-9. en: J. Steyermark, P. Berry, K. Yatskievych & B. Holst (eds.). Flora of the Venezuelan Guayana. Volume 7. Myrtaceae-Plumbaginaceae. Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Holst, B.** 2003b. *Marlierea*. Págs. 40-53. En: J. Steyermark, P. Berry, K. Yatskievych & B. Holst (eds.). Flora of the Venezuelan Guayana. Volume 7. Myrtaceae-Plumbaginaceae. Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Holst, B.** 2003c. *Myrcia*. Págs. 54-78. En: J. Steyermark, P. Berry, K. Yatskievych & B. Holst (eds.). Flora of the Venezuelan Guayana. Volume 7. Myrtaceae-Plumbaginaceae. Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Holst, B.** 2003d. *Myrciaria*. Págs. 81-84. En: J. Steyermark, P. Berry, K. Yatskievych & B. Holst (eds.). Flora of the Venezuelan Guayana. Volume 7. Myrtaceae-Plumbaginaceae. Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Kawasaki, M. L. & A. Pérez.** 2012. A new species of *Plinia* (Myrtaceae) from Ecuador, with demographic notes from a large forest plot. *Harvard Papers in Botany* **17** (1): 19-20.
- Ladiges, P., F. Udovicic & G. Nelson.** 2003. Australian biogeographical connections and the phylogeny of large genera in the plant family Myrtaceae. *Journal of Biogeography* **30**: 989-998.
- Landrum, L.** 1984. Taxonomic implications of the discovery of calyptrate species of *Myrceugenia* (Myrtaceae). *Brittonia* **36** (2): 161-166.
- Landrum, L.** 1986. *Campomanesia*, *Pimenta*, *Blepharocalyx*, *Legrandia*, *Acca*, *Myrrhinium*, and *Luma* (Myrtaceae). *Flora Neotrop. Monogr.* **45**: 1-179.
- Landrum, L.** 1988. Systematics of *Myrteola* (Myrtaceae). *Systematic Botany* **13** (1): 120-132.
- Landrum, L.** 1990. *Accara*: A New Genus of Myrtaceae, Myrtinae from Brazil. *Systematic Botany* **15** (2): 221-225.
- Landrum, L.** 1991. *Chamguava*: A New Genus of Myrtaceae (Myrtinae) from Mesoamerica. *Systematic Botany* **16** (1): 21-29.
- Landrum, L.** 2003a. *Campomanesia*. Págs. 16-17. En: J. Steyermark, P. Berry, K. Yatskievych & B. Holst (eds.). Flora of the Venezuelan Guayana. Volume 7. Myrtaceae-Plumbaginaceae. Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Landrum, L.** 2003b. *Myrteola*. Págs. 84-85. En: J. Steyermark, P. Berry, K. Yatskievych & B. Holst (eds.). Flora of the Venezuelan Guayana. Volume 7. Myrtaceae-Plumbaginaceae. Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Landrum, L.** 2003c. *Psidium*. Págs. 88-95. En: J. Steyermark, P. Berry, K. Yatskievych & B. Holst (eds.). Flora of the Venezuelan Guayana. Volume 7. Myrtaceae-Plumbaginaceae. Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Landrum, L.** 2003d. *Ugni*. Págs. 98-99. En: J. Steyermark, P. Berry, K. Yatskievych & B. Holst (eds.). Flora of the Venezuelan Guayana. Volume 7. Myrtaceae-Plumbaginaceae. Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Landrum, L.** 2003e. A revision of the *Psidium salutare* complex (Myrtaceae). *Sida* **20** (4): 1449-1469.
- Landrum, L.** 2008. Two new species of *Calycolpus* (Myrtaceae) from Brazil. *Brittonia* **60** (3): 252-256.
- Landrum, L.** 2010. A revision of *Calycolpus* (Myrtaceae). *Systematic Botany* **35** (2): 368-389.

- Landrum, L. & M. L. Kawasaki.** 1997. The genera of Myrtaceae in Brazil: An illustrated synoptic treatment and identification keys. *Brittonia* **49** (4): 508-536.
- Landrum, L. & M. Sobral.** 2006. *Psidium cauliflorum* (Myrtaceae), a new species from Bahia, Brazil. *Sida* **22** (2): 927-929.
- Landrum, L. & L. Funch.** 2008. Two new species of *Psidium* (Myrtaceae) from Bahia, Brazil. *Novon* **18**: 74-77.
- Landrum, L. & V. Morocho.** 2011. A new combination based on *Myrcianthes irregularis* (Myrtaceae) – A new genus for Ecuador. *Journal of the Botanical Research Institute of Texas* **5** (1): 105-107.
- Legrand, D. & R. Klein.** 1972. Flora Ilustrada Catarinense. Mirtáceas: *Calycorectes* Berg [MIRT] **7**: 553-569.
- Lozano, J., J. Toro, R. García & R. Tafur.** 2002. Manual sobre el cultivo del guayabo en Colombia. Fruticultura colombiana. Litografía Autónoma del Valle Lavalte Ltda, Cali.
- Lucas, E., S. Harris, F. Mazine, S. Belsham, E. Nic Lughadha, A. Telford, P. Gasson & M. Chase.** 2007. Suprageneric phylogenetics of Myrteae, the generically richest tribe in Myrtaceae (Myrtales). *Taxon* **56**: 1105-1128.
- Lucas, E. & M. Sobral.** 2011. Proposal to conserve the name *Myrcia* against *Calyptanthes* (Myrtaceae). *Taxon* **60** (2): 605.
- Lucas, E., K. Matsumoto, S. Harris, E. Lughadha, B. Benardini & M. Chase.** 2011. Phylogenetics, morphology, and evolution of the large genus *Myrcia* s.l. (Myrtaceae). *International Journal of Plant Sciences* **172** (7): 915-934.
- Lughadha, N., K. Slade, L. Jennings, H. Boudet-Fernandes & E. Lucas.** 2010. Three new species of *Myrcia* section *Gomidesia* (Myrtaceae) – from Espírito Santo, Brazil. *Kew Bulletin* **65**: 21-28.
- Mabberley, D.** 2008. Mabberley's plant book. A portable dictionary of the higher plants. Tercera edición. Cambridge University Press. Cambridge.
- McVaugh, R.** 1956. Tropical American Myrtaceae, I - Notes on generic concepts and description of previously unrecognized species. *Fieldiana, Bot.* **29** (3): 145-228.
- McVaugh, R.** 1958. Myrtaceae. En: Maguire, J. F. (Ed.), *Flora of Peru*. *Field Mus. Nat. Hist., Bot Ser.* **13** part 4 (2): 569-818.
- McVaugh, R.** 1963. Myrtaceae. En: *Flora de Guatemala*. *Fieldiana, Bot.* **24** part 7 (3): 283-405.
- McVaugh, R.** 1968. The genera of American Myrtaceae - An interim report. *Taxon* **17**: 354-418.
- McVaugh, R.** 1969. Myrtaceae. En: Maguire, B. & Wurdack, J.J. (Eds.), *The Botany of the Guayana Highlands*, part. VIII. *Mem. New York Bot. Gard.* **18**: 55-286.
- Parra-O., C.** 2001. Una nueva especie de *Calyptanthes* Sw. (Myrtaceae) de Colombia. *Caldasia* **23** (2): 435-439.
- Parra-O., C.** 2002. Dos nuevas especies de Myrtaceae de Colombia. *Caldasia* **24** (1): 95-102.
- Parra-O., C.** 2003. Redescubrimiento de *Myrrhinium atropurpureum* var. *octandrum* (Myrtaceae: Myrtinae) en Colombia. *Caldasia* **25** (2): 229-233.
- Parra-O., C.** 2004a. New taxa of *Calyptanthes* (Myrtaceae) from Colombia. *Novon* **14** (2): 210-215.
- Parra-O., C.** 2004b. Myrtaceae. Págs. 333-334. En: J. O. Rangel-Ch. (ed.). *Colombia Diversidad Biótica IV – El Chocó biogeográfico/Costa Pacífica*. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Parra-O., C.** 2004c. Primer registro de *Calyptanthes cuspidata* (Myrtaceae: Myrciinae) para Colombia. *Caldasia* **26** (1): 323-326.
- Parra-O., C.** 2011a. Una nueva especie de *Eugenia* (Myrtaceae) de Colombia. *Caldasia* **33** (2): 407-411.
- Parra-O., C.** 2011b. Myrtaceae. Págs. 644-649. En: A. Idárraga, R. del C. Ortiz, R. Callejas & M. Merello (eds.). *Flora de Antioquia: catálogo de las plantas vasculares*. vol. II. Listado de las plantas vasculares del departamento de Antioquia. Programa Expedición Antioquia-2013. Series Biodiversidad y Recursos Naturales. Universidad de Antioquia, Missouri Botanical Garden & Oficina de planeación departamental de la Gobernación de Antioquia, Editorial D'Vinni, Bogotá.
- Parra-O., C.** 2012. Una nueva especie de *Myrcianthes* (Myrtaceae) de Colombia. *Caldasia* **34** (2): 277-282.
- Parra-O., C.** 2013. Una nueva especie de *Myrcia* (Myrtaceae) y nuevos registros de la familia para Colombia. *Caldasia* **35** (2): 293-298.
- Parra-O., C., M. Bayly, F. Udovicic & P. Ladiges.** 2006. ETS sequences support the monophyly of the eucalypt genus *Corymbia* (Myrtaceae). *Taxon* **55** (3): 653-663.
- Parra-O., C., M. Bayly, A. Drinnan, F. Udovicic & P. Ladiges.** 2009. Phylogeny, major clades and infrageneric classification of *Corymbia* (Myrtaceae), based on nuclear ribosomal DNA and morphology. *Australian Systematic Botany* **22** (5): 384-399.
- Pérez-Arbeláez, E.** 1996. *Plantas útiles de Colombia*. Fondo FEN Colombia. Quinta edición. Bogotá.
- Proença, C., E. Nic Lughadha, E. Lucas & E. Woodgyer.** 2006. *Algrizea* (Myrteae, Myrtaceae): A new genus from the highlands of Brazil. *Systematic Botany* **31** (2): 320-326.
- Proença, C., L. Jennings & E. Lucas.** 2011. Two new species of Myrtaceae (Myrteae) from northern South America. *Brittonia* **63** (1): 46-50.
- Rangel-Ch., J. O.** 2000. Catálogo florístico de los macizos de Chingaza y Sumapaz. Págs. 563-598. En: J. O. Rangel-Ch. (ed). *Colombia Diversidad Biótica III. La región de vida paramuna*. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Unibiblos. Bogotá.
- Romero-Castañeda, R.** 1991. *Frutas silvestres de Colombia*. Segunda Edición. Instituto Colombiano de Cultura Hispánica. Bogotá.

- Rosário, A. S., R. S. Secco & J. B. Silva.** 2004. Notas sobre *Ugni Turcz.* (Myrtaceae) na Amazônia Brasileira. *Acta Amazonica* **34** (1): 139-141.
- Rosário, A. S. & R. S. Secco.** 2006. Sinopse das espécies de *Marlierea* Cambess. (Myrtaceae) na Amazonia brasileira. *Acta Amazonica* **36** (1): 37-52.
- Rotman, A.** 1982. Los géneros *Calycorectes*, *Hexachlamys*, *Myrciaria*, *Paramyrciaria*, *Plinia* y *Siphoneugena* en la flora argentina (Myrtaceae). *Darwiniana* **24** (1-4): 157-185.
- Rudas, A. & A. Prieto.** 2005. Flórula del Parque Nacional Natural Amacayacu. Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden 99: 1-680. Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Salywon, A. & L. Landrum.** 2007. *Curitiba* (Myrtaceae): A new genus from the Planalto of southern Brazil. *Brittonia* **59** (4): 301-307.
- Sánchez-Vindas, P.** 1990. Myrtaceae. En: Gómez-Pompa, A. (ed.). Flora de Veracruz. Instituto de Ecología, Xalapa, Veracruz, México **62**: 1-146.
- Schmidt-Adam, G. & K. Gould.** 2000. Phenology of inflorescence development in pohutukawa (*Metrosideros excelsa*, Myrtaceae). *New Zealand Journal of Botany* **38**: 333-337.
- Snow, N., G. Guymer & G. Sawvel.** 2003. Systematics of *Austromyrtus*, *Lenwebbia*, and the Australian species of *Gossia* (Myrtaceae). *Systematic Botany Monographs* **65**: 1-95.
- Soares-Silva, L. & C. Proença.** 2008. A new species of *Psidium* L. (Myrtaceae) from southern Brazil. *Botanical Journal of the Linnean Society* **158**: 51-54.
- Sobral, M.** 1993. Sinopse de *Myrciaria* (Myrtaceae). *Napaea* **9**: 13-41.
- Thompson, J. & V. Logan.** 1991. *Leptospermum*. Págs. 154-168. En: Harden, G. (ed.). Flora of New South Wales. Volumen 2. Royal Botanical Gardens Sydney. New South Wales University Press, Kensington.
- Weberling, F.** 1988. The architecture of inflorescences in Myrtales. *Annals of the Missouri Botanical Garden* **75**: 226-310.
- Wilson, P.** 1991. *Melaleuca*. Págs. 173-179. En: Harden, G. (ed.). Flora of New South Wales. Volumen 2. Royal Botanical Gardens Sydney. New South Wales University Press, Kensington.
- Wilson, P., M. O'Brien, M. Heslewood & C. Quinn.** 2005. Relationships within Myrtaceae *sensu lato* based on a *matK* phylogeny. *Plant Systematics and Evolution* **251**: 3-19.
- Wright, S., C. Young, J. Dawson, D. Whittaker & R. Gardner.** 2000. Riding the ice age El Niño? Pacific biogeography and evolution of *Metrosideros* subg. *Metrosideros* (Myrtaceae) inferred from nuclear ribosomal DNA. *Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America* **97** (8): 4118-4123.

Remoción de atenuación y dispersión en registros preapilados mediante filtro inverso con factor de calidad estimado en espectro instantáneo

Álvaro Corrales¹, Ovidio Almanza², Luis Montes-Vides^{3,*}

¹Occidental de Colombia, Inc., Bogotá, Colombia

²Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Física, Bogotá, Colombia

³Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá, Colombia

Resumen

La atenuación diferencial de los armónicos de mayor frecuencia y la dispersión asociada a las distintas velocidades de fase deterioran la imagen sísmica del subsuelo y dificultan su interpretación e inversión. Para remover la atenuación y la dispersión de los registros sísmicos, y así mejorar la imagen del subsuelo, es necesario usar filtros inversos basados en modelos que incluyen el factor de calidad Q , por lo que la estimación de su valor requiere un método sólido que suministre valores confiables. La descomposición adaptativa en tiempo y frecuencia (*Matching Pursuit Decomposition*, MPD) genera un espectro de frecuencia para cada muestra de la traza (instantánea), donde se estiman valores de Q confiables, sin los inconvenientes propios de los análisis espectrales con ventanas basados en las transformadas de Fourier y de Gabor. Dado que el componente de fase del filtro es intrínsecamente estable, la compensación se aplica solo a la amplitud. Se desarrollaron algoritmos en MATLAB, los cuales implementan la técnica MPD, así como un filtro inverso estable para remover los efectos de la atenuación y la dispersión de los registros sísmicos preapilados y postapilados. La estimación del valor de Q en sismogramas sintéticos y su uso con el filtro inverso permitieron corregir la distorsión de la ondícula mediante la recuperación de los espectros de amplitud y de fase. La metodología se aplicó en registros preapilados de una línea sísmica marina PSTM, incrementando la relación entre señal y ruido y mejorando ostensiblemente la resolución temporal.

Palabras clave: atenuación, dispersión, espectro instantáneo, descomposición adaptable, filtro inverso, factor de calidad.

Removal of attenuation and dispersion in pre-stack gathers using inverse filter with quality factor estimated on instantaneous spectrum

Abstract

Physical phenomena such as attenuation of high frequency components and velocity dispersion deteriorate seismic images hindering their interpretation and inversion. Removing the attenuation and dispersion of seismic records involves the use of inverse filters based on models that include the quality factor, Q , therefore, a robust method should be used to estimate Q and provide reliable values to improve the image of the subsurface value. The matching pursuit decomposition (MPD) generates a frequency spectrum for each sample of the trace (instantaneous), where reliable Q values are estimated without the inconveniences of spectral analysis with windows based on the Fourier and Gabor transforms. Since the phase component of the filter is inherently stable, compensation applies only to the amplitude. MATLAB algorithms that implement both the MPD and the stable inverse filter for removing the effects of attenuation and dispersion on pre and post-stack data were developed. The Q value estimated on synthetic seismograms and used with an inverse filter allowed correcting the distortion of the wavelet by retrieving the amplitude and phase spectra. The methodology was applied to a pre-stacked marine seismic line PSTM increasing the signal-noise ratio and significantly improving the temporal resolution records.

Key words: Attenuation, dispersion, instantaneous spectrum, matching pursuit decomposition, inverse filter, quality factor.

Introducción

Al viajar en un medio, las ondas sísmicas sufren la disminución de las amplitudes de sus armónicos de mayor frecuencia, lo que reduce el ancho de banda útil de los datos, la cual, además, se ve sujeta a distorsión debido a la diferencia de las velocidades de fase de sus armónicos. Estos fenómenos oscurecen las imágenes del subsuelo y dificultan su interpretación, haciendo inestable la inversión de las secciones sísmicas. Son muchos los enfoques que se han aplicado con éxito relativo para aumentar la resolución de tiempo mediante la inversión espectral (Castaño, *et al.*, 2011; Smith, *et al.*, 2008), o mediante el análisis de ampliación espectral (Kazemeini, *et al.*, 2010). Por otro lado, el factor de calidad cuantifica la atenuación como el porcentaje de energía perdida en un ciclo con determinada frecuencia, por lo que se han desarrollado métodos para aplicar filtros inversos que usan un factor de calidad inverso a los datos sísmicos (Walls, *et al.*, 2006), y cuyo desempeño ha sido comparado (Montana & Margrave, 2005). El factor de calidad, que depende de la frecuencia, mide la capacidad de la roca para atenuar ondas sísmicas y por ello las diversas composiciones de las capas modifican la atenuación hasta esa profundidad. Por consiguiente, la detección de cambios en la atenuación permitiría establecer las propiedades líticas del subsuelo (Ramírez-Cruz, *et al.*, 2005). El método de la relación espectral (*Spectral Relaxation Method*, SRM) es el más comúnmente utilizado para calcular el factor de atenuación por intervalo. En un comienzo se usó ampliamente para estimar la atenuación en registros de perfil sísmico vertical (*Vertical Seismic Profile*, VSP) acústicos y, recientemente, en los registros de VSP de cizalla (Xu & Stewart, 2006). Además, estas nuevas metodologías se han aplicado para el cálculo de la onda P y la atenuación de las ondas S (Qp y Qs) a partir de datos de registros de pozos estándar con para relacionarlas con la presencia de petróleo o gas natural (Wang, *et al.*, 2009). Mediante su procesamiento se busca recuperar las amplitudes y las fases originales de las ondas, aplicando filtros que dependen de Q, por lo que su errónea estimación introduciría artefactos en las secciones sísmicas. Con este fin se han usado distintos métodos para estimar exactamente dicho factor Q, incluidas las medidas en registros de pozo, en núcleos de roca, en VSP y en datos sísmicos (Raikes & White, 1984; Tonn, 1991). En el caso de las ondas de cizalla, el factor Q se ha estimado mediante la adaptación del método de relación espectral usando un VSP *cero-offset* con valores confiables de Q (Xu & Stewart, 2006; Haase & Stewart, 2006). La estimación precisa de Q hace posible hacer análisis AVA/

AVO confiables, lo que disminuye el riesgo exploratorio mediante una inversión sísmica que permite caracterizar el reservorio. En consecuencia, la estimación precisa de Q es crucial antes de realizar una inversión, pero dado que la atenuación no está linealmente relacionada con la frecuencia (Kolsky, 1956), dicha estimación se convierte en una tarea compleja. Wang (2006) propuso un método inverso para eliminar la atenuación y la dispersión de los datos sísmicos sin amplificar la señal cuando esta se encuentra bajo el umbral del ruido y mejorar la relación señal-ruido. Este método se basa en una estimación precisa del valor de Q; sin embargo, la precisión y la exactitud alcanzadas dependen de la transformada que suministra el espectro sobre el cual se puede estimar Q (Reine, *et al.*, 2009). La transformada adaptable en tiempo y frecuencia, MPD, ha demostrado su eficiencia y solidez para suministrar espectros instantáneos precisos al usar un diccionario de ondículas mediante las cuales se puede representar la señal con exactitud (Wang, 2007), siendo las ondículas de Morlet las que mejor desempeño alcanzan en este cometido (Liu & Marfurt, 2005). El espectro instantáneo $t-\omega$ se transforma en un nuevo dominio χ en el cual $Q(\chi)$ se calcula con exactitud usando una regresión lineal. En este caso, se implementó un filtro Q inverso estabilizado, el cual restablece los espectros de amplitud y de fase sin aumentar el ruido ambiental y mejora la relación entre señal y ruido de los datos. Se presenta aquí el resultado de la aplicación, tanto en datos sintéticos como en datos reales, de un filtro inverso estable que usa un valor de Q estimado en un espectro instantáneo suministrado por la MPD, con lo que se logra una recuperación de los espectros de amplitud y de fase de la señal y se obtienen registros de mejor calidad. Los algoritmos que implementan la MPD y el filtro inverso fueron especialmente desarrollados para este proyecto.

Fundamento teórico

Descomposición adaptable tiempo-frecuencia

La técnica de selección adaptable (*matching pursuit decomposition*, MPD) es frecuentemente usada en el procesamiento sísmico para reconstruir señales mediante diccionarios de clases de funciones y hallar aquellas que forman parte de la señal. El diccionario $\{\Psi_j\}_{j=1}^n$ se construye con funciones previamente calculadas, las cuales se estiman y eligen al ajustar mejor la traza sísmica $x(t)$, reconstruyéndola por medio de su combinación lineal: $x(t) = \sum_{j=1}^n s_j \Psi_j$. Estas funciones reciben el nombre de átomos y tienen la siguiente forma compleja:

$$\Psi_j = s^{-1/2} \Psi(t - t_d/s) \exp if_m t \quad (1),$$

donde $i = \sqrt{-1}$, f_m es la frecuencia de modulación, s , el factor de escala y t_d , el tiempo de translación. Se seleccionó la ondícula de Morlet como función madre debido a que se ajusta mejor a las ondas sísmicas e incluye la atenuación y la dispersión

*Correspondencia:

Luis Montes-Vides, lamontesv@unal.edu.co

Recibido: 20 de marzo de 2014

Aceptado: 4 de agosto de 2014

cuantitativas (Sinha, *et al.*, 2005). En cada iteración, el algoritmo MPD busca la ondícula que proporciona la mayor parte de la energía de la señal y la elimina. La energía de la señal se reduce de manera reiterada hasta alcanzar la energía umbral establecida previamente, en tanto que la energía restante se considera ruido. La figura 1S, <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/125/380>, muestra el diagrama de flujo que implementa la MPD, el cual se codificó en MATLAB para el desarrollo del presente trabajo.

Atenuación y dispersión sísmica

Cuando una onda monocromática atraviesa un medio con velocidad de fase c , parte de su energía se disipa en forma de calor. El decaimiento de la señal por ciclo se mide mediante el factor de atenuación $\alpha = Q^{-1}(\omega/2c)$, donde Q es el factor de calidad del factor estimado como $\alpha = 27,3Q^{-1}$ dB por longitud de onda λ . El modelo básico planteado por Kolsky (1956) para la atenuación y dispersión de una onda que se propaga en un medio, se representa mediante el factor Q ; por su simplicidad, dicho modelo es el más utilizado en el procesamiento de datos sísmicos, ya que reproduce exactamente la dispersión de velocidades de fase dentro del ancho de banda de la frecuencia sísmica. La propagación de la onda en el medio viene dada por

$$U(x, \omega) = U_0(\omega) \exp + i(kx - \omega t) \quad (2),$$

donde $U_0(\omega)$ es la transformada de Fourier de la ondícula, k es el número de onda, x , la distancia, t , el tiempo y ω , la frecuencia. El número de onda k se expresa como

$$k(\omega) = \omega/v(\omega) - i\alpha(\omega) \quad (3),$$

donde, según Kolsky (1956), la velocidad de fase $v(\omega)$ y el factor de atenuación $\alpha(\omega)$ están dados por

$$v(\omega)^{-1} = (1 + \ln|\omega/\omega_r|^{-1/\pi Q_r})/v_r \quad (4), \text{ y}$$

$$\alpha(\omega) = |\omega|/(2v_r Q_r) \quad (5),$$

en las que v_r es una velocidad de referencia aproximadamente igual a la velocidad de grupo y Q_r es el factor de calidad a una frecuencia de referencia ω_r . Para materiales que cumplan la suposición de atenuación lineal con la propagación, como es el caso de las rocas, la frecuencia de referencia ω_r no es nula, aunque sí es arbitrariamente pequeña comparada con la menor frecuencia contenida en la señal (Kolsky, 1956). Empero, el modelo de Kolsky no satisface rigurosamente el criterio de fase mínima y las relaciones de Kramers-Krönig. Para que el filtro inverso corrigiera plenamente la dispersión de velocidad, se propuso un modelo válido para frecuencias bajas (menores de 500 Hz), en el cual la velocidad de fase es modelada mediante la ecuación (Wang & Guo, 2004):

$$v(\omega)^{-1} = (1 + \ln|h(\omega/\omega_r)|^{-1/\pi Q_r})/v_r \quad (6),$$

donde h es una constante tal que el valor h/ω_r corresponde a la mayor frecuencia de la banda sísmica, y el factor de

atenuación dado por la ecuación 5 se aproxima a:

$$\alpha(\omega) \approx \frac{|\omega|}{2v_r Q(\omega)} \left| \frac{\omega}{\omega_h} \right|^{-\gamma} \quad (7),$$

en la que $\gamma = (\pi Q_r)^{-1}$ y, en consecuencia, la ecuación 3 se torna en

$$k(\omega) \approx \left(1 - \frac{i}{2Q(\omega)}\right) \frac{|\omega|}{v_h} \left| \frac{\omega}{\omega_h} \right|^{-\gamma} \quad (8);$$

$U(\omega, \tau + \Delta\tau)$ es la continuación del campo de onda $U(\omega, \tau)$ a través de la distancia Δr en un intervalo de muestreo $\Delta\tau$, que, en el dominio de la frecuencia, se representa por:

$$U(\omega, \tau + \Delta\tau) = U(\omega, \tau) \exp\left[\left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma} \frac{\omega\Delta\tau}{2Q(\omega)}\right] \exp\left[i\left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma} \omega\Delta\tau\right] \quad (9),$$

donde el primer exponencial modifica la amplitud y el segundo, la fase. La continuación del campo desde la superficie en $\tau_0 = 0$ hasta un tiempo τ estará dada por

$$U(\omega, \tau) = U(\omega, 0) \exp\left[\int_0^\tau \frac{\omega}{2Q(\tau')} \left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma(\tau')} d\tau'\right] \exp\left[i\int_0^\tau \left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma(\tau')} \omega d\tau'\right] \quad (10),$$

y al denominar el primer exponencial como $\beta(\omega, \tau)^{-1}$, la ecuación se soluciona como problema inverso estabilizado, introduciendo $\Lambda(\omega, \tau) = (\beta(\omega, \tau) + \sigma^2) / (\beta^2(\omega, \tau) + \sigma^2)$, donde σ^2 es el factor estabilizador. La ecuación 10 se escribe ahora como

$$U(\omega, \tau) = U(\omega, 0) \Lambda(\omega, \tau) \exp + i\int_0^\tau \left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma(\tau')} \omega d\tau' \quad (11).$$

La ecuación 11 se resuelve para cada frecuencia, y la integral de estas se expresa en la solución:

$$u(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty U(\omega, 0) \Lambda(\omega, \tau) \exp\left[i\int_0^\tau \left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma(\tau')} \omega d\tau'\right] d\omega \quad (12).$$

Aplicación en sismogramas sintéticos

La descomposición espectral tiempo-frecuencia de una traza sísmica mediante el algoritmo MPD se muestra en el diagrama de flujo de la figura 1S. Este se inicia con la construcción de un diccionario de ondículas de Morlet, implementado como una matriz tridimensional que almacena las ondículas con los rangos de fase y frecuencia dominantes en la traza sísmica. Las ondículas del diccionario de Morlet se construyeron usando los rangos de valores de la tabla 1S, <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/125/384>, en la ecuación:

$$M(t) = \exp(-\gamma f_m^2 t^2) \exp(i2\pi f_m t + \Phi) \quad (13).$$

El rango de tiempo garantiza la presencia de las ondículas de baja frecuencia, mientras que los rangos de frecuencia y de fase incluyen los valores presentes en el ancho de banda de una traza sísmica, y el parámetro γ fija el número de ciclos en la ondícula de Morlet. Usando la transformada de Fourier de la ondícula de Morlet, $M(\omega)$, y el número de onda $k\omega$, definido en la ecuación 8, se construye el sismograma sintético $u(t)$ con la expresión:

$$u(t) = Re \left\{ \frac{1}{\pi} \int_0^\infty M(\omega) \exp[i(\omega t - kr)] d\omega \right\} \quad (14).$$

En un primer paso, se construyó una traza sintética sumando las siguientes convoluciones: la ondícula de Morlet de 20 Hz y fase cero, con los coeficientes de reflectividad 1 y -1 a 300 y 900 ms; la ondícula de Morlet de 30 Hz y fase de 45 °, con los coeficientes de reflectividad 1,1, 1 y 1 a 450, 930 y 1.200 ms, y, finalmente, la ondícula de Morlet de 50 Hz y fase de 90 °, con coeficientes de reflectividad 1 y 1 a 600 y 1.230 ms. La figura 2SA, <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/125/381>, muestra la traza original, 2SB la traza generada con el Diccionario, 2SC el residuo o error entra las trazas anteriores y 2SD el espectro instantáneo $\omega - t$ de alta resolución. Cada impulso del perfil de reflectividad en la figura 2SE coincide con el espectro de cada ondícula en la figura 2SD, lo que permite determinar las bandas de frecuencias de cada ondícula y garantizar el buen desempeño del algoritmo MPD para obtener un espectro altamente confiable.

A continuación se creó un sismograma sintético de 2 s de longitud de registro usando la ecuación 15 en un modelo inelástico, con $Q = 100$ constante, y reflectores cada 300 ms, de los cuales el más somero se situó a 100 ms y se analizó espectralmente mediante el algoritmo MPD, con un umbral para el residuo de energía de 0,1 %. Para observar la modificación de la amplitud y la fase en el cambio de forma de la ondícula, se usó la ondícula de Morlet fase cero de 30 Hz con $\gamma = 10$, la cual tiene menos ondulaciones. La figura 3SA, <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/125/382>, muestra el sismograma generado, en donde se observa la distorsión que sufre la ondícula al disminuir su amplitud y cambiar su forma simétrica inicial de fase cero a una forma asimétrica a medida que avanza. En la figura 3SB, el espectro instantáneo de la traza evidencia la atenuación de los componentes de mayor frecuencia en profundidad. La máxima frecuencia de la ondícula disminuye de 100 Hz en el reflector somero a 55 en el más profundo. Debido a la ausencia de dispersión geométrica y a que los coeficientes de reflectividad son iguales o mayores a uno, el efecto observado es atribuible completamente a los fenómenos de atenuación y dispersión.

Mediante la sustitución $\chi = \omega\tau$, la ecuación de atenuación $A(\omega, \tau) = A_0 \exp[-\omega, \tau / 2Q(\omega)]$ cambia a la expresión lineal:

$$\ln A^2(\omega, \tau) = \ln A_0^2 - \omega\tau / Q(\omega) \quad (15).$$

Al hacer la sustitución $\chi = \omega\tau$, la amplitud del espectro instantáneo pasará a depender solo de χ en lugar de ω y de τ , resultado que cambia la ecuación 15 a la expresión lineal:

$$\ln A^2(\chi) = \ln A_0^2 - \frac{1}{Q} \chi \quad (16),$$

y al denominar como $A_0 = (\chi_a)$ la amplitud en el punto referente χ_a , donde la ecuación 16 alcanza su máximo valor y decae linealmente con χ , esta se reescribe como:

$$\ln A^2(\chi) - \ln A^2(\chi_a) = -(\chi - \chi_a) / Q \quad (17),$$

en tanto que la estimación de Q se hace como la pendiente de una nube de puntos usando una regresión lineal:

$$Q = -[\chi - \chi_a] / \{2 \log [A(\chi) / A(\chi_a)]\} \quad (18).$$

La figura 3SB muestra la distribución de χ con curvas de nivel sobre el espectro instantáneo generado al aplicar el algoritmo MPD sobre la traza de la figura 3SA. Los nuevos valores de $A^2(\chi)$ se calculan sumando los valores del espectro instantáneo situados a lo largo de las curvas de $\chi = \text{constante}$, y así se obtiene el nuevo espectro de energía, como se muestra en la figura 4SA, <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/125/383>, con su máximo valor en $\chi_a = 30$. En el espectro $A^2(\chi)$ se nota la ausencia de amplitudes alrededor de $\chi = 60$ debido a la poca contribución de las amplitudes a lo largo de la curva $\chi = 60$, como se ve en la figura 3SB; de igual manera, se ve que los valores de χ superiores a 500 contribuyen muy poco a la energía total de la traza.

Mediante la ecuación 17, el espectro de la figura 4SA se transforma en el espectro de la figura 4SB, con valores negativos en la abscisa, correspondiendo el cero a $\chi = \chi_a$ de máxima potencia, mientras que los otros valores se normalizan con este punto de referencia. El punto donde se quiebra la tendencia del espectro en la figura 4SB, $\chi = 470$, indica el límite superior de la región donde se puede estimar Q . Mediante la regresión lineal de los datos y con la ecuación 18, se obtuvo un valor estimado de $Q \approx 102$, con un error del 2 %, al compararlo con el $Q = 100$ del modelo.

La función de atenuación normalizada $\bar{A}(\chi)$, estimada en el espectro instantáneo, se suaviza con un filtro para retirar los valores atípicos y luego se determina la curva de ganancia normalizada:

$$\Lambda_d(\chi) = \begin{cases} 1 & \chi \leq \chi_a \\ [\bar{A}(\chi) + \sigma^2] / [\bar{A}(\chi_a) + \sigma^2] & \chi > \chi_a \end{cases}$$

El factor σ^2 estabiliza la parte del filtro inverso que compensa las amplitudes y que está ligada a la relación entre señal y ruido. Al ajustar los datos con límites de ganancia entre 10 y 100 dB, Wang (2008) determinó la relación empírica $\sigma^2 = \exp - (0.23 G_{lim} + 1.63)$, donde G_{lim} es la ganancia

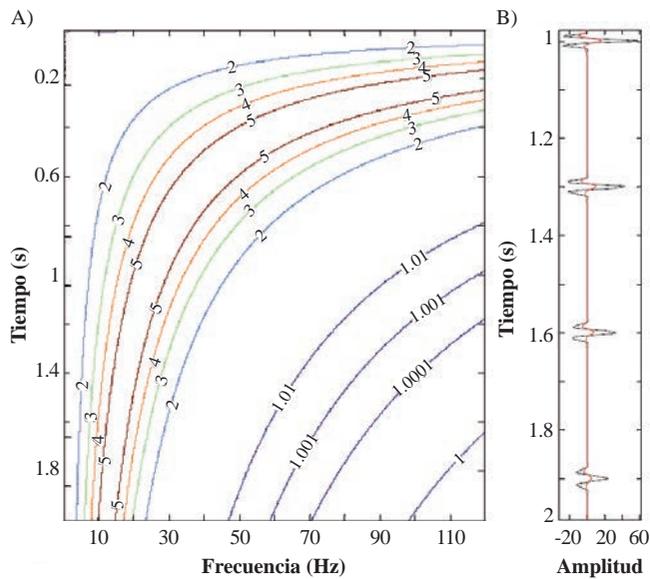


Figura 1. A) Coeficiente de compensación de amplitud $\Lambda(\omega, \tau)$ estimado para el modelo de atenuación constante, $Q = 100$ y $\sigma^2 = 0,01$. B) Intervalo de 1-2 segundos de los sismogramas sintéticos antes (rojo) y después (negro) de aplicar el filtro Q inverso.

máxima esperada en dB. Por otro lado, al definir la función de ganancia teórica $\Lambda(\omega, \tau) = (\beta(\omega, \tau) + \sigma^2) / (\beta^2(\omega, \tau) + \sigma^2)$ con $\beta(\chi, Q) = \exp(-\frac{\chi}{2Q})$, se hace posible estimar el valor de Q mediante la minimización de la función de costo $\sum_{\chi} |\Lambda_d(\chi) - \Lambda(\chi, Q)|$.

El filtro inverso descrito en la sección anterior se probó en el modelo sintético asumiendo un $\sigma^2 = 0,01$ y un límite de ganancia de 50 dB, pues en los datos sintéticos se pueden asumir altos niveles de ganancia. La figura 1A muestra el coeficiente de compensación de amplitud $\Lambda(\omega, \tau)$, donde la máxima compensación está alrededor de 5, la cual disminuye con la frecuencia y el tiempo de viaje. La amplitud se compensa cuando la frecuencia es menor a 45 Hz, mientras que para frecuencias mayores, la compensación Λ es aproximadamente de 1, la cual corresponde a la información por debajo del nivel del ruido. Por otro lado, en las frecuencias bajas surgidas a lo largo del tiempo, la compensación también es baja, con valores de alrededor de 2, así como es alta en las frecuencias altas presentes en la parte somera del registro, lo que garantiza que, en el peor escenario, el factor no compense las amplitudes, pero tampoco disminuya las originales. La figura 1B presenta el sismograma sintético antes (marrón) y después (negro) de retirar la atenuación y la dispersión mediante el filtro Q inverso, limitado al último segundo para una mejor observación. Se aprecia la corrección de fase que contrarresta el efecto de dispersión de la velocidad, tornando a cero la fase de la ondícula, así como la restauración de la amplitud.

Aplicación en los datos sísmicos preapilados

El procedimiento de análisis espectral instantáneo con el filtro inverso Q se hace traza a traza, y es aplicable a las trazas de un registro con punto medio común. Se utilizó un registro CDP (*Common Depth Point Gather*, CDP) de una sección sísmica marina cuyo relleno sedimentario consta, en general, de una secuencia de sedimentos carbonáticos y siliciclásticos del Paleógeno, seguida por una secuencia siliciclástica del Neógeno, registrada con intervalo de grupo de 100 m, 2 ms de rata de muestreo y una longitud de registro de 5 s.

La figura 2A muestra una de las trazas del registro CDP, en tanto que la figura 2B muestra el factor de compensación $\Lambda(\omega, \tau)$, con un comportamiento similar al observado en los datos sintéticos, pero con un ancho de banda menor, que alcanza una frecuencia máxima a 35 Hz aproximadamente y valores Λ de 1,01. La figura 2C muestra el espectro de energía en función de χ , el cual corresponde a los primeros 2,5 s de registro después de la recuperación de las amplitudes por dispersión geométrica. La figura 2D muestra las curvas de ganancia controlada, tanto la teórica como la estimada a partir de los datos, con un buen ajuste entre ellas, lo que evidencia la confiabilidad del método con error de estimación, como se ve en la figura 2E. El punto mínimo,

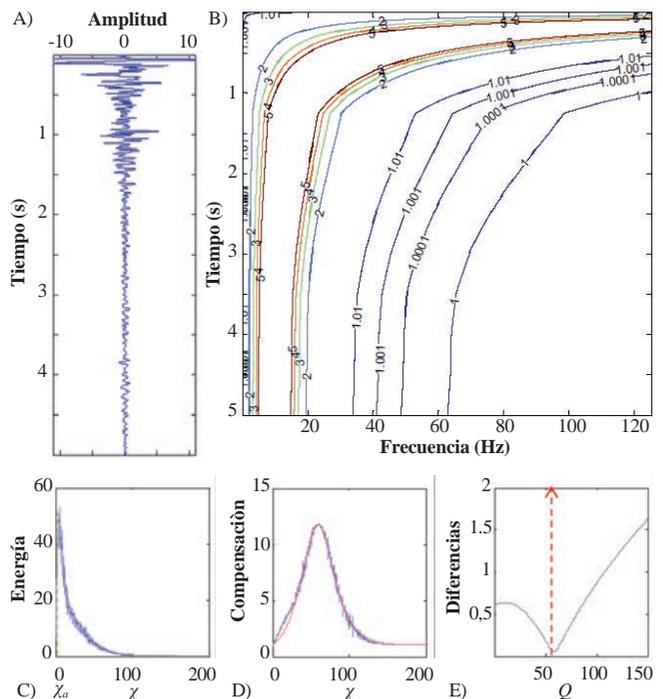


Figura 2. A) Traza sísmica del registro CDP, B) Coeficiente de compensación de amplitud $\Lambda(\omega, \tau)$ estimado en la traza, C) Espectro de energía de la traza en función de χ , D) Curva de compensación teórica (línea suave) y curva estimada de los datos (línea rugosa), y E) Error en su estimación, donde el mínimo define el valor de Q .

Tabla 1. Valores promedio de Q estimados desde el tope de la sección sísmica y valores de Q_{int} asociados a cada intervalo de tiempo

Tiempo (s)	Q	Tiempo (s)	Q_{int}
0 – 1,25	37,98	0 – 1,25	37,98
0 – 1,5	43,56	1,25 – 1,5	164,13
0 – 2	52,25	1,5 – 2	130,13
0 – 2,5	58,81	2 – 2,5	118,14
0 – 3	64,68	2,5 – 3	129,12
0 – 3,5	71,12	3 – 3,5	176,65
0 – 4	79,62	3,5 – 4	487,31
0 – 4,5	89,19	4 – 4,5	2320,69
0 – 5	97,84	4,5 – 5	769,52

indicado por una flecha, corresponde al valor de Q estimado, que en este caso fue de 58,81. Los valores de Q estimados para los diferentes intervalos de tiempo se consignan en la segunda columna de la tabla 1; dichos valores fueron usados posteriormente por el filtro Q inverso para aplicarlos al registro. Con los Q estimados, se calculó el valor Q_{int} para cada intervalo de tiempo especificado en la tercera columna, el cual se consignó en la cuarta columna de la tabla 2.

La figura 3 muestra el registro CDP antes (A) y después (B) de aplicar el filtro Q inverso. Se observa una mayor resolución en el registro filtrado, lo que permite una mejor definición de los eventos debido a la compresión de la ondícula, al mismo tiempo que se presenta una mayor continuidad lateral en

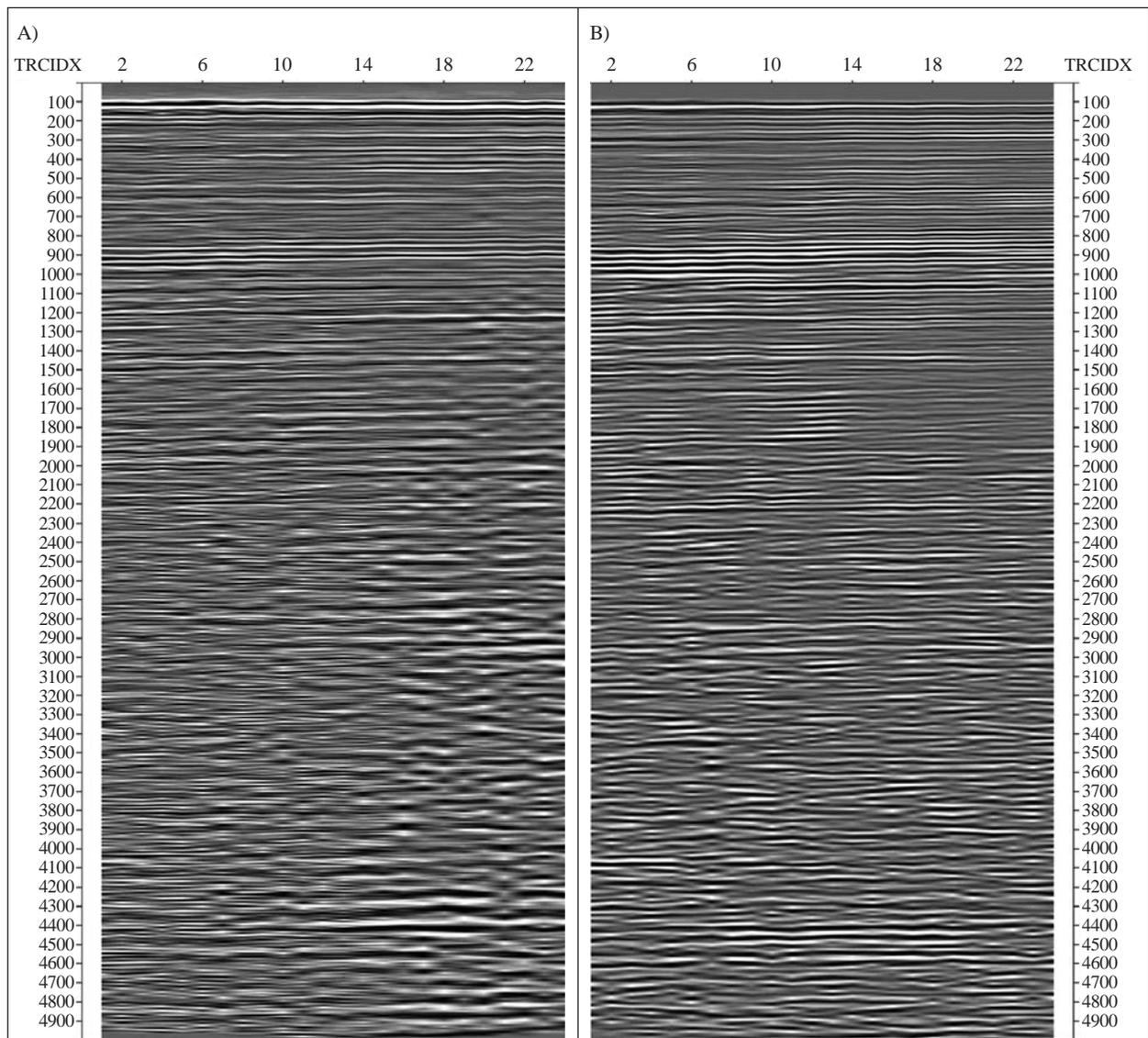


Figura 3. Registro CDP de la sección sísmica antes (A) y después (B) de aplicar el filtro Q inverso.

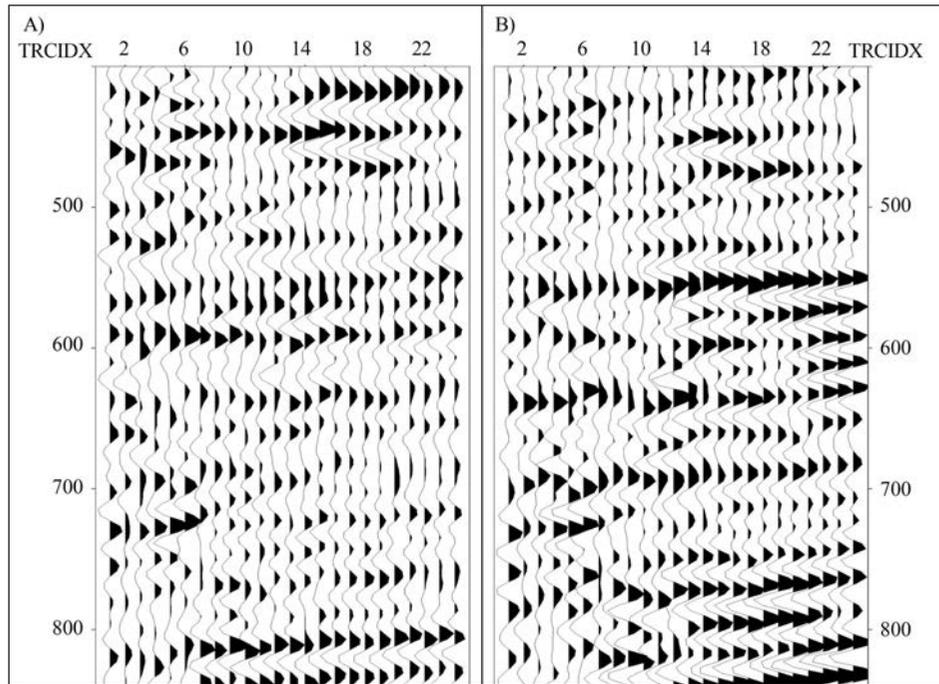


Figura 4. Amplificación del intervalo somero de 400-820 s del registro CDP original (A) y después (B) del filtro Q inverso

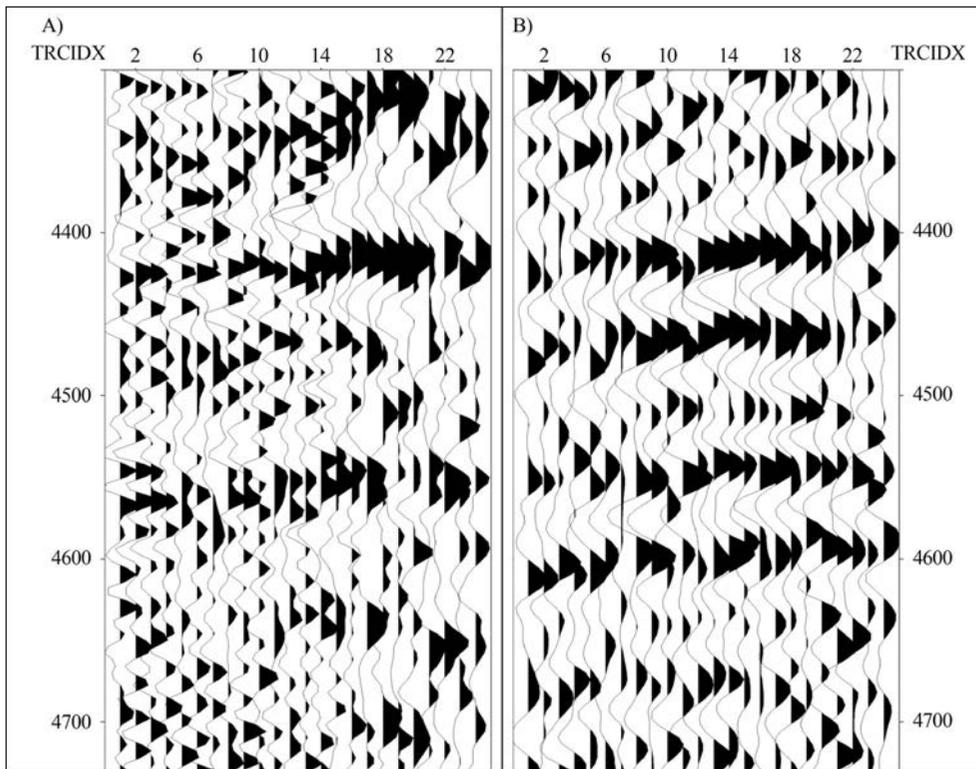


Figura 5. Amplificación del intervalo profundo de 4.300-4.720 s del registro CDP original (A) y después (B) de aplicar el filtro Q inverso

algunos de ellos. La figura 4 amplifica el intervalo somero de 400 - 820 ms de la figura 3, donde, después de aplicar el filtro, se logra una mejor definición de los eventos entre los 550 y 650 ms, así como una continuidad lateral ostensible. También se nota la aparición de un reflector alrededor de los 680 ms, y de otro entre los 750 y 820 ms. Se debe tener en cuenta que los datos preapilados tienen una relación entre señal y ruido menor que los datos apilados.

La figura 5 amplifica el intervalo profundo de 4.300 - 4.720 ms; en esta, algunas reflexiones, que lucen ruidosas y con fase no cero en el registro CDP original, logran una mejor definición mediante la compresión de las ondículas. Algunos eventos que no son claros en el registro original se evidencian después de aplicar el filtro, entre ellos, los eventos de amplitud positiva de 4.450 a 4.600 ms. Aunque la información de preapilamiento contiene mayores niveles de ruido, el proceso de filtro inverso Q logra reducirlos y mejorar la continuidad y el contenido de frecuencias de la sección, perfeccionando la calidad de las imágenes.

Conclusiones

Los filtros Q se emplean rutinariamente para recuperar el ancho de banda de los datos sísmicos mediante la introducción

de artefactos en las imágenes del subsuelo por distorsión de fase. Se implementó un filtro inverso que recupera el espectro de amplitud sin distorsionar la fase y mejora la relación entre señal y ruido mediante un factor de compensación y sin amplificar el ruido al final de los registros. Para garantizar la confiabilidad en los valores de Q usados por el filtro, su estimación se lleva a cabo en un espectro instantáneo suministrado por un algoritmo que implementa la transformada adaptable en tiempo-frecuencia, reduciendo la incertidumbre sobre este parámetro. El algoritmo que implementó el filtro Q inverso se ensayó en datos sintéticos, lo que permitió revertir los fenómenos de atenuación y distorsión del sismograma sintético. Posteriormente, se aplicó a un registro CDP libre de dispersión geométrica al cual se le aplicó corrección dinámica. Se obtuvo así un registro con mayor resolución al comprimir la ondícula y una mejor continuidad lateral de los reflectores, tanto en la parte somera como en la parte profunda del registro. Las dos zonas amplificadas permitieron separar e identificar eventos asociados a los reflectores que mostraban una mejoría en su continuidad lateral. Los algoritmos que implementan la descomposición adaptable y el filtro Q inverso fueron especialmente desarrollados para esta investigación.

Información suplementaria

Figura 1S. Diagrama de flujo del algoritmo MPD que realiza la descomposición adaptativa

Figura 2S. A) Sismograma original, B) Sismograma reconstruido mediante el diccionario, C) Error cometido al reconstruir el sismograma, D) Espectro instantáneo generado por el MPD y E) Perfil de reflectividad. Se observa la resolución de este espectro al compararlo con el perfil de reflectividad.

Tabla 1S. Rango de valores usados en la generación del diccionario

Figura 3S. A) Sismograma sintético generado, B) Espectro instantáneo del sismograma y superposición de las curvas de nivel de χ .

Figura 4S. A) Espectro de energía en función de la variable χ , y B) Representación del espectro según la ecuación 18, donde la pendiente es Q .

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia por apoyar y facilitar el desarrollo de esta investigación, así como a la Universidad de Houston, por suministrar los datos usados en este proyecto. Los resultados aquí presentados se lograron en el desarrollo de la tesis de Maestría en Geofísica del geólogo Álvaro Corrales.

Bibliografía

Castaño, K., Ojeda, G., Montes, L. 2011. Thin-layer detection using spectral inversion and a genetic algorithm. *Earth Sci. Res. J.* **15**: 121-128.

Haase, A., Stewart, R. 2006. Intrinsic and apparent seismic attenuation in VSP data, SEG Technical Program Expanded Abstracts 2006: 3472-3476.

Kazemeini, S., Yang, C., Juhlin, C., Formel, S. 2010. Enhancing seismic data resolution using the prestack blueing technique: An example from the Ketzin CO₂ injection site, Germany. *Geophysics.* **75**: 101-110.

Kolsky, H. 1956. The propagation of stress pulses in viscoelastic solids. *Philosophical Magazine.* **1**: 693-710.

Liu, J., Marfurt, K. 2005. Matching pursuit decomposition using Morlet wavelets. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2005:786-789

- Montana, C., Margrave, G.** 2005. Comparing three methods for inverse Q filtering. CSEG National Convention: 1-4.
- Raikes, S., White, R.** 1984. Measurements of earth attenuation from downhole and surface seismic recordings. *Geophysical Prospecting*. **32**: 892-919.
- Ramírez-Cruz, L., Vale-García, R., Urrutia, J.** 2005. Enhanced oil production in a mature field assisted by spectral attenuation analysis. *J. Geophys. Eng.* **2**: 48-53.
- Reine, C., Van der Baan, M., Clark, R.** 2009. The robustness of seismic attenuation measurements using fixed- and variable-window time-frequency transforms. *Geophysics*. **74**: 123-135.
- Sinha, S., Routh, P., Anno, P., Castagna, J.** 2005. Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform. *Geophysics*. **70**: P19-P25.
- Smith, M., Perry, G., Stein, J., Bertrand, A., Yu, G.** 2008. Extending seismic bandwidth using the continuous wavelet transform. *First break*. **26**: 97-102.
- Tonn, R.** 1991. The determination of seismic quality factor Q from VSP data: A comparison of different computational methods. *Geophysical Prospecting*. **39**: 1-27.
- Walls, J., Taner, M., Ude, R., Singleton, S., Derzhi, N., Mavko, G., Dvorkin, J.** 2006. Novel use of P- and S-wave seismic attenuation for deep natural gas exploration and development. Final Report DE-FC26-04NT42243: 83-94.
- Wang, Y., Guo, J.** 2004. Modified Kolsky model for seismic attenuation and dispersion. *J. Geophys. Eng.* **1**: 187-96.
- Wang, Y.** 2006. Inverse Q-filter for seismic resolution enhancement. *Geophysics*. **71**: V651-V660.
- Wang, Y.** 2007. Seismic time-frequency spectral decomposition by matching pursuit. *Geophysics*. **72**: V13-V20.
- Wang, Y., Lu, J., Shi, Y., Yang, Ch.** 2009. PS-wave Q estimation based on the P-wave Q values. *J. Geophys. Eng.* **6**: 386-389.
- Xu, C., Stewart, R.** 2006. Seismic attenuation (Q) estimation from VSP data and Q P versus Vp/Vs. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2006: 1938-1942.

Mineralization and sorption of ^{14}C -glyphosate in samples from three soil types collected in El Espinal, Colombia

Jairo Leonardo Cuervo*, Cilia Leonor Fuentes

Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Abstract

We studied the mineralization and sorption of ^{14}C -glyphosate in samples of three soil types from El Espinal municipality (Tolima) with different land use history: (1) soil subjected to pesticide use and sowing of annual crops (mainly rice) during 30 years; (2) soil in rest for five years with sown grassland, and (3) secondary semidry forest soil without record of pesticide use. The ^{14}C -glyphosate mineralization in the soil samples was effected in biometers. One hundred and six days after the incubation with the herbicide, 53%, 38% and 23% of the glyphosate was mineralized in the forest, grass and rice-crop soil samples, respectively. The glyphosate sorption phenomenon (adsorption-desorption) was adjusted to the Freundlich model. The $K_{d_{des}}$ values for forest, grassland and rice-crop soil samples were 17.00, 1.83 and 3.10, respectively. The low rate of glyphosate mineralization allowed us to infer that the glyphosate can become an environmental pollution problem due to its high persistence in the soil.

Key words: Herbicides, microorganisms, radiomarked, pollution, rice.

Mineralización y adsorción del ^{14}C -glifosato en muestras de tres tipos de suelo provenientes de El Espinal, Colombia

Resumen

Se estudió la adsorción y la mineralización de ^{14}C -glifosato en muestras de tres tipos de suelo provenientes del municipio de El Espinal, Tolima, con diferente historia de uso: (1) un suelo con historia de uso de pesticidas durante 30 años y cultivos anuales (principalmente arroz); (2) un suelo en receso de 5 años con pasto de corte, y (3) un suelo de bosque secundario semiseco sin registro de uso de plaguicidas. La mineralización del ^{14}C -glifosato en los suelos se efectuó en biómetros. A los 106 días de la incubación con el herbicida, 53 %, 38 % y 23 % del glifosato estaba mineralizado en los suelos de bosque, de pasto de corte y cultivo de arroz, respectivamente. El fenómeno de adsorción del glifosato (adsorción-desorción) se ajustó al modelo de Freundlich. Los valores $K_{d_{des}}$ para los suelos de bosque, pasto de corte y cultivo de arroz fueron 17,00, 1,83 y 3,10, respectivamente. La baja tasa de mineralización del glifosato permite inferir que este puede convertirse en un problema de contaminación del medio ambiente debido a su alta persistencia en el suelo.

Palabras clave: herbicidas, microorganismos, radiomarcaje, contaminación, arroz.

Introduction

Pesticide sorption in soils is regulated by the molecular properties of the pesticide and by the characteristics of the soil adsorbent surfaces, which determine the type of interactions established between pesticide molecules and soil adsorbent surfaces, relations that have been explained in detailed by Calvet, *et al.* (2005). Roy, *et al.*, (1989) and Feng & Thompson (1990) have emphasized that the complex nature of adsorption and the pH are two of the most important factors regulating sorption phenomena. In the first case, adsorption is very much related to organic matter contents and to the quantity and nature of clays. Thus, ion pesticides are highly adsorbed by soils rich in oxides and metallic

hydroxides while cationic pesticides are adsorbed by soils with high content of clays (montmorillonite and vermiculite, mainly) and organic matter (Calvet, *et al.*, 2005). Calvet, *et al.*, (2005) also explained how the type of interaction and the adsorption mechanism depend on pH levels in the case of ionic pesticides, acids and weak bases. In weak acids (like glyphosate), the proportion of the non-ionized molecules (with a higher K_{wo} than ionized molecules) increases when the pH decreases; so, the importance of the polar interactions

*Correspondencia:

Jairo Leonardo Cuervo, jlcuervo@unal.edu.co

Recibido: 16 de agosto de 2013

Aceptado: 2 de agosto de 2014

in hydrogen binding and, therefore, of the interchange mechanism with water molecules, increase. When the pH increases, the proportion of ionizable molecules also increases, and hence, the electrostatic repulsion. With regard to the properties of compounds, four of these properties have influence on adsorption: the ionization (mentioned previously), the distribution of electric charges in the molecule, the molecular structure, and the partition characteristics (solubility in water, Kow, FBC and Koc); **Calvet, et al.**, (2005) have expounded the influence of molecular properties on adsorption in detail.

Ion interchange is among pesticides adsorption mechanisms. This exchange occurs between the organic cations present in the soil solution and the inorganic cations placed on the adsorbent surface. It is an index that measures the capacity of a pesticide molecule to be retained by the soil organic matter or by the clays. The cationic compounds can be adsorbed by the negative charges of the clays and the organic matter as if treated to another cation (interchange of cations). The anions are adsorbed mainly by the organic matter and by the iron and aluminium oxyhydroxides; in this case, the adsorption will be influenced by the pH (**Sprankle, et al.**, 1975b; **Hance, 1976; Nomura & Hilton, 1977; Roy, et al.**, 1989; **Feng & Thompson, 1990**).

Once the glyphosate is in contact with the soil, it is quickly bound to soil particles and inactivated (**Sprankle, et al.**, 1975a; **Roy, et al.**, 1989; **Feng & Thompson, 1990**). This adsorption occurs quickly, during the first hour after its application, but later it slows down (**Sprankle, et al.**, 1975b). Glyphosate molecules have several binding mechanisms to soil: they can bound to the oxydic fraction of soil or be adsorbed electrostatically by clay minerals and organic matter through the formation of hydrogen bridges (**Aubin & Smith, 1992; Haney, et al.**, 2000; **Veiga, et al.**, 2001). Additionally, glyphosate is a dipolar organic compound and, for this reason, it exhibits a quick and high rate of adsorption to iron and aluminium oxides and hydroxides, such as soil organic matter, as it has been evidenced in different studies (**Guarracino, et al.**, 1998; **Forlani, et al.**, 1999; **Prata, et al.**, 2000; **Haney, et al.**, 2000).

Other authors indicate that glyphosate adsorption increases when clays content and soil cation exchange capacity increase, and when soil pH and phosphorus content decrease (**Sprankle, et al.**, 1975a, b; **Hance, 1976; Nomura & Hilton, 1977; Rueppel, et al.**, 1977; **Glass, 1987**). Glyphosate binds to soil particles through the phosphonic acid group, competing for the sites that bind to inorganic phosphates in the soil (**Rueppel, et al.**, 1977).

Those glyphosate molecules that remain in the soil solution, without binding to soil constituents, are degraded at a constant and relatively quick rate by soil microorganisms.

Bound molecules are also degraded biologically at a constant but slow rate (**Nomura & Hilton, 1977; Rueppel, et al.**, 1977). Glyphosate, therefore, can persist in soils and in aquatic environments. **Sprankle, et al.**, 1975a; **Hance, 1976; Nomura & Hilton, 1977**). **Newton, et al.**, (1994) and **Veiga, et al.**, (2001) have corroborated that glyphosate fixed by adsorption is more persistent in soil because its degradation is slower than the herbicidal action in the soil solution, since the wastes bound to the solid fraction of soil are hardly accessible to the main herbicide-degrading microorganisms.

Glyphosate average life in soil has been calculated to be around two months, but this can vary from several weeks to years (**Nomura & Hilton, 1977; Rueppel, et al.**, 1977; **Roy, et al.**, 1989; **Feng & Thompson, 1990; Anton, 1993**). Although the strong adsorption of glyphosate to soil allows persistent wastes, these are immovable and there is no significant leaching. **Feng & Thompson (1990)** found that glyphosate wastes were present in the first 15 cm of the soil profile, while herbicide wastes were found at 35 cm of depth. However, in spite of glyphosate immobility in soil and its low leaching risk, studies by the French environment institute carried out between 2001 and 2002 found that glyphosate occupied the tenth place among those pesticides used in France that were polluting ground waters, and the fourth place among those polluting surface waters (**Calvet, et al.**, 2005).

Although glyphosate is not recommended for direct use in soil, a significant amount can reach the soil when it is used for the control of undesirable emerging plants (**Haney, et al.**, 2000). As it was indicated previously, an important characteristic of glyphosate is its capacity to be adsorbed by soil particles and to remain biologically inactive as herbicide, but the persistence of its phytotoxic activity for several weeks after its use has also been demonstrated (**Anton, 1993; Carlisle & Trevors, 1988; Feng & Thompson, 1990; Giesy, et al.**, 2000; **Heinonen-Tanski, 1989; Newton, et al.**, 1984; **Nomura & Hilton, 1977; Rueppel, et al.**, 1977; **Weber, 1994**).

This indicates that the function of adsorption in glyphosate bioavailability and biodegradation is not totally conclusive.

Microorganisms metabolize glyphosate under aerobic conditions transforming it to compounds such as AMPA, sarcosine, water, CO₂ and inorganic phosphorus (**Schuette, 1998**). In studies undertaken by **Haney, et al.**, (2002) it has been demonstrated that glyphosate addition to soil increases microbial activity measured by means of CO₂ evolution products of soil respiration. Besides, it was found that when the herbicide dose is increased, CO₂ production also raises; this allowed the authors to deduce that soil microbial communities proliferate by using the herbicide as energy source, and given that glyphosate degradation is mainly due

to microbial activity, a quick dissipation of the herbicide is to be expected. Mamy's research work in France (2004) indicated that mineralization is the main cause of glyphosate dissipation; after 140 days of incubation at 28°C of a calcareous clayey loam soil treated with the herbicide, 70% of the parental compound had mineralized and 10% remained as bound, non-extractable wastes.

Glyphosate behaviour in soil has been very much studied in other latitudes, but there is lack of information regarding tropical soils, in general, and of Colombian soils, specifically. The main objective of our work was to study glyphosate sorption and mineralization in samples of three soil types from an agricultural area in the department of Tolima, Colombia.

Materials and methods

¹⁴C-glyphosate mineralization in the samples of the three soil types under microcosm conditions

The samples were collected from three areas in the municipality of El Espinal, Department of Tolima, subjected to different land uses: one had been dedicated to the sowing of annual crops (mainly rice) and subjected to continued use of pesticides for more than 30 years; a second sample came from a grassland area with no reported pesticide use during the previous five years, and the other sample came from a secondary forest with no reported use of pesticides. Each soil sample was homogenized and sieved with a 2 mm mesh. The experiment was conducted under microcosm conditions using 500 ml biometers. An amount of 100 g of soil was deposited on a non-sterilized dry base in each biometer and treated with a Roundup solution equivalent to 144 mg of glyphosate isopropylamine salt/kg of soil, plus one ¹⁴C-radiomarked solution (glyphosate isopropylamine salt, SIGMA; specific activity: 2.2 mCi/mmol to obtain an activity of approximately 2.2 x 10⁶ DPM (1 µCi) per 100 g of soil by biometer. The ¹⁴C-glyphosate quantity was equal to 0.0072 mg/kg of soil, i.e., a negligible amount. The herbicide mixture (commercial "cold" and ¹⁴C glyphosate "warm") was homogenized with the soil by waving the treated soil in hermetically sealed plastic bags. This herbicide concentration was calculated based on a field dose of 3 l/ha of Roundup, and considering an extreme situation of the soil in which all the product falled to the soil and remained in the first 2 mm soil layer (Roberts, et al., 2003). Repetitions were done in four biometers for each one of the soil samples for a total of 12 biometers.

Mineralization was measured taking the resulting ¹⁴CO₂ quantity produced by the mineralization of the radiomarked glyphosate, which was collected in a NaOH 0.3 N solution disposed on the lateral arm of the biometer. Biometers were disposed in an incubator (WTB Binder, BD 115 model), in the dark, and at 28 ± 2°C. Evaluations of the ¹⁴CO₂ were done

at days 1, 3, 6, 10, 15, 22, 36, 50, 64, 78, 92 and 106 after the beginning of the test. In each observation, the NaOH solution was changed and the ¹⁴CO₂ was determined in aliquots of 1,00 ml of the solution, later disposed in 20 ml glass vials, and then 10 ml of scintillation liquid for watery solutions was added (Ultra Gold DXR Packard BioScience), to be read in a scintillation counter (Beckman LS 5600). In the final stage of the experiment, a soil sample of 1 g was deposited in an oxide burner to determine the amount of ¹⁴C-glyphosate that stayed bound to the soil for balancing mass. Later on, we used the resulting data to produce ¹⁴C percentage curves opposing initial activity percentage to time.

¹⁴C-glyphosate adsorption – desorption in the samples from the three soil types

For this experiment we prepared six solutions (C1 to C6) of glyphosate isopropylamine salt (Roundup®) mixed with a radiomarked solution of ¹⁴C-glyphosate (glyphosate isopropylamine salt, SIGMA; specific activity: 2.2 mCi/mmol in CaCl₂ 0,01M for a final concentration of isopropylamine salt between 0.0144 and 0.0864 mg/kg of soil, and an activity of approximately 5x10⁴ DPM per 2 g of soil (Table 1). The initial activity of each of these solutions was measured by liquid scintillation using scintillation liquid for watery solutions (Ultra Gold DXR Packard BioScience) in the scintillation counter (Beckman LS 5600).

The experiment was conducted using 25 ml glass centrifuge tubes, which were salinized with dichlorodimethylsilane 5% in toluene to prevent the adsorption of pesticides on the tube walls (Harris, 1992; Pérez, et al., 2005); 2 g of dry soil were weighed in the air and 5 ml were added to the

Table 1. Mineralogical analysis of clays in the samples from the three soil types under study

Minerals	Grassland soil	Rice-crop soil	Forest soil
Constitution	Percentage		
Interstratified smectite (montmorillonite)	+ 6	+ 10	+ 7
Mica	----	----	----
Amphibol	+ 8	++17	++ 17
Caolinite	++ 24	++ 25	++ 20
Quartz	----	tr	----
Cristobalite	++ 22	++ 21	+++ 42
Feldspars	++ 16	----	+ 10
Chlorite	+ 6	+ 5	----
	+ 7	+ 7	tr
	+ 8	+ 13	tr

++++: Dominant (>50%); +++: Abundant (30-50%); ++: Common (15-30%); +: Present (5-15%); tr: Trace (<5%) ?; Doubtful
 Analysis by the Chemical Laboratory of Soils, Agustin Codazzi Geographical Institute, Bogotá, D.C., Colombia

respective solution with four repetitions by dilution per soil type. They were then put in an Eberbach horizontal agitator for 24 hours at 16 rpm, and the supernatant was isolated by centrifuging (MLW T 25 centrifuge) at 10.000 rpm for 15 min. The aliquot activity of 1.00 ml supernatant was then determined by means of liquid scintillation in a scintillation counter (Beckman LS5600).

Desorption was determined by carefully removing the remnant solution with a micropipette. Then, 5.00 ml of the CaCl_2 0,01M solution were added to each tube and were taken to an Eberbach horizontal agitator for 24 hours, after which they were centrifuged for 15 minutes and the ^{14}C activity present in the solution was determined, considering it as desorbed by the soil. A correction was required due to the small amount of the solution (1 ml, approximately), which was impossible to isolate from the soil because the tubes were weighed before and after adding the CaCl_2 0,01M solution (Valencia, 2005).

Glyphosate concentration in the solution at adsorption equilibrium point was determined by means of the following equation:

$$C_{ea} (\mu\text{g/ml}) = \frac{Aed (DPM) \times C_i (\mu\text{g/ml})}{Ai (DPM)}$$

where C_{ea} ($\mu\text{g/ml}$) is the glyphosate concentration in the solution at the desorption equilibrium point; Aed (DPM) is the solution activity at the desorption equilibrium point; C_i ($\mu\text{g/ml}$) is the total concentration in the initial dilution of glyphosate (cold + marked), and Ai (DPM) is the activity of the initial dilution of glyphosate.

The amount of glyphosate adsorbed by gram of soil was calculated as the difference between the initial quantity and the quantity at the adsorption equilibrium point by means of the following equation:

$$\mu\text{g glyphosate/g soil} = \frac{\text{Initial dilution quantity} - \text{Quantity in equilibrium}}{\text{Sample weight}}$$

$$\mu\text{g glyphosate/g soil} = \frac{C_n - \text{Concentration in equilibrium} \times \text{volume}}{\text{Sample weight (g)}}$$

Glyphosate concentration in the solution at the desorption equilibrium point was determined by means of the following equation:

$$C_{ed} (\mu\text{g/ml}) = \frac{Aed (DPM) \times C_i (\mu\text{g/ml})}{Ai (DPM)}$$

where C_{ed} ($\mu\text{g/ml}$) is the glyphosate concentration in the solution at the desorption equilibrium point; Aed (DPM)

is the solution activity at the desorption equilibrium point; C_i ($\mu\text{g/ml}$) is the total concentration in the initial dilution of glyphosate (cold + marked), and Ai (DPM) is the initial dilution activity of glyphosate.

The concentration of the remnant solution from the desorption experiment was calculated by means of the following equation:

$$C_r (\mu\text{g/ml}) = \frac{\text{Remnant volume (ml)} \times C_{ea} (\mu\text{g/ml})}{\text{Total volume (ml)}}$$

where C_r ($\mu\text{g/ml}$) is the glyphosate concentration in the remnant solution.

The glyphosate desorbed by gram of soil was calculated with the following equation:

$$\frac{\mu\text{g glyphosate}}{\text{g soil}} = \frac{C_{ed} (\mu\text{g/ml}) - C_r (\mu\text{g/ml})}{\text{Dry soil weight (g)}} \times \frac{\text{Total volume (ml)}}{\text{volume (ml)}}$$

Bound and extractable glyphosate were determined by means of the equation:

$$C_{(l+e)} (\mu\text{g/g}) = (\text{adsorbed glyphosate} - \text{desorbed glyphosate}) (\mu\text{g/g}),$$

where $C_{(l+e)}$ ($\mu\text{g/g}$) is the bound glyphosate+extractable by gram of soil.

After the soil was subjected to multiple extractions with organic solvent, it was possible to obtain the bound glyphosate, i.e., that one which is bound to the soil probably through strong chemical bindings. In this study, the bound and extractable wastes were determined jointly as the difference between the adsorbed and desorbed pesticide, and this fraction was called bound fraction.

Mass was balanced in order to establish the percentage of the substance that can be recovered after an adsorption-desorption experiment from the quantity of nominal substance present at the beginning of the process. Possible loss of pesticide was determined through the following equation:

$$B.M. (\%) = \frac{C_{ed}^* (\mu\text{g}) + (C_{l+e}^*) (\mu\text{g}) + C_{ed}^* (\mu\text{g}) + C_r^* (\mu\text{g})}{C_i^* (\mu\text{g})} \times 100,$$

where C_{ed}^* (μg) is the glyphosate quantity in the solution at the adsorption equilibrium point; (C_{l+e}^*) (μg) is the glyphosate quantity in the solution at the desorption equilibrium point; C_{ed}^* (μg) is the glyphosate quantity in the remnant solution; C_r^* (μg) is the bound and extractable glyphosate quantity, and C_i^* (μg) is the total quantity in the initial dilution of glyphosate (cold + marked).

The results of the adsorption, desorption, bound wastes and mass balance processes using glyphosate are shown in Table 2. The evaluation was made on all three types of soils at six levels of concentration.

Table 2. Preparation of initial diluted solutions of glyphosate for the adsorption-desorption experiment in the samples from the three soil types under study

Roundup® solution C _n	Concentration of ¹⁴ C (µg/ml acid glyphosate)	Roundup® concentration (µg/ml isopropylamine salt)	Total concentration (µg/ml)	Final concentration in the soil (µg)
C ₁	0.01	0.0044	0.0144	0.036
C ₂	0.01	0.0188	0.0288	0.072
C ₃	0.01	0.0332	0.0432	0.108
C ₄	0.01	0.0476	0.0576	0.144
C ₅	0.01	0.062	0.072	0.180
C ₆	0.01	0.0764	0.0864	0.216

C_n: Different total glyphosate concentrations

Table 3. Adsorption, desorption and bound waste of ¹⁴C-glyphosate in the samples from the three soil types under study

Soil	Solution	Concentration Cold +marked (µg/ml)	Activity Initial solution DPM	Adsorbed glyphosate			Desorbed glyphosate			Bound glyphosate (µg/g soil)	Mass balance (%)
				Activity (DPM)	Concentration (µg ml ⁻¹)	(µg/g of soil)	Activity (DPM)	Concentration (µg/ml)	(µg/g of soil)		
Rice crops	C1*	0.02	10,698.72	8,024.04	0.0190	0.0475	153.07	0.000199	0.000497	0.047038	66.2
	C2	0.03	10,718.85	8,039.14	0.0332	0.0816	134.20	0.000356	0.000875	0.080753	64.0
	C3	0.05	10,925.17	8,193.88	0.0475	0.1159	172.46	0.000639	0.001555	0.114347	62.1
	C4	0.06	10,635.04	7,976.28	0.0612	0.1456	158.23	0.000838	0.002007	0.143552	69.5
	C5	0.08	10,713.17	8,034.88	0.0752	0.1860	220.66	0.001411	0.003489	0.182547	61.3
	C6	0.09	10,752.44	8,064.33	0.0893	0.2125	221.88	0.001369	0.003265	0.209201	66.0
Forest	C1	0.02	10,698.72	5,349.36	0.0161	0.0389	899.27	0.000731	0.001769	0.037107	82.3
	C2	0.03	10,718.85	5,359.43	0.0271	0.0675	872.41	0.001389	0.003470	0.064074	75.0
	C3	0.05	10,925.17	5,462.59	0.0377	0.0938	927.34	0.002003	0.004999	0.088819	75.7
	C4	0.06	10,635.04	5,317.52	0.0466	0.1165	1,068.55	0.002915	0.007287	0.109186	79.2
	C5	0.08	10,713.17	5,356.59	0.0564	0.1366	1,106.16	0.003354	0.008155	0.128449	75.7
	C6	0.09	10,752.44	5,376.22	0.0648	0.1620	1,175.17	0.003892	0.009743	0.152290	73.1
Grassland	C1	0.02	10,698.72	2,674.68	0.0190	0.0480	129.93	0.000197	0.000486	0.047531	85.7
	C2	0.03	10,718.85	2,679.71	0.0332	0.0855	145.40	0.000334	0.000880	0.084605	80.4
	C3	0.05	10,925.17	2,731.29	0.0474	0.1229	154.82	0.000466	0.001209	0.121709	76.4
	C4	0.06	10,635.04	2,658.76	0.0609	0.1533	170.68	0.000610	0.001538	0.151761	79.9
	C5	0.08	10,713.17	2,678.29	0.0742	0.1978	197.87	0.000913	0.002433	0.195326	80.0
	C6	0.09	10,752.44	2,688.11	0.0867	0.2105	219.00	0.000928	0.002246	0.208244	77.5

*: Average values of 4 repetitions

Reading volume = 1 ml; extract volume = 5 ml; approximate soil weight = 2.00 g; contact time = 24 h

Using the data obtained, adsorption and desorption curves were drawn (Figures 2 and 3). Data was adjusted to the Langmuir and Freundlich models (United States Environmental Protection Agency - EPA, 1998), and the data thus obtained enabled us to calculate K_d values for each of the soil samples (Table 3). Data analyses were done with the STATGRAPHICS and the Statistical Analysis System for microcomputers (SAS Institute, 1988).

Results

¹⁴C-glyphosate mineralization in soil samples under microcosm conditions

The mineralogical analysis of clays is shown in Table 1. In forest soil, caoilinite was abundant (42%), followed by mica and montmorillonite with 20% and 17%. In rice soil, mica, caoilinite and montmorillonite were also found in a proportion

of 25%, 21% and 17%, respectively, while in grassland soil, the proportion of mica, caolinite and quartz minerals in the total content of clays was 24%, 22% and 16%, respectively. Rice and forest soils had the highest values of monmorillonite content (17%), which explains the adsorption capacity of glyphosate in these soils (Glass, 1987; Chorbadjian & Kogan, 2001). However, the dominant content of caolinite in forest soil samples (Table 1) resulted in low ion retention, and, therefore, also in a low glyphosate retention in this type of soil.

Glyphosate mineralization curves in the three soil types after 106 days allowed us to determine that they exhibited different metabolic activity (Figure 1). Glyphosate degradation during the first 36 days of incubation showed the same tendency in forest and grassland soils (Figure 1); however, after day 36, the mineralization rate in the forest soil was faster, and after 106 days of incubation, around 53% of the compound had been mineralized in this soil and 38% in the grassland soil (Figure 1). Regarding the rice-crop soil type, less than 25% of the herbicide had been transformed at the end of the experiment (day 106), and all through its duration, ¹⁴C-glyphosate mineralization was less than that of the forest and grassland soils (Figure 1).

The average life of glyphosate mineralization in each soil type was estimated by means of linear regression equations which considered the quantity of glyphosate in each soil (measured by means of the activity in DPM from the ¹⁴CO₂ product of the ¹⁴C-glyphosate transformation) in relation to the time (Figure 2). The equations for the three soils are as follows:

Rice-crop	$Y=0.0373X + 0.1051$	$R^2=0.9792$
Forest	$Y=0.0713X + 0.4906$	$R^2=0.9036$
Grassland	$Y=0.0572X - 0.1392$	$R^2=0.9036$,

where Y is glyphosate average life in the soil, and X, the ¹⁴C-CO₂ production.

Based on these equations, glyphosate average life was estimated as 94, 526 and 11,365 days for forest, grassland and rice-crop soils, respectively.

¹⁴C-glyphosate adsorption-desorption in the three soil types

Table 2 shows the results of glyphosate sorption in the soil. The values for bound wastes (bound and extractable) do not give an exact idea of the pesticide quantity that can be irreversibly retained in the soil, but it is a useful value for mass balancing. We found that mass balance average values were 65%, 77% and 80% for rice-crop, forest and grassland soils, respectively. Percentages less than 100% may be explained by a loss of material, especially in those soils with higher organic content, and by the presence

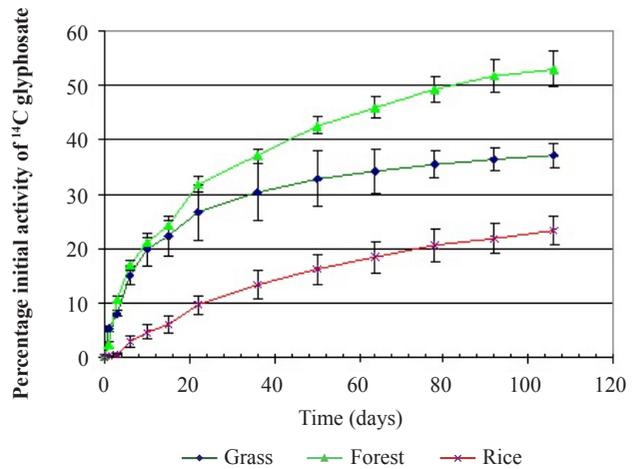


Figure 1. Accumulated ¹⁴C-glyphosate mineralization measured by means of the CO₂ evolution during 106 days under microcosm conditions

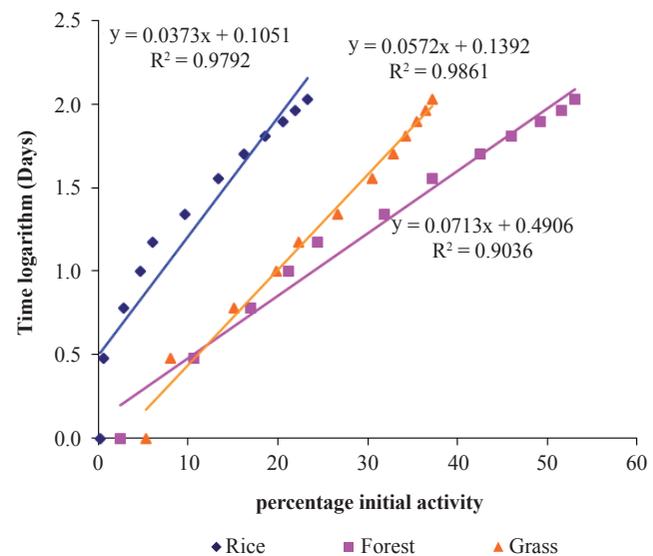


Figure 2. Linear regression equations of the activity in DPM (disintegrations per minute) of the ¹⁴CO₂ with regard to the time line

of roots less than 2 mm in size, which in spite of having been subjected to centrifuging, floated and, therefore, were eliminated in the solution. On the other hand, the existence of a third pseudo-phase (EPA, 1998) was not considered for colloids (size <0.2 μm), and this can have an important impact on the total adsorption mechanism of a substance in a soil suspension.

Adsorption-desorption was adjusted to the Freundlich's equation; Freundlich's lineal model is expressed as (Calvet, et al., 2005):

$$q_{ae} = KdC_e$$

Table 4. Adsorption and desorption of ¹⁴C-glyphosate adjusted to the Freundlich's model in the samples from the three soil types under study

Soils	Curve	r	m	b	Kd (ml g ⁻¹)	Koc (ml g ⁻¹)	1/n	H
Rice crops	Adsorption	0.999	0.70	1.23	17.05	1,311.5	0.70 _(ads)	0.72
	Desorption	0.999	0.97	0.22	1.66		0.97 _(des)	
Forest	Adsorption	0.984	0.47	0.49	3.10	134.8	0.47 _(ads)	0.74
	Desorption	0.984	0.76	-0.52	3.31		0.76 _(des)	
Grassland	Adsorption	0.998	0.66	0.26	1.83	42.6	0.66 _(ads)	0.74
	Desorption	0.997	0.89	-0.21	1.62		0.89 _(des)	

R: Regression coefficient; b: Intercept; m: Slope; Kd: Intercept antilog; Kd_(ads): Adsorption coefficient; Kd_(des): Desorption coefficient; K_{oc}: Normalized adsorption coefficient in relation to the organic carbon content from the adsorbent (Koc=Kd/f_{oc}, where f_{oc} = C_{org}/100; C_{org} = C_{org}: the quantity from the adsorbent is expressed in g/100g); 1/n_(ads): Adsorption equation slope; 1/n_(des): Desorption equation slope; H: Hysteresis coefficient = 1/n_(ads) / 1/n_(des). (Calvet, *et al.*, 2005; Autio, *et al.*, 2004; Mamy, *et al.*, 2005; Valencia, 2005)

where q_{ac} is the quantity adsorbed per mass unit from the adsorbent; C_e is the solution concentration at equilibrium point, and Kd is the distribution coefficient (or adsorption coefficient).

Table 4 shows the correlation coefficient of the isotherms, the adsorption and desorption coefficients, the normalized adsorption coefficients with organic carbon content in each soil, as well as the ¹⁴C glyphosate hysteresis coefficients.

Adequate correlation coefficients were obtained with the following values: For rice-crop soil type, 0.999_{ads}; 0.999_{des}; for forest soil, 0.984_{ads}; 0.984_{des}, and for grassland soil, 0.998_{ads}; 0.997_{des}. As can be observed in Table 4, the values of 1/n were not near 1, and, therefore, the Freundlich's adsorption and desorption constants (K_{F ads} and K_{F des}) were not equal to the adsorption and desorption constants at the equilibrium point (K_{ads} and K_{des}), so it can be assumed that those constants varied along the isotherms in the rate of concentrations under study. K_{ads} and K_{des} values are not independent of the glyphosate concentration (EPA, 1998).

Glyphosate Kd_{ads} in the rice-crop soil type (Kd_{ads} = 17.05) was greater in magnitude as compared to the values in forest soils (Kd_{ads} = 3.10) and in grassland soils (Kd_{ads} = 1.83). Regarding the Kd_{des}, the compound in forest soils tended to a higher desorption (Kd_{des} = 3.31) than that in rice soils (Kd_{des} = 1.66), and grassland soils (Kd_{des} = 1.62).

These results indicate that the herbicide in rice-crop soils was greatly adsorbed and once adsorbed, it was not released in the soil solution. In grassland soils, adsorption and desorption were equally low, whereas in forest soils there was a balance between adsorption and desorption. In forest soils, a higher glyphosate quantity could be expected in the liquid phase, and in rice-crop soils, in the solid phase. Regarding the Koc (normalized adsorption coefficient based on the organic carbon content in the soil), this value in rice-crop soils, was almost 2 and 3 times higher than the values in grassland and forest soils, respectively. This would indicate that rice-crop

soils have a high affinity with glyphosate due to the organic matter (2.24%), although organic matter contents were higher in forest soils (3.97%) and in grassland soils (7.41%). However, other factors besides the organic matter contents or the interaction with organic matter could be controlling herbicide sorption in these soils.

Normal adsorption curves are shown in Figure 3 and desorption curves in Figure 4. Table 4 shows how rice-crop soil samples had the highest adsorption value with 17.05 ml/g, while grassland soil had the lowest, with a value of 1.83 ml/g, and forest soils exhibited the highest desorption values, with 3.31 ml/g.

Based on the glyphosate quantification obtained in the adsorption, desorption and binding phases, the recovery percentage itself was calculated by assigning an average recovery of 65, 77 and 80% to rice-crop, forest and grassland soils, respectively (Figure 5). Percentages below 100% may be explained by a loss of organic material on the surface solution, which was eliminated after centrifuging. On the other hand, the presence of colloids with size <0,2 μm in suspension were not considered, but they can have an important impact on glyphosate desorption, thus affecting recovery values.

Discussion

In laboratory conditions and by means of isotopic techniques, we were able to determine a relatively low glyphosate mineralization rate, which related directly to soil type. Mineralization rate in rice-crop soil samples with a long history of pesticide use, among them glyphosate, was the lowest, whereas the degradation rate in forest soils with no use of pesticides was the highest (Figure 1). After 106 days, the maximum value of accumulated mineralization for forest soil samples was 53% in average, 38% for grassland soil, and only 23% of the herbicide parental molecule was degraded in the rice-crop soil samples (Figure 1). Other authors have determined higher mineralization rates; Rueppel, *et al.*,

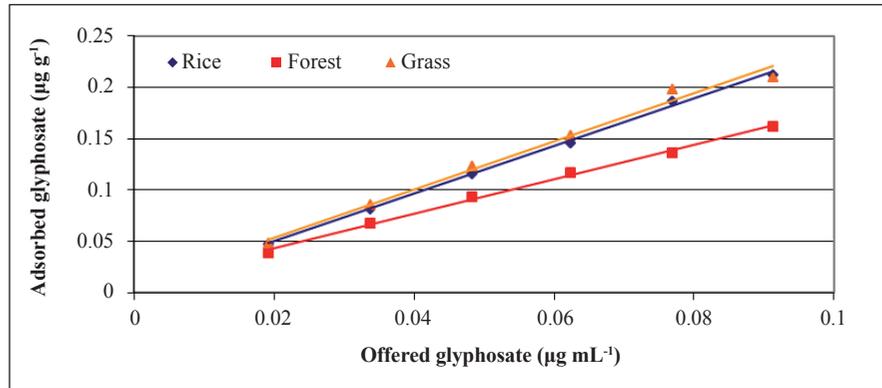


Figure 3. Natural curves of adsorption (3) for the rice-crop soil samples under evaluation (El Espinal, Colombia)

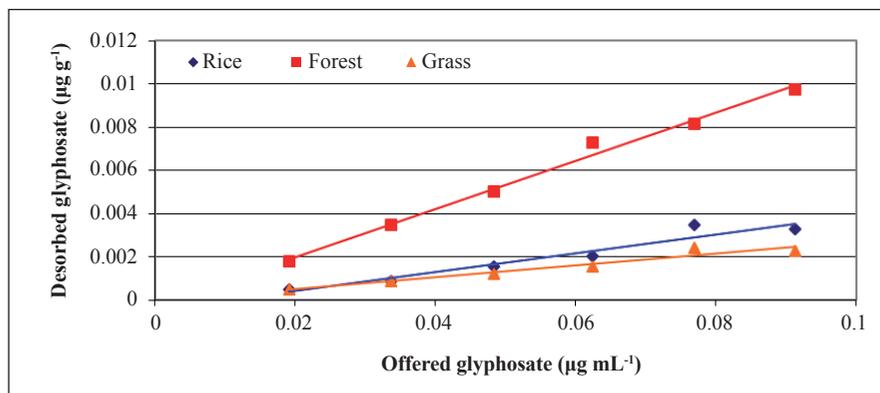


Figure 4. Natural curves of desorption (4) for the rice-crop soil samples under evaluation (El Espinal, Colombia)

(1977) and Moshier & Penner (1978) found that 28 days were required to degrade 45% to 48% of the original glyphosate in the soil.

Forest soil samples showed the strongest metabolic activity as compared to the other soils. This activity can be partially determined by the type of organisms present in the soil, which probably have adapted to “adverse” natural environments (land inclination, scarce humidity retention, forest vegetation cover with great species diversity, etc.). Many studies have demonstrated that glyphosate degradation in soil occurs mainly because of microbial activity. For example, **Vinther & Brinch**'s research work (2002) in Denmark indicated that the spatial variation of glyphosate mineralization follows a similar pattern to that of soil microbial activity. **Haney, et al.**, (2002) reported that the RoundupUltra® glyphosate formulation applied in soils from Georgia and Texas (USA) was quickly mineralized by the local microbial biota regardless of the soil type, content of clays, and CO or pH levels. **Moshier & Penner** (1978) have indicated that glyphosate is degraded by bacteria which vary in numbers and species depending on the soil, but many bacteria do

not degrade the glyphosate, and its complete degradation depend on the bacterial species present in a site. Due to the slow glyphosate degradation, microbiologists “think” that its biotransformation occurs by co-metabolism, which means that glyphosate would not be a source for bacteria growth and, therefore, it could accumulate in the soil even in the presence of bacteria with the capacity to degrade it (**Torstensson**, 1985).

The microbial decomposition of most organic herbicides follow a typical bacterial growth curve and all conditions favoring soil microbial biota growth (high temperature and humidity, high oxygen and organic matter content, high pH and high fertility), also favor herbicides decomposition in the soil. On the other hand, many studies indicate that soil properties and characteristics (in this case, the adsorbent) determine glyphosate adsorption rates in soil and, therefore, its availability in the soil solution to become a “target” for microorganisms.

Among those factors that have been proved to have an effect of increasing glyphosate adsorption degree in soil we can mention the following: high iron (Fe) contents (**Gerritse**,

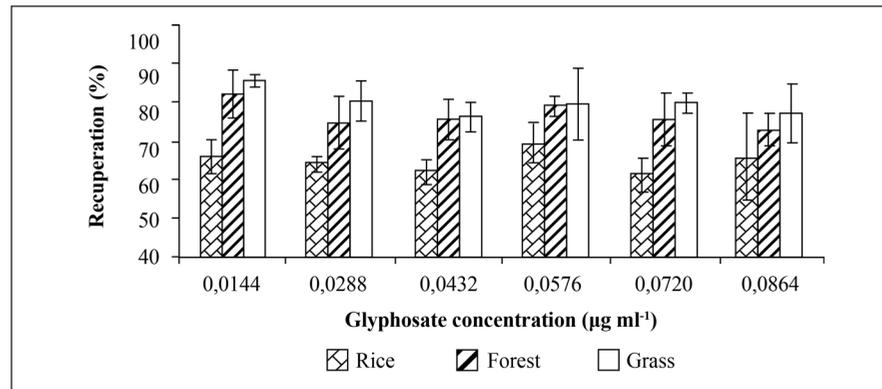


Figure 5. ^{14}C -glyphosate recovery percentage in the sorption process on rice-crop soil samples (El Espinal, Colombia)

et al., 1996), high aluminium (Al) contents (Sánchez, *et al.*, 1999), low phosphorus (P) contents (Sprankle, *et al.*, 1975a,b; Hance, 1976; Nomura & Hilton, 1977; Rueppel, *et al.*, 1977; Glass, 1987), high magnesium (Mg) contents (Sánchez, *et al.*, 1999), high content of clays (Sprankle, *et al.*, 1975a,b; Hance, 1976; Nomura & Hilton, 1977; Rueppel, *et al.*, 1977; Glass, 1987; Vinther & Brinch, 2002), as well as the type of clays, mainly montmorillonite (Calvet, *et al.*, 2005), and a high CO content (Gerritse, *et al.*, 1996; Vinther & Brinch, 2002; Haney, *et al.*, 2002). Other authors, however, have pointed out the opposite: high CO content reduces glyphosate adsorption (Gerritse, *et al.*, 1996) or it is not related with adsorption, but, instead, it depends on the montmorillonite quantity present in the soil (Calvet, *et al.*, 2005), on a high cation exchange capacity (CEC) (Sprankle, *et al.*, 1975a,b; Hance, 1976; Nomura & Hilton, 1977; Rueppel, *et al.*, 1977; Glass, 1987) and on low pH values (Sprankle, *et al.*, 1975a,b; Hance, 1976; Nomura & Hilton, 1977; Rueppel, *et al.*, 1977; Glass, 1987; Sánchez, *et al.*, 1999). Sánchez, *et al.*, (1999) have pointed out on their part that pH is the main factor in glyphosate adsorption. In brief, glyphosate adsorption depends on many soil characteristics, as well as on their interaction, and not only on the organic matter and clay contents as is generally accepted.

The K_d values obtained in this work were low (17.05; 3.10; 1.83 ml/g) compared to those registered in other studies. Sánchez, *et al.*, (1999) determined very variable K_d values for glyphosate in hydrotalcite (HT) and calcined hydrotalcite (HT500) that depended on the adsorption system pH; these values varied from 36.82 to 6,252 for HT and between 17,801 and 26,558 for HT500. Strabge-Hansen, *et al.*, (2004) reported glyphosate adsorption coefficients (K_d) between 62 and 164 l/kg in gravel and 410 l/kg in a sandy substrata soil from Denmark. Also in Denmark, Vinther & Brinch (2002) registered very variable K_d values in 51 samples from

a 120 m x 120 m sandy plot of soil, ranging from 93.9 to 457.2. These results indicate that even inside a small area, glyphosate adsorption to the soil varies a lot and depends on the spatial variation of the soil.

In our study, glyphosate mineralization in rice-crop soil samples was the lowest (23% after 106 days) in comparison with the other two soils. Rice-crop soil samples had a low CIC (6.2 meq/100g), acid pH (5.7), and a low CO content (1.3), but a high K_{oc} (1311.8), indicating a high affinity of the organic matter for the herbicide in this soil (Calvet, *et al.*, 2005), as well as the highest $K_{d_{ads}}$ value (17.05), a P content of 43.3 ppm and an intermediate Fe content of 51.4 ppm, all of which explains the high herbicide adsorption in rice-crop soil samples. $K_{d_{ads}}$ low values allow a relatively high glyphosate mineralization rate in the soil; when the $K_{d_{ads}}$ is high, on the contrary, the mineralization is low (Strabge-Hansen, *et al.*, 2004). Additionally, a low $K_{d_{des}}$ value was registered in rice-crop soil samples (1.66). All this means that high $K_{d_{ads}}$ and K_{oc} , besides low $K_{d_{des}}$ in rice-crop soil samples limited herbicide availability in the soil solution, fundamental condition for its mineralization through microbial activity, determining, therefore, a longer persistence in the soil.

With regard to grassland and forest soils, pH with a basic tendency (7.7), low Fe content and $K_{ads/des}$ values equivalent or near 3.0 in forest soil samples possibly explain a greater glyphosate availability in the soil liquid phase, and, therefore, its high mineralization rate in comparison with the others two soils. In grassland soil samples, other factors such as the high P content (90.8 ppm), the absence of montmorillonite in spite of the total content of clays, which was the highest (30.5%), the lowest K_{oc} value of the three soils (42.47), and the highest total organic matter content (7.41%) jointly explain the intermediate herbicide availability in the soil solution and, in consequence, the intermediate mineralization value. Carlisle & Trevors (1988) have indicated that glyphosate competes

for absorption sites with soil phosphates, which means that soils with low phosphorus contents tend to have higher adsorption rates of the herbicide.

Studies on glyphosate interaction with soil constituents indicate that the herbicide is quickly inactivated due to its adsorption to the soil, and that this inactivation or dissipation is not due to the chemical and biological degradation (Sprankle, *et al.*, 1975a). In these studies it was concluded that glyphosate adsorption increases as clays contents increase in the soil (Glass, 1987; Hensley, *et al.*, 1978; McConnell & Hossner, 1985; Miles & Moye, 1988). However, it seems that the type of clay is more important than the total content of clays for determining the adsorption of an ionic herbicide such as glyphosate (Sprankle, *et al.*, 1975a; McConnell & Hossner, 1985; Glass, 1987; Miles & Moye, 1988; Chorbadian & Bogan, 2001), which would be the case in our study, as forest soil samples showed the lowest levels of adsorption, even though they contained more total clays than the rice-crop soil samples. However, forest soil had a caolinitic clays content of 42% of the total content of clays, which partly explains the low retention capacity of this soil.

In general, the estimated average life values in laboratory conditions, of 94, 526 and 11.365 days for forest, grassland and rice-crop soil samples, respectively, were higher than those reported in the literature, which vary from 4 (Schuette, 1998; European Commission-Health and Consumer Protection Directorate-General, 2002), to 40 and 47 days (Tu, *et al.*, 2001; European Commission-Health and Consumer Protection Directorate-General, 2002), 180 days (European Commission-Health and Consumer Protection Directorate-General, 2002) and up to extreme values of 1.699 days (European Commission-Health and Consumer Protection Directorate-General, 2002) and 8.322 days in sugar cane soils from Hawaii (Nomura & Hilton, 1977). On the other hand, average dissipation life values in the field were between 5 and 106 days (European Commission-Health and Consumer Protection Directorate-General, 2002).

The results of this work allow us to infer that glyphosate can constitute an environmental pollution problem due to its high persistence in the soil, as shown by the high average life values obtained in general, and in rice-crop soil samples specifically. In real field conditions, it would not be surprising to find glyphosate wastes due to its accumulation after continued and prolonged use, accumulation which does not occur from one day to the other, but after 20 or 30 years (Heimen, 2002). In the case of soils used for rice crops in Colombia, where glyphosate has been intensively applied in the last decade to control persistent undergrowth in pre-sowing, attention must be given to the probable accumulation of glyphosate wastes in the soil due to the estimated average life of 31 years.

Bibliography

- Anton, F.A. 1993. Degradational behavior of the pesticides glyphosate and diflufenzuron in water. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **51**: 881-888.
- Aubin, A.J. & Smith, A.E. 1992. Extraction of ¹⁴C glyphosate from Saskatchewan soil. *J. Agric. Food Chem.* **40**: 1163-1165.
- Autio, S., Siimes, K., Laitinen, P., Rämö, S., Oinonen, S., Eronen, L. 2004. Adsorption of sugar beet herbicides to Finnish soils. *Chemosphere.* **55**: 215-226.
- Calvet, R., Barriuso, E., Bedos, C., Benoit, P., Charnay, M.P., Coquet, Y. 2005. Les pesticides dans le sol: conséquences agronomiques et environnementales. Éditions France Agricole. Paris, France.
- Carlisle, S.M. & Trevors, J.T. 1988. Glyphosate in the environment. *Water Soil and Air Pollution* **39**: 409-420.
- Chorbadian, R. & Kogan, M. 2001. Pérdida de actividad del glifosato debido a la presencia de suelo en el agua de aspersión. *Cienc. Invest. Agr.* **28** (2): 83-87.
- Environmental Protection Agency - EPA. 1998. Fate, transport and transformation test guidelines. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals. Sediment and Soil adsorption/Desorption Isotherm. EPA, Washington DC, 145 p.
- European Commission - Health and Consumer Protection Directorate-General. 2002. Directorate E – Food Safety: plant health, animal health and welfare, international questions. E1 - Plant Health. Glyphosate. European Commission, Brussels, 56 p.
- Feng, J.C. & Thompson, D.G. 1990. Fate of glyphosate in a Canadian forest watershed: 2. Persistence in foliage and soils. *J. Agric. Food Chem.* **38**: 1118-1125.
- Forlani, G., Mangiagalli, A., Nielsen, E., Suardi, C.M. 1999. Degradation of the phosphonate herbicide glyphosate in soil: Evidence for a possible involvement of unculturable microorganisms. *Soil Biol. Biochem.* **31**: 991-997.
- Gerritse, R.G., Beltrán, J., Hernández, F. 1996. Sorption of atrazine, simazine, and glyphosate in soils of the Gnangara Mound, Western Australia. *Aust. J. Soil Res.* **34**: 599-607.
- Giesy, J.P., Dobson, S. & Solomon, K.R. 2000. Ecotoxicological risk assessment for Roundup® herbicide. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* **167**: 35-120.
- Glass, R.L. 1987. Phosphate adsorption by soils and clay minerals. *J. Agric. Food Chem.* **35**: 497-500.
- Guarracino, L. C., Ravazzoli, L. & Santos, J.E. 1998. Modelado de transporte de contaminantes en las zonas saturada y no saturada utilizando métodos de elementos finitos. In: *Memorias del IV Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea.* **1**: 157-168.
- Hance, R.J. 1976. Adsorption of glyphosate by soils. *Pestic. Sci.* **7**: 363-366.

- Haney, L.S., Senseman, S.A., Hons, F.M., Zuberer, D.** 2000. Effect of glyphosate on soil microbial activity and biomass. *Weed Sci.* **48**: 89-93.
- Haney, R.L., Senseman, S.A. & Hons, F.M.** 2002. Effect of Roundup ultra on microbial activity and biomass from selected soils. *J. Environ. Qual.* **31**: 730-735.
- Harris, D.** 1992. Análisis químico cuantitativo. Grupo Editorial Iberoamericana S.A. México. 632 p.
- Heimen, J.** 2002. The Glyphosate threat 1. Accessed: June, 2014. Available at: <http://www.rag.org.au/modifiedfoods/roundup1.htm>
- Hensley, D.L., Beuerman, D.S.N. & Carpenter, P.L.** 1978. The inactivation of glyphosate by various soils and metal salts. *Weed Res.* **18**: 287-291.
- Mamy, L.** 2004. Comparaison des impacts environnementaux des herbicides à large spectre et herbicides sélectifs: caractérisation de leur devenir dans le sol et modélisation. Thèse. Institut National Agronomique, Paris-Grignon, Paris, France.
- McConnell, J.S. & Hossner, L.R.** 1985. pH-dependent adsorption isotherms of glyphosate. *Agric. Food Chem.* **33**: 1075-1078.
- Miles, C. & Moye, H.** 1988. Extraction of glyphosate herbicide from soil and clay minerals and determination of residues in soils. *J. Agric. Food Chem.* **36**: 486-491.
- Moshier, L.S. & Penner, D.** 1978. Factors influencing microbial degradation of ¹⁴C-Glyphosate to ¹⁴CO₂ in soil. *Weed Sci.* **26**: 686-691.
- Newton, M., Howard, K.M., Kelsas, B.R., Danhaus, R., Lottman, C. M., Dubelman, S.** 1984. Fate of glyphosate in an Oregon forest ecosystem. *J. Agric. Food Chem.* **32**: 1144-1151.
- Newton, M., Horner, L.M., Cowell, J.E., White, D.E., Cole, E.C.** 1994. Dissipation of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in North American forests. *J. Agric. Food Chem.* **42**: 1795-1802.
- Nomura, N.S. & Hilton, H.W.** 1977. The adsorption and degradation of glyphosate in five Hawaiian sugarcane soils. *Weed Res.* **17**: 113-121.
- Pérez, N., Elizondo, P. & Nájera, B.** 2005. Análisis de muestras complejas de ácidos carboxílicos y carbohidratos mediante GC-MS. *Cienc. UANL* **8** (1): 45-50.
- Prata, F., Lavorenti, A., Regitano, J.B., Tornisielo, V.L.** 2000. Influência da matéria orgânica na sorção e dessorção do glifosato em solos com diferentes atributos mineralógicos. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* **24**: 947-51.
- Roberts, G.C., Peurou, F. & Penwell, A.J.** 2003. Assessing the toxic effect of nitrapyrin on nitrogen transformation in soil. *Soil Biol. Biochem.* **35**: 479-481.
- Roy, D.N., Konar, S. K., Banerjee, S., Charles, D. A., Thompson, D. G., Prasad, R.** 1989. Persistence, movement and degradation of glyphosate in selected Canadian boreal forest soils. *J. Agric. Food Chem.* **37**: 437-440.
- Rueppel, M.L., Brightwell, B.B., Schaefer, J., Marvel, J.T.** 1977. Metabolism and degradation of glyphosate in soil and water. *J. Agric. Food Chem.* **25**: 517-528.
- Sánchez-Martín, M.J., Villa, M.V. & Sánchez-Camazano, M.** 1999. Glyphosate-hydrotalcite interaction as influenced by pH. *Clays and Clay Minerals* **47**: 777-783.
- SAS Institute Inc.** 1988. SAS User's Guide. Statistical Analysis Institute. Cary, NC., USA.
- Schuette, J.** 1998. Environmental Fate of Glyphosate. Environmental Monitoring & Pest Management. Department of Pesticide Regulation. Sacramento, CA. Accessed: June, 2014. Available at: www.cdpr.ca.gov/docs/empmpubs/fatememo/glyphos.pdf
- Sprankle, P., Meggitt, W.F. & Penner, D.** 1975a. Rapid inactivation of glyphosate in the soil. *Weed Sci.* **23**: 224-228.
- Sprankle, P., Meggitt, W.F. & Penner, D.** 1975b. Adsorption, mobility, and microbial degradation of glyphosate in the soil. *Weed Sci.* **23**: 229-234.
- Strabge-Hansen, R., Holm, P.E., Jacobsen, O.S.** 2004. Sorption, mineralization and mobility of N-(phosphonomethyl) glycine (glyphosate) in five different types of gravel. *Pestic. Manage. Sci.* **60**: 570-8.
- Torstensson, L.** 1985. Behaviour of glyphosate in soils and its degradation. In: Grossbard, E. and Atkinson, D. (Eds.). *The Herbicide Glyphosate*. Butterworths, London.
- Tu, M., Hurd, C., Robison, R., Randall, J.M.** 2001. Weed control methods handbook. The Nature Conservancy. Glyphosate: 7E1-7E10.
- Valencia, E. M.** 2005. Determinación de residuos de N-metilcarbamatos en fresa (*Fragaria* spp.) y evaluación de la adsorción-desorción de ¹⁴C-Carbofuran en suelos del mismo cultivo. Facultad de Ciencias. Tesis de Maestría. Bogotá D. C. 172 p.
- Veiga F., Zapata, J.M., Marcos, M.L., Álvarez, E.** 2001. Dynamics of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in a forest soil in Galicia, North West Spain. *Sci. Total Environ.* **271**: 135-144.
- Vinther, F.P. & Brinch, U.C.** 2002. Microbial heterogeneity on field scale in relation to pesticide mineralisation. In: Albrechtsen, H.-J., Aamand, J. (eds). *International Symposium on Subsurface Microbiology*. 53. *Society for Subsurface Microbiology*, Copenhagen.
- Weber, J.B.** 1994. Properties and behavior of pesticides in soil. In: Honeycutt, R.C., D.J. Schabacker (eds). *Mechanisms of pesticide movement into ground water*: 15-41. Lewis, London.

Characteristics of two Competing Risks Models with Weibull Distributed Risks

Sergio Yáñez^{1,*}, Luis A. Escobar², and Nelfi González¹

¹School of Statistics, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín,

²Experimental Statistics, Louisiana State University,

³School of Statistics, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Abstract

Lifetime and survival data are usually the lives of subjects, units, or systems that has been exposed to multiple risks or modes of failure. In the analysis of the data, however, is common to ignore the modes of failure because they are unknown, they are not recorded, or because the complexity of including them in the modeling. It is of interest knowing when the conclusions might be robust to ignoring the failure modes in the analysis. In particular, it would be useful to characterize situations where it could be safely said that the modes of failure effect on the analysis would be negligible or that failing to include such information could completely invalidate the conclusions drawn from the study. As a first step in identifying when the failure modes have little or large influence on the competing risks model, this article studies two different competing risks models: (a) a model with independent risks; (b) a model derived from a multivariate Weibull with dependence.

Key words: competing risks, probability plots, log-location-scale family, Weibull distribution, multivariate Weibull with dependence, lognormal distribution.

Características de dos modelos con riesgos en competencia y riesgos Weibull.

Resumen

Los datos de tiempos de falla y sobrevivencia se refieren generalmente a la vida de individuos, unidades o sistemas que han sido expuestos a múltiples riesgos o modos de falla. Sin embargo, en el análisis de los datos es común ignorar los modos de falla porque son desconocidos, no se registran o por la complejidad de la modelación al incluirlos. Es importante, por lo tanto, determinar la robustez del análisis ignorando los modos de falla. En particular, sería útil caracterizar situaciones donde pudiera decirse que el efecto de los modos de falla en el análisis es despreciable o donde no incluir tal información pudiera invalidar completamente las inferencias del estudio. Como un primer paso para identificar cuando los modos de falla tienen poca o mucha influencia en el modelo de riesgos en competencia, este artículo estudia dos modelos de riesgos en competencia: (a) un modelo con riesgos independientes; (b) un modelo derivado de una distribución Weibull multivariada con dependencia.

Palabras clave: riesgos en competencia, gráficos de probabilidad, familia de log-localización y escala, distribución Weibull, distribución Weibull multivariada con dependencia, distribución lognormal.

1. Introduction

In the analysis of lifetimes one is usually dealing with time to an event of interest like failure of a component or system, death of an individual, or end to a subscription service. In most cases, there are several competing reasons (risks or modes of failure) that cause the event of interest. Say, for example, that we were interested in the first time that a bicycle fails. In this situation, the competing risks for failure include: a flat tire, a broken chain, or the rupture of a brake cable.

The interest in competing risks is old but the formal development and application of the methodology to problems in engineering, survival analysis, and other applied areas is relatively new. **Crowder** (2001, 2012) and **Pintilie** (2006) provide historical accounts, relevant references, and methodology.

It is interesting that, for many years, competing risks were not in the front end of reliability and survival analysis. Beyond the statistical challenges of handling properly multiple risks in an analysis, there are, however, some compelling reasons for which the competing risks might have been ignored in the analysis of the data: (a) sometimes the competing risks are hidden or unknown to the observer; (b) the competing risks may be well known but it is difficult or expensive to identify the risk that caused the event; (c) in other cases the cost and time spent on determining the failure cause ends being a waste of resources because ignoring the competing risks in the analysis is as good as the analysis that takes them in consideration. This is the case for example, with the analysis of the Shock Absorber data in **Meeker and Escobar** (1998) where a simple Weibull analysis, that ignores the failure modes, is basically indistinguishable of a Weibull analysis that takes in consideration the two observed failure modes.

It would be useful to have a clear understanding on the situations (e.g., model, data type, risk type) where the use of the competing risks information makes a difference in the analysis. **Meeker, Escobar, and Hong** (2009, page 157), in the context of a complex model and analysis, came to the conclusion that in a competing risks model with two risks that are log-location-scale

distributed with similar shape parameter, the distribution of the competing risks can be approximated by the same log-location-scale distribution with a shape parameter that is in between those for the marginal distributions and that the adequacy of the approximation does not depend strongly on amount of association between the two risks. One, however, would need a formal study of the problem to provide a more definitive answer.

The purpose of this article is to study two simple competing risks models with Weibull risks to assess the effect of the risks on the time to the event of interest and the inter-relationships between the two models. This might be useful in setting a simulation study that could provide broader guidelines on the situations where ignoring the competing risks information in the analysis could lead to erroneous conclusions.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 is an introduction to competing risks models (CRMs) and some features of their probability plots. Section 3 discusses the competing risks model with Weibull independent risks and its characteristics. Section 4 presents a competing risks model derived from a bivariate Weibull distribution with dependent risks. Section 5 describes generalization of the results to CRMs with $k > 2$ risks and anticipate some of the difficulties in generalizing the results to log-location-scale families in general. Section 6 summarizes the results in the paper and outlines future related work. Section 7 contains appendixes with technical details for some of the results given in the paper.

2. Competing Risks Models and Their Probability Plots

Lifetimes of units or individuals subject to two risks (or modes of failure), $k = 2$, can be modeled as a series-system. Each risk is like a component in a series system with two components. The unit has a potential lifetime associated with each risk. The observed lifetime for the unit is the minimum of these individual potential lifetimes T_i , $i = 1, 2$. Informally, we refer to T_i as the Risk i and to the model as the competing risks model (CRM).

*Correspondencia: Sergio Yáñez, syanez@unal.edu.co. Recibido: 23 de junio de 2014. Aceptado: 28 de agosto de 2014

For a CRM with two risks, a quantity of interest is $T_m = \min(T_1, T_2)$ which has the cumulative distribution function (cdf)

$$F_m(t) = \Pr(T_m \leq t) = 1 - \Pr(T_m > t) \\ = 1 - \Pr(T_1 > t, T_2 > t),$$

where $\Pr(T_1 > t, T_2 > t)$ is computed with respect to the joint distribution of (T_1, T_2) .

When the risks are independent

$$F_m(t) = 1 - \Pr(T_1 > t) \Pr(T_2 > t) \\ = 1 - [1 - F_1(t)] [1 - F_2(t)],$$

where $F_i(t)$ is the cdf for $T_i, i = 1, 2$.

In the case of k risks, $F_m(t) = 1 - \Pr(T_1 > t, \dots, T_k > t)$ for dependent risks and $F_m(t) = 1 - \prod_{i=1}^k \Pr(T_i > t) = 1 - \prod_{i=1}^k [1 - F_i(t)]$ for independent risks, where $F_i(t)$ is the cdf for the i risk. See **Meeker and Escobar** (1998, chapter 15) for additional information.

2.1. Probability Plots and CRMs

In theoretical and applied work with lifetime data, probability plots have shown to be useful for multiple purposes, see **Meeker and Escobar** (1998, chapter 6) for detailed explanation on their construction, interpretation, and use. In this paper we will use probability plots to display the distribution function of the competing risks model along with the distribution of the individual risks. As illustrated later, with proper choice of the plot scales, the distributions of the individuals risks, $F_i(t)$, show up as straight lines in the probability plot, but the CRM cdf, $F_m(t)$, is usually a non-linear curve in the plot.

Graph of a cdf on a log-location-scale plot

Consider a log-location-scale probability plot defined by the scales $[\ln t, \Phi^{-1}(p)]$ where $\Phi(z)$ is a standardized continuous cdf that does not depend on unknown parameters, $0 < p < 1, t > 0$, and $\ln t$ denotes the natural logarithm of t . It is known, see for example **Meeker and Escobar** (1998, chapter 6), that in these scales any cdf of the form $\Phi[(\ln(t) - \mu)/\sigma]$ (where $\sigma > 0$) plots as a straight line with slope $1/\sigma$.

In a log-location scale probability plot, if a cdf $F(t)$ is a fairly linear curve, then there is strong information that, with properly chosen (μ, σ) , the cdf $F(t)$ is well approximated by the distribution function $\Phi[(\ln(t) - \mu)/\sigma]$. We will use this feature of probability plots later in studying the properties of some CRMs.

The following result considers a probability plot defined by the scales $[\ln t, \Phi^{-1}(p)]$ and the plot $\{\ln t, \Phi^{-1}[F(t)]\}$ of a cdf $F(t), t > 0$ on it.

Result 1. For an absolutely continuous cdf $F(t) = \Pr(T \leq t), t > 0$ the slope of the curve $\{x = \ln t, y = \Phi^{-1}[F(t)]\}$ in the probability plot $[\ln t, \Phi^{-1}(p)]$ is given by

$$\frac{dy}{d \ln t} = \frac{tf(t)}{\phi\{\Phi^{-1}[F(t)]\}}, \tag{1}$$

where $f(t)$ and $\phi(z)$ are the probability density functions (pdfs) corresponding to $F(t)$ and $\Phi(z)$, respectively.

The proof of (1) follows after differentiation of y with respect to $\ln t$. ■

Because $t, f(t)$, and the function $\phi(z)$ are all non-negative, the slope in (1) is non-negative. This is the expected behavior because the cdf $F(t)$ is a non-decreasing function of $\ln(t)$.

2.2. The competing risks model for independent positive continuous variables

For the CRM with two independent risks, $k = 2$,

$$F_m(t) = 1 - [1 - F_1(t)][1 - F_2(t)] \text{ and} \\ \frac{dF_m(t)}{d \ln t} = tf_1(t)S_2(t) + tf_2(t)S_1(t),$$

where $F_i(t)$ and $f_i(t)$ are the cdf and pdf of T_i and $S_i = 1 - F_i(t)$ for $i = 1, 2$. Then, using (1) with $F(t) = F_m(t)$,

$$\frac{dy}{d \ln t} = \frac{tf_1(t)S_2(t) + tf_2(t)S_1(t)}{\phi\{\Phi^{-1}[F_m(t)]\}}.$$

The competing risks model for two independent log-location-scale continuous variables

Now suppose that the individual risks are independent and log-location-scale distributed. That is, T_1 and T_2 are

independent, and $T_i \sim \Phi(z_i), i = 1, 2$, where

$$z_1 = \frac{\ln(t) - \mu_1}{\sigma_1}, z_2 = \frac{\ln(t) - \mu_2}{\sigma_2}, \tag{2}$$

$-\infty < \mu_i < \infty, \sigma_i > 0$, and $\Phi(z)$ is a differentiable cdf that does not depend on unknown parameters. In this case,

$$F_m(t) = 1 - [1 - \Phi(z_1)][1 - \Phi(z_2)] \text{ and } \frac{dF_m(t)}{d \ln t} = \frac{1}{\sigma_1} \phi(z_1)[1 - \Phi(z_2)] + \frac{1}{\sigma_2} \phi(z_2)[1 - \Phi(z_1)], \tag{3}$$

where $\phi_i(z)$ is the pdf corresponding to the cdf $\Phi_i(z), i = 1, 2$.

Thus for a competing risks model with two independent log-location-scale risks, the slope of the curve $\{x = \ln t, y = \Phi^{-1}[F_m(t)]\}$ in the probability plot $[\ln t, \Phi^{-1}(p)]$ is given by

$$\frac{dy}{d \ln t} = \frac{\frac{1}{\sigma_1} \phi(z_1)[1 - \Phi(z_2)] + \frac{1}{\sigma_2} \phi(z_2)[1 - \Phi(z_1)]}{\phi[\Phi^{-1}\{1 - [1 - \Phi(z_1)][1 - \Phi(z_2)]\}]}. \tag{4}$$

In this case, the cdfs of the individual risks T_i appear as straight lines in the probability plot. But the line corresponding to the CRM cdf is not necessarily linear. For an example, see Figure 1 which is described in the following section.

3. Competing Risks Model With Independent Weibull Risks

A Weibull cdf $F(t)$ is often written as

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \tag{5}$$

$$= \Phi_{\text{sev}} \left[\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right], t > 0, \tag{6}$$

where $\eta > 0$ is a scale parameter and $\beta > 0$ is a shape parameter. $\Phi_{\text{sev}}(z) = 1 - \exp[-\exp(z)]$ is the standard smallest extreme value distribution, $\mu = \ln(\eta)$, and $\sigma = 1/\beta$. When T has a Weibull distribution, we indicate it by $T \sim \text{WEI}(\eta, \beta)$.

Although (5) and (6) are equivalent specifications of the Weibull cdf, (5) is commonly used in engineering and (6) is convenient on theoretical developments, for numerical stability in computations, and for notational standardization with other log-location scale distributions. For additional details see **Meeker and Escobar (1998)** and **Lawless (2003)**.

Then the Weibull competing risks model with two independent risks has the cdf

$$p_{\text{miw}}(t) = F_m(t) = 1 - [1 - \Phi_{\text{sev}}(z_1)][1 - \Phi_{\text{sev}}(z_2)].$$

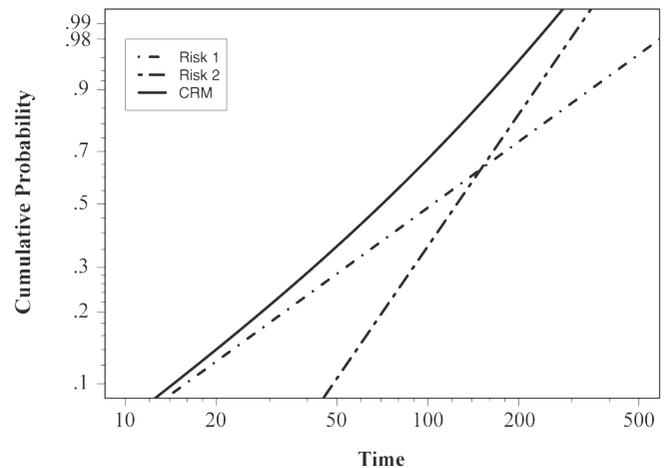


Figure 1: Weibull probability plot of a competing risks model with two independent risks. Risk 1 and Risk 2 are $\text{WEI}((\eta_1 = 150, \beta_1 = 1))$ and $\text{WEI}(\eta_2 = 150, \beta_2 = 2)$ distributed, respectively.

Figure 1 shows $p_{\text{miw}}(t)$ in a Weibull probability plot with scales $[\ln t, \Phi_{\text{sev}}^{-1}(p)]$. The plot also shows, as straight lines, the cdfs for the two Weibull independent risks defining the CRM model. In this case, because the plot of $p_{\text{miw}}(t)$ is non-linear, we know that the distribution of the CRM is not a Weibull distribution. For this and other figures in the paper, the model parameters values were chosen for illustration purposes.

Important properties of the CRM with independent Weibull risks

The following results characterize the CRM with independent Weibull risks.

Result 2. Consider the graph $\{x = \ln t, y = \Phi_{\text{sev}}^{-1}[p_{\text{miw}}(t)]\}$ of the cdf p_{miw} , for the CRM with independent Weibull risks, on a Weibull probability plot. The following results hold.

- (a) The slope of $p_{\text{miw}}(t)$ in the probability plot is the convex combination

$$\frac{dy}{d \ln t} = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\sigma_i} \frac{\exp(z_i)}{[\exp(z_1) + \exp(z_2)]}. \tag{7}$$

To prove this result, note that the density and the quantile functions for $\Phi_{\text{sev}}(z)$ are

$$\begin{aligned} \phi_{\text{sev}}(z) &= \exp[z - \exp(z)] \\ \Phi_{\text{sev}}^{-1}(p) &= \ln[-\ln(1 - p)]. \end{aligned} \tag{8}$$

Thus $\phi_{\text{sev}}[\Phi_{\text{sev}}^{-1}(p)] = (1 - p)[-\ln(1 - p)]$ and we get

$$\begin{aligned} \phi_{\text{sev}}[\Phi_{\text{sev}}^{-1}(p_{\text{miw}}(t))] \\ = [1 - \Phi_{\text{sev}}(z_1)][1 - \Phi_{\text{sev}}(z_2)][\exp(z_1) + \exp(z_2)]. \end{aligned}$$

From (3) with $\Phi(z) = \Phi_{\text{sev}}(z)$ and $\phi(z) = \phi_{\text{sev}}(z)$, one obtains (7).

A more detailed proof of (7) can be obtained as the special case with $\theta = 1$ in Appendix B.1.

- (b) When $\beta_1 = \beta_2 = \beta$, $p_{\text{miw}}(t)$ is the cdf of a WEI(η, β) where

$$\eta = \frac{\eta_1 \eta_2}{(\eta_1^\beta + \eta_2^\beta)^{1/\beta}}.$$

To prove this result, use (7) with $\sigma_1 = \sigma_2 = 1/\beta$ to obtain

$$\frac{dy}{d \ln t} = \frac{1}{\sigma} = \beta.$$

Thus $p_{\text{miw}}(t)$ is linear in the Weibull probability plot which implies that it is a Weibull cdf. The particular form of the shape parameter is obtained from the anti-log of μ_i in (11) with $\sigma_1 = \sigma_2 = 1/\beta$.

The fact that, in this case, $p_{\text{miw}}(t)$ is a Weibull cdf is in agreement with the following known result: the minimum of k independent Weibulls, that have a common shape parameter β but possibly differing scale parameters, is Weibull distributed with shape parameter equal to β . For details, see, for example, **Meeker and Escobar** (1998, page 372) and the related **Result 3** below.

- (c) The slope of the curve $\{x = \ln t, y = \Phi_{\text{sev}}^{-1}[p_{\text{miw}}(t)]\}$ is bounded by (β_1, β_2) as follows. Using (7)

$$\min\left(\frac{1}{\sigma_1}, \frac{1}{\sigma_2}\right) \leq \frac{dy}{d \ln t} \leq \max\left(\frac{1}{\sigma_1}, \frac{1}{\sigma_2}\right). \tag{9}$$

Or equivalently,

$$\min(\beta_1, \beta_2) \leq \frac{dy}{d \ln t} \leq \max(\beta_1, \beta_2).$$

This is consistent with the observation made in **Meeker et al.** (2009, page 157) where they found through simulation and sensitivity work that in modeling competing risks data with a single Weibull distribution (i.e., ignoring the failure mode), the estimated Weibull shape parameter tend to fall between the two Weibull shape parameters used to simulate the data. This result suggest that the closeness between the shape parameters of the risks' cdfs might be an important factor in determining if a single Weibull model could fit well a Weibull CRM with independent risks.

- (d) In the limit

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dy}{d \ln t} &= \max\left(\frac{1}{\sigma_1}, \frac{1}{\sigma_2}\right) = \max(\beta_1, \beta_2), \\ \lim_{t \rightarrow 0} \frac{dy}{d \ln t} &= \min\left(\frac{1}{\sigma_1}, \frac{1}{\sigma_2}\right) = \min(\beta_1, \beta_2). \end{aligned}$$

These limiting behaviors follow directly from (7) and the relationships $\beta_i = 1/\sigma_i$, for $i = 1, 2$.

In Figure 1, as $\ln(t) \rightarrow -\infty$, the distribution $p_{\text{miw}}(t)$ approaches the individual risk $F_1(t)$ and also the derivative of $p_{\text{miw}}(t)$ with respect to $\ln(t)$ converges toward β_1 . Similarly, when $\ln(t) \rightarrow \infty$, $p_{\text{miw}}(t)$ approaches $F_2(t)$ and the derivative of $p_{\text{miw}}(t)$ with respect to $\ln(t)$ converges toward β_2 .

(e) The curve $\{x = \ln t, y = \Phi_{\text{sev}}^{-1}[p_{\text{miw}}(t)]\}$ is concave when $\beta_1 \neq \beta_2$.

To verify this result, obtaining the derivative of (7) with respect to $\ln t$ to obtain

$$\frac{d^2y}{d(\ln t)^2} = \left(\frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\sigma_2}\right)^2 \frac{\exp(z_1 + z_2)}{[\exp(z_1) + \exp(z_2)]^2} \quad (10)$$

which is positive when $\sigma_1 \neq \sigma_2$. This implies that the curve $(\ln t, y)$ is concave. Because the curvature of the $[\ln t, y]$ is proportional to (10), see for example Courant and John (1965, page 357), then is also proportional to $(1/\sigma_1 - 1/\sigma_2)^2 = (\beta_1 - \beta_2)^2$. Note that derivative (10) is a special case of Appendix B.2 when $\theta = 1$.

Large values of (10) are associate with large curvatures of the curve $(\ln t, y)$ and we can use curvature as another criteria to help in the decision when is that a simple Weibull distribution fits well the CRM model with independent Weibull risks. In particular, a single Weibull model would fit well a Weibull CRM cdf with independent risks if the two Weibull shape parameters in the CRM model are not far apart. There are situations, however, where the curvature is large just in an interval with negligible probability content with respect to the CRM cdf, in those case the simple Weibull distribution will fit well the CRM model in an interval of high probability with respect to the CRM cdf, regardless of sizes of the scale parameters. See the discussion at the end or **Result 3** for a case where the curvature is large just in an interval with negligible probability content with respect to the CRM cdf. ■

All the outcomes in **Result 2** can be extended readily, with trivial minor changes, to a CRM with $k > 2$ independent Weibull risks. See **Jiang and Murthy** (2003) for results related to items (a) and (d) in **Result 2**.

CRM with independent Weibull risks and similar shape parameters

An important problem is the modeling of competing risks data when the risks are Weibull distributed with similar shape parameter. The following result considers

that setting in the special case when the risks are independent.

Result 3. Consider the cdf $p_{\text{miw}}(t)$ of the CRM $T = \min(T_1, T_2)$ with independent risks. Suppose $T_i \sim \text{WEI}(\eta_i, \beta_i), i = 1, 2$. Then when $\beta_i \rightarrow \beta > 0, i = 1, 2, p_{\text{miw}}(t)$ converges to a $\text{WEI}(\eta, \beta)$ cdf where $\eta = (\eta_1\eta_2)/(\eta_1^\beta + \eta_2^\beta)^{1/\beta}$.

To prove this result, it can be shown that (use Appendix C with $\theta = 1$),

$$p_{\text{miw}}(t) = 1 - [1 - \Phi_{\text{sev}}(z_1)][1 - \Phi_{\text{sev}}(z_2)] = 1 - \exp\left[-\exp\left(\frac{\ln(t) - \mu_t}{\sigma_1}\right)\right], \quad (11)$$

where

$$\mu_t = -\sigma_1 \ln\left[\exp\left(\frac{-\mu_1}{\sigma_1}\right) + t^{1/\sigma_2 - 1/\sigma_1} \exp\left(\frac{-\mu_2}{\sigma_2}\right)\right].$$

The proposed results follows after letting $\beta_i \rightarrow \beta, i = 1, 2$ (which is equivalent to $\sigma_i \rightarrow \sigma, i = 1, 2$ where $\sigma = 1/\beta$). Then

$$\lim_{\substack{\sigma_1 \rightarrow \sigma \\ \sigma_2 \rightarrow \sigma}} p_{\text{miw}}(t) = 1 - \exp\left[-\exp\left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right)\right], \quad (12)$$

where

$$\mu = -\sigma \ln\left[\exp\left(\frac{-\mu_1}{\sigma}\right) + \exp\left(\frac{-\mu_2}{\sigma}\right)\right].$$

Equation (12) corresponds to a $\text{WEI}(\eta, \beta)$, where $\beta = 1/\sigma, \eta = \exp(\mu)$, with

$$\eta = \frac{\eta_1\eta_2}{(\eta_1^\beta + \eta_2^\beta)^{1/\beta}}. \quad \blacksquare$$

Note that (11) is well approximated by a Weibull distribution when μ_t is fairly constant. That is, when μ_t does not depend strongly on t . Values of σ_1 and σ_2 closed to each other might have that effect on μ_t . Observe, however, that μ_t could also be fairly linear in an interval of high probability content (with respect to the CRM cdf), if $\exp(-\mu_1/\sigma_1)$ dominates $t^{1/\sigma_2 - 1/\sigma_1} \exp(-\mu_2/\sigma_2)$ in that interval. Or equivalently, when $F_1(t) > F_2(t)$ in a interval with high $p_{\text{miw}}(t)$ probability content. A similarly situation arises when the second risk is the dominant

one, that is when $F_2(t) > F_1(t)$ in a interval with high $p_{miw}(t)$ probability content. Thus to anticipate the linearity of the CRM cdf in a probability plot, two factors emerge as important to be considered: (a) the closeness of the shape parameters and (b) the crossing point of the cdfs $F_1(t)$ and $F_2(t)$ associated with the two risks in the model. These two factors may or may not interact depending of the CRM model parameters. Extreme cases are when the crossing point is too far to the right or to the left in the plot in whose case the CRM cdf can be approximated well by a single Weibull distribution. Next section studies a CRM derived from a bivariate Weibull distribution with dependence between the risks. We will see that the properties for the CRM model with independent Weibull risks extend to this new CRM.

4. Competing Risks Model Derived From a Bivariate Weibull Distribution

In practical application the competing risks might not be independent and the dependence can greatly complicate the statistical modeling and the data analysis, see a detailed account in **Crowder** (2001, chapter 7). Here we consider a simple model that allows for positive dependence. In the analysis of lifetime data, models that allow for risks with positive dependence are reasonable because in those cases the risks are jointly leading toward shorter lives, but see **Crowder** (1989) for a somewhat dissenting opinion. The setting here is that the risks (T_1, T_2) are jointly distributed with a joint survival function $S(t_1, t_2) = \Pr(T_1 > t_1, T_2 > t_2)$ given by

$$S(t_1, t_2) = \exp \left\{ - \left[\left(\frac{t_1}{\eta_1} \right)^{\theta\beta_1} + \left(\frac{t_2}{\eta_2} \right)^{\theta\beta_2} \right]^{1/\theta} \right\}, \quad (13)$$

where $t_i \geq 0, \beta_i > 0, \eta_i > 0, i = 1, 2$, and $\theta > 1$. The η_i s are scale parameters and the β_i s are shape parameters. θ characterizes the association between the two variables. In particular, the Kendall's coefficient of association between T_1 and T_2 is equal to $1 - 1/\theta$.

Johnson and Kotz (1972, pages 268-269) have an early description of this distribution. **Lee** (1979, pages 268-269)

discusses this distribution in a larger context of multivariate distributions with Weibull properties. **Kotz, Balakrishnan, and Johnson** (2000, page 408) call it a Weibull form B and show how to derive it through power transformations of the variables from a bivariate exponential distribution. It can be shown that (13) corresponds to a Gumbel-Hougaard survival copula evaluated at two Weibull survival marginals, see **Nelsen** (2006, page 96). This bivariate Weibull has been used in dependent failure-times analysis, among others, by **Hougaard** (1986), **Hougaard** (1989), and **Lu and Bhattacharyya** (1990).

Using the log-location scales $w_i = [\ln(t_i) - \mu_i]/\sigma_i$, with $\mu_i = \ln(\eta_i), \sigma_i = 1/\beta_i$, the survival distributions in (13) becomes

$$S(t_1, t_2) = \exp \left\{ - [\exp(\theta w_1) + \exp(\theta w_2)]^{1/\theta} \right\}.$$

The joint distribution function of (T_1, T_2) is

$$F(t_1, t_2) = F_1(t_1) + F_2(t_2) + S(t_1, t_2) - 1, \quad (14)$$

where $F_1(t_1)$ and $F_2(t_2)$ are the Weibull marginal distributions of T_1 and T_2 given by

$$F_i(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta_i} \right)^{\beta_i} \right] = \Phi_{sev}(z_i), \quad i = 1, 2,$$

where the z_i are as in (2).

The distribution $F(t_1, t_2)$ is absolutely continuous and its density is (see Appendix D)

$$\begin{aligned} f(t_1, t_2) &= \frac{\partial^2 F(t_1, t_2)}{\partial t_1 \partial t_2} = \frac{\partial^2 S(t_1, t_2)}{\partial t_1 \partial t_2} \\ &= S(t_1, t_2) \frac{\partial \ln[S(t_1, t_2)]}{\partial t_1} \frac{\partial \ln[S(t_1, t_2)]}{\partial t_2} \\ &\quad \times \left[1 + \frac{(\theta - 1)}{-\ln[S(t_1, t_2)]} \right] \end{aligned}$$

where for $i = 1, 2$

$$\frac{\partial \ln[S(t_1, t_2)]}{\partial t_i} = - \frac{\exp(\theta w_i)}{\sigma_i t_i} [-\ln S(t_1, t_2)]^{1-\theta}.$$

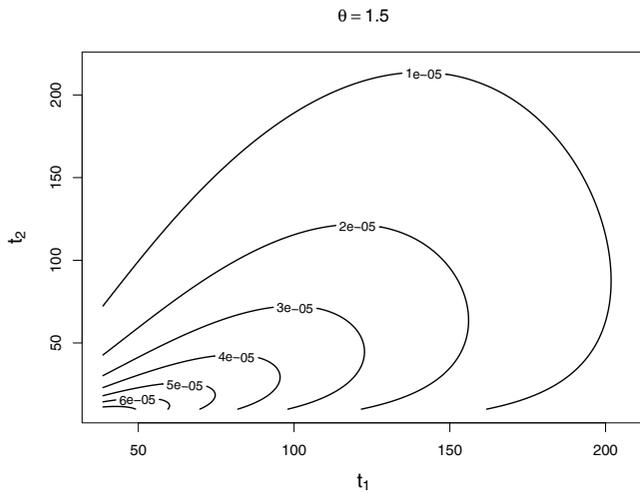


Figure 2: Density contours for the bivariate Weibull model with parameters $(\eta_1 = 150, \beta_1 = 1)$, and $(\eta_2 = 150, \beta_2 = 2)$, and $\theta = 1.5$.

Figure 2 shows contours of the bivariate Weibull for a specific and convenient choice of the parameters. The southwest to northeast orientation of the plot is an effect of the positive dependence ($\theta = 1.5$) between the two Weibull risks. With independence, that is $\theta = 1$, and everything else being the same, the density contours will be fairly symmetric about a vertical line drawn at time $t_1 = 106$.

The CRM derived from the Bivariate Weibull

As before, using $T_m = \min(T_1, T_2)$, it follows that the survival function $s_{mdw}(t)$ of T_m is

$$\begin{aligned}
 s_{mdw}(t) &= \Pr(T_1 > t, T_2 > t) = S(t, t) \\
 &= \exp \left\{ - \left[\left(\frac{t}{\eta_1} \right)^{\theta\beta_1} + \left(\frac{t}{\eta_2} \right)^{\theta\beta_2} \right]^{1/\theta} \right\} \\
 &= \exp \left\{ - [\exp(\theta z_1) + \exp(\theta z_2)]^{1/\theta} \right\}, \quad (15)
 \end{aligned}$$

where $z_i = [\ln(t) - \mu_i] / \sigma_i$, $\mu_i = \ln(\eta_i)$, and $\sigma_i = 1/\beta_i$. The related distribution function p_{mdw} for the CRM T_m

is

$$p_{mdw}(t) = 1 - \exp \left\{ - [\exp(\theta z_1) + \exp(\theta z_2)]^{1/\theta} \right\}. \quad (16)$$

With $\theta = 1$, the pdf $p_{mdw}(t)$ is equal to the cdf $p_{miw}(t)$ for the CRM with independent risks T_1 and T_2 .

Result 4. Consider the cdf, $p_{mdw}(t)$, given in (16). Then (see Appendix A)

1. For each t , $p_{mdw}(t)$ is a monotone decreasing function of θ .
2. Assuming, without loss of generality, that $\beta_1 < \beta_2$,

$$\lim_{\theta \rightarrow \infty} p_{mdw}(t) = \begin{cases} F_1(t) & \text{if } t \leq t_c \\ F_2(t) & \text{if } t \geq t_c, \end{cases}$$

where t_c is the time at which the marginal distributions $F_1(t)$ and $F_2(t)$ cross. That is, the time at which $z_1 = z_2$, or equivalently

$$t_c = \left(\frac{\eta_2^{\beta_2}}{\eta_1^{\beta_1}} \right)^{1/(\beta_2 - \beta_1)}.$$

3. When $\beta_1 = \beta_2$,

$$\lim_{\theta \rightarrow \infty} p_{mdw}(t) = \begin{cases} F_1(t) & \text{if } \eta_1 \leq \eta_2 \\ F_2(t) & \text{if } \eta_2 \leq \eta_1 \end{cases}$$

for all $t > 0$.

■

Result 4 implies that the cdf $p_{mdw}(t)$ of T_m , for the bivariate case with dependence, is bounded from above by the cdf p_{miw} of T_m in the model with independent risks and below by the marginals associated with the Weibull bivariate risks. For example, in Figure 3, the dashed line (the one closest to the northwest corner) corresponds to the CRM with $\theta = 1$. The solid line is the CRM with $\theta = \infty$. This cdf agrees with the distribution of Risk 1 for times before the time at which the two marginals cross each other and with the distribution of Risk 2 for times after that crossing point of the marginals.

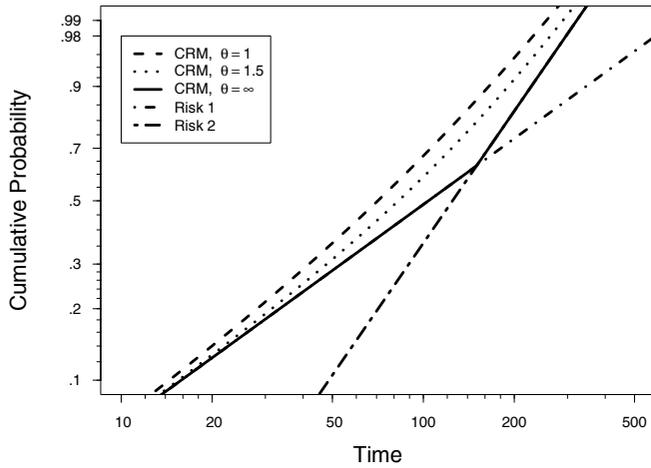


Figure 3: Weibull probability plot of the competing risks model with dependent risks. Risk 1 and Risk 2 are WEI($\eta_1 = 150, \beta_1 = 1$) and WEI($\eta_2 = 150, \beta_2 = 2$), respectively. $\theta = 1.0, 1.5, \infty$.

Important properties of the CRM with dependent Weibull risks

Result 5. Consider the Weibull probability plot $\{x = \ln t, y = \Phi_{sev}^{-1}[p_{mdw}(t)]\}$ of the cdf $p_{mdw}(t)$ in (16) for the CRM derived from the bivariate Weibull distribution in (14). The following results hold.

- (a) The slope of $p_{mdw}(t)$ in the probability plot is the convex combination

$$\frac{dy}{d \ln t} = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\sigma_i} \frac{\exp(\theta z_i)}{[\exp(\theta z_1) + \exp(\theta z_2)]}, \quad (17)$$

where $z_i = [\ln(t) - \mu_i] / \sigma_i$.

To verify this result, use (15) to obtain the y -ordinate

$$\begin{aligned} y &= \ln[-\ln(s_{mdw}(t))] \\ &= \frac{1}{\theta} \ln[\exp(\theta z_1) + \exp(\theta z_2)]. \end{aligned}$$

Then taking the derivative of y with respect to $\ln t$ yields (17), see Appendix B.1.

The similarity between (7) and (17) is more than a simple coincidence. We proceed to show that the CRM $p_{mdw}(t)$ is an extension of the CRM $p_{miw}(t)$ with characteristics very similar to the $p_{miw}(t)$ model. The similarities between the two models was unknown to us at the outset of this study.

- (b) When $\beta_1 = \beta_2 = \beta$, $p_{mdw}(t)$ is the cdf of a WEI(η, β) where

$$\eta = \frac{\eta_1 \eta_2}{(\eta_1^{\theta\beta} + \eta_2^{\theta\beta})^{1/(\theta\beta)}}. \quad (18)$$

With $\beta_1 = \beta_2 = \beta$, then $\sigma_1 = \sigma_2 = 1/\beta$ and it follows from (17) that

$$\frac{dy}{d \ln t} = \frac{1}{\sigma} = \beta$$

which implies that $p_{mdw}(t)$ is a WEI(η, β). The specific value of η is derived in Appendix C.

It is interesting that, even in the presence of dependence, the equality of the shape parameters implies a Weibull distribution for the CRM cdf, $p_{mdw}(t)$.

See the related **Result 6** below which shows that when the shape parameters of the risks are closed to each other, the CRM has a distribution that might be approximated by a simple Weibull distribution.

- (c) The slope of the curve $[\ln t, y]$ is bounded by (β_1, β_2) as follows

$$\min(\beta_1, \beta_2) \leq \frac{dy}{d \ln t} \leq \max(\beta_1, \beta_2).$$

To prove this, suppose that $\max_i \{1/\sigma_i\} = 1/\sigma_2$ then using (17) it can be verified that

$$\frac{1}{\sigma_1} \leq \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\sigma_i} \frac{\exp(\theta z_i)}{[\exp(\theta z_1) + \exp(\theta z_2)]} \leq \frac{1}{\sigma_2}.$$

As in the case of independent risks it is useful to know that the CRM cdf has a derivative with respect to $\ln t$ that is bounded by the shape parameters of the risks defining the model.

(d) In the limit

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dy}{d \ln t} &= \max(\beta_1, \beta_2) \\ \lim_{t \rightarrow 0} \frac{dy}{d \ln t} &= \min(\beta_1, \beta_2). \end{aligned} \tag{19}$$

To prove this, note that if $\sigma_1 = \sigma_2$ the result holds in view of item (b) above. Then assume that $\sigma_1 \neq \sigma_2$. If $\max_i \{1/\sigma_i\} = 1/\sigma_k = \beta_k$ then

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\exp(\theta z_i)}{[\exp(\theta z_1) + \exp(\theta z_2)]} = \begin{cases} 1 & \text{for } i = k \\ 0 & \text{for } i \neq k \end{cases} \tag{20}$$

and

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\exp(\theta z_i)}{[\exp(\theta z_1) + \exp(\theta z_2)]} = \begin{cases} 0 & \text{for } i = k \\ 1 & \text{for } i \neq k. \end{cases} \tag{21}$$

Using (20) and (21), when taking the limits of $dy/d \ln t$, yield the results in (19) for the limiting behavior of the derivative function.

(e) The curve $[\ln t, y]$ is concave when $\beta_1 \neq \beta_2$.

Taking the derivative of (17) with respect to $\ln t$ (see Appendix B.2)

$$\frac{d^2 y}{d(\ln t)^2} = \left(\frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\sigma_2} \right)^2 \frac{\theta \exp(\theta z_1 + \theta z_2)}{[\exp(\theta z_1) + \exp(\theta z_2)]^2}.$$

Because this second derivative is positive, the concavity of the curve follows. The concavity, however, is also proportional to θ and large values of θ could imply large concavity and curvature of the curve even in the presence of shape parameters that are closed to each other. This is different to what happens in the independent risks case where similar shape parameters imply small concavity. ■

CRM with dependent Weibull risks and similar shape parameters

Result 6. Consider the cdf $p_{\text{mdw}}(t)$ of the CRM given in (16) and derived from the bivariate model with dependence in (14). When $\beta_i \rightarrow \beta > 0, i = 1, 2, p_{\text{mdw}}(t)$

converges in distribution to a WEI(η, β) where

$$\eta = \frac{\eta_1 \eta_2}{\left(\eta_1^{\theta \beta} + \eta_2^{\theta \beta} \right)^{1/(\theta \beta)}}.$$

See Appendix C for justification of the result. ■

Note that the limiting Weibull distribution WEI(η, β) was already obtained in (18) as a special case of equal shape parameters. The special case with independent risks given in **Result 3** is obtained with the value $\theta = 1$.

5. Other Competing Risks Models

As noted earlier, the findings in **Result 2** extend directly to a CRM with $k > 2$ independent Weibull risks and cdf $p_{\text{miw}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^k [1 - \Phi_{\text{sev}}(z_i)]$, where $z_i = [\ln(t) - \mu_i]/\sigma_i, i = 1, \dots, k$.

The bivariate Weibull model described in (13) has been extended to the case of $k > 2$ dependent risks. In this case, the survival function is $S(t_1, \dots, t_k) = \exp \left\{ - \left[\sum_{i=1}^k \exp(\theta w_i) \right]^{1/\theta} \right\}$, where $w_i = [\ln(t_i) - \mu_i]/\sigma_i$. **Lee and Wen** (2010) derive the density and the general moments of the distribution for any integer $k \geq 2$. They also apply the model to a data set with three variables. All the properties in **Result 5** extend readily to the CRM cdf, $p_{\text{mdw}}(t) = 1 - \exp \left\{ - \left[\sum_{i=1}^k \exp(\theta z_i) \right]^{1/\theta} \right\}$, $z_i = [\ln(t) - \mu_i]/\sigma_i$, derived from this $k > 2$ dimensional Weibull distribution with dependent risks.

There is a large number of other Weibull multivariate models. **Murthy, Xie, and Jiang** (2004) provide a comprehensive collection of univariate and multivariate Weibull models and **Crowder** (1989) proposes an interesting multivariate Weibull model. There is not, however, assurance that the properties discussed here are satisfied by those models. For other models of interest, their properties need to be studied separately.

A natural inquire is if the results presented here extend to the CRM model derived from log-location-families. We have not studied this in detail, but the items in **Result 2** do not extend in their full generality to a CRM derived from a log-location-scale family. This was surprising and unexpected to us. For example,

suppose $T_i \sim \text{LOGNOR}(\mu_i, \sigma_i)$, $i = 1, 2$ with T_1 and T_2 independent. As before $T_m = \min(T_1, T_2)$. Thus, $F_m(t) = 1 - \Phi_{\text{nor}}(-z_1)\Phi_{\text{nor}}(-z_2)$ and the slope of the curve $\{x = \ln t, y = \Phi_{\text{nor}}^{-1}[F_m(t)]\}$, see (4), in a lognormal probability plots is

$$\frac{dy}{d \ln t} = \frac{\frac{1}{\sigma_1} \phi_{\text{nor}}(z_1) \Phi_{\text{nor}}(-z_2) + \frac{1}{\sigma_2} \phi_{\text{nor}}(z_2) \Phi_{\text{nor}}(-z_1)}{\phi_{\text{nor}}[\Phi_{\text{nor}}^{-1}\{1 - \Phi_{\text{nor}}(-z_1)\Phi_{\text{nor}}(-z_2)\}]}$$

where $\phi_{\text{nor}}(z)$ and $\Phi_{\text{nor}}(z)$ are the standardized normal pdf and cdf, respectively. Figure 4 shows the slope of the curve when $\mu_1 = 5, \mu_2 = 6, \sigma_1 = 3$, and $\sigma_2 = 2$. Clearly,

$$\frac{dy}{d \ln t} \geq \max\left(\frac{1}{\sigma_1}, \frac{1}{\sigma_2}\right) = 0.5$$

for $t > 236$. In contrast to the Weibull case, the slope of the $F_m(t)$ in the lognormal probability plot is not bounded by the σ_i s as in (9).

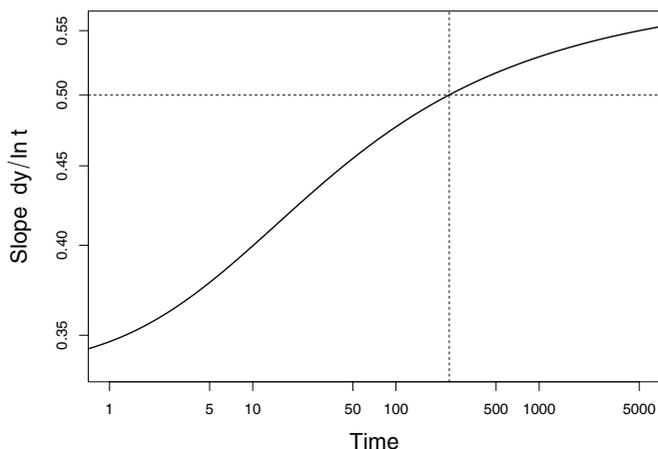


Figure 4: Slope on lognormal probability plot of cdf for the CRM with independent lognormal risks. Risk 1 and Risk 2 are $\text{LOGNOR}(\mu_1 = 5, \sigma_1 = 3)$ and $\text{LOGNOR}(\mu_2 = 6, \sigma_2 = 2)$ distributed, respectively.

6. Conclusions and Future Work

The characteristics of the Weibull CRM with independent risks and the CRM derived from the bivariate

Weibull with dependence are very similar. For a CRM with two risks, based on the information drawn from this work, we can say that important factors in deciding when the inference is robust to ignoring the failure mode include: (a) the relative sizes of the Weibull scale parameters; (b) the crossing point of the marginal distributions; and (c) the size of the dependence among the factors.

Similar conclusions apply to the models with $k > 2$ risks considered here. A single Weibull model might describe the CRM well if: (a) the ratio between the largest and the smallest shape parameters is small and the dependence among the risks is not large; or (b) there is a dominant risk.

It is plausible that these continue to be important factors when studying the CRM for other distributions, but additional work is needed to corroborate these preliminary findings.

There is need to study other distributions beside the Weibull and the lognormal and to consider other situations with dependent risks. The brief look into the lognormal case indicates that caution should be exercised when trying to generalize the conclusions to other distributions because the results do not seem to be completely generalizable to other competing risks situations of interest like CRMs derived from general log-location-scale families.

Eventually, the model robustness problem will have to be addressed using meaningful and well formulated simulation studies with complete, dependent, and censored data. Toward that end, the results of studies like the one pursued here would be useful because a good understanding of the important factors in a model facilitate the test planning and the interpretation of a simulation study.

Acknowledgments

This work was supported by Colciencias, Colombia. This is part of the research project "Characterization of Dependence in Competing Risks Models in Industrial Reliability Data," code 110152128913. This project is directed by Sergio Yáñez, Luis Escobar, and Nelfi González.

7. Appendixes

A. Monotonicity of the CRM cdf $p_{\text{mdw}}(t)$ as a function of θ

From (15), $s_{\text{mdw}}(t) = \exp(-R^{1/\theta})$, where $R = \exp(\theta z_1) + \exp(\theta z_2)$, and $z_i = (\ln(t) - \mu_i)/\sigma_i$, $i = 1, 2$. Consider

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \ln R^{1/\theta}}{\partial \theta} \\ &= -\frac{\ln R}{\theta^2} + \frac{\theta z_1 \exp(\theta z_1) + \theta z_2 \exp(\theta z_2)}{\theta^2 R} \\ &= \frac{\theta z_1 \exp(\theta z_1) + \theta z_2 \exp(\theta z_2) - R \ln(R)}{\theta^2 R} \\ &= \frac{(\theta z_1 - \ln(R)) \exp(\theta z_1) + (\theta z_2 - \ln(R)) \exp(\theta z_2)}{\theta^2 R}. \end{aligned}$$

Note that $\ln(R) = \ln[\exp(\theta z_1) + \exp(\theta z_2)] > \ln[\exp(\theta z_i)] = \theta z_i$, for $i = 1, 2$. Thus for fix t , $[\partial \ln(R^{1/\theta})/\partial \theta] < 0$. This implies that $R^{1/\theta}$ is monotone decreasing on θ . Consequently, $s_{\text{mdw}}(t)$ is increasing on θ and $p_{\text{mdw}}(t) = 1 - s_{\text{mdw}}(t)$ is decreasing on θ .

B. Important Properties of the CRM

This appendix provides details of the properties of the CRM derived from the bivariate Weibull defined in (13). The correspondent properties for the CRM with independent Weibull risks are obtained by setting the dependence parameter to $\theta = 1$.

B.1. Slope of the curve $\{\ln t, \Phi_{\text{sev}}^{-1}[p_{\text{mdw}}(t)]\}$ in a Weibull probability plot

From the definition of $\phi_{\text{sev}}(z)$ and $\Phi_{\text{sev}}^{-1}(p)$ in (8) and using (15) and (16), we get that for $0 < p < 1$,

$$\begin{aligned} \phi_{\text{sev}}[\Phi_{\text{sev}}^{-1}(p)] &= \exp\{\ln[-\ln(1-p)]\} \\ &\quad \times \exp\{-\exp[\ln(-\ln(1-p))]\} \\ &= -[1-p] \ln[1-p]. \end{aligned}$$

Then with $p = p_{\text{mdw}}(t)$, we get

$$\begin{aligned} \phi_{\text{sev}}[\Phi_{\text{sev}}^{-1}(p_{\text{mdw}}(t))] &= -[1-p_{\text{mdw}}(t)] \ln[1-p_{\text{mdw}}(t)] \\ &= s_{\text{mdw}}(t) \times \{-\ln[s_{\text{mdw}}(t)]\}. \end{aligned} \quad (22)$$

Now we compute $t d_{\text{mdw}}(t)$, where $d_{\text{mdw}}(t)$ is the density corresponding to the cdf $p_{\text{mdw}}(t)$ given in (16).

Direct differentiation of $p_{\text{mdw}}(t)$ yields

$$\begin{aligned} t d_{\text{mdw}}(t) &= s_{\text{mdw}}(t) \{-\ln[s_{\text{mdw}}(t)]\} \\ &\quad \times \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\sigma_i} \frac{\exp(\theta z_i)}{[\exp(\theta z_1) + \exp(\theta z_2)]}. \end{aligned} \quad (23)$$

Taking the ratio between (23) and (22) and using (1), we get

$$\frac{dy}{d \ln t} = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\sigma_i} \frac{\exp(\theta z_i)}{[\exp(\theta z_1) + \exp(\theta z_2)]}$$

which is the result suggested in (17). Note that with $\theta = 1$, one obtains the independent risks case suggested in (7).

B.2. Concavity of the curve $\{\ln t, \Phi_{\text{sev}}^{-1}[p_{\text{mdw}}(t)]\}$ in a Weibull probability plot

To show that the second derivative of y with respect to $\ln t$ is positive, we write

$$\begin{aligned} \frac{dy}{d \ln t} &= \frac{1}{\sigma_1} \frac{1}{\{1 + \exp[\theta(z_2 - z_1)]\}} \\ &\quad + \frac{1}{\sigma_2} \frac{1}{\{1 + \exp[\theta(z_1 - z_2)]\}}. \end{aligned}$$

Then

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{d(\ln t)^2} &= \left(\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_1 \sigma_2}\right) \frac{\theta \exp[\theta(z_2 - z_1)]}{\{1 + \exp[\theta(z_2 - z_1)]\}^2} \\ &\quad + \left(\frac{1}{\sigma_2^2} - \frac{1}{\sigma_1 \sigma_2}\right) \frac{\theta \exp[\theta(z_1 - z_2)]}{\{1 + \exp[\theta(z_1 - z_2)]\}^2} \\ &= \left(\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_1 \sigma_2}\right) \frac{\theta \exp[\theta(z_1 + z_2)]}{[\exp(\theta z_1) + \exp(\theta z_2)]^2} \\ &\quad + \left(\frac{1}{\sigma_2^2} - \frac{1}{\sigma_1 \sigma_2}\right) \frac{\theta \exp[\theta(z_1 + z_2)]}{[\exp(\theta z_1) + \exp(\theta z_2)]^2} \\ &= \left(\frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\sigma_2}\right)^2 \frac{\theta \exp[\theta(z_1 + z_2)]}{[\exp(\theta z_1) + \exp(\theta z_2)]^2} > 0. \end{aligned}$$

For the CRM with independent Weibull risks, use $\theta = 1$. In this case the second partial derivative is still positive and takes the value suggested in (10).

C. Cdf for CRM with Weibull Dependent Risks and Similar or Equal Shape Parameters

$$\begin{aligned}
 p_{\text{mdw}}(t) &= 1 - \exp \left\{ - [\exp(\theta z_1) + \exp(\theta z_2)]^{1/\theta} \right\} \\
 &= 1 - \exp \left\{ -t^{1/\sigma_1} \left[\exp \left(\frac{-\theta \mu_1}{\sigma_1} \right) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + t^{\theta/\sigma_2 - \theta/\sigma_1} \exp \left(\frac{-\theta \mu_2}{\sigma_2} \right) \right]^{1/\theta} \right\} \\
 &= 1 - \exp \left[- \exp \left(\frac{\ln(t) - \mu_t}{\sigma_1} \right) \right],
 \end{aligned}$$

where

$$\mu_t = -\frac{\sigma_1}{\theta} \ln \left[\exp \left(\frac{-\theta \mu_1}{\sigma_1} \right) + t^{\theta/\sigma_2 - \theta/\sigma_1} \exp \left(\frac{-\theta \mu_2}{\sigma_2} \right) \right].$$

When $\beta_i \rightarrow \beta > 0, i = 1, 2$, it follows that $\sigma_i \rightarrow \sigma = 1/\beta > 0, i = 1, 2$, and

$$\lim \mu_t \rightarrow \mu = -\frac{\sigma}{\theta} \ln \left[\exp \left(\frac{-\theta \mu_1}{\sigma} \right) + \exp \left(\frac{-\theta \mu_2}{\sigma} \right) \right].$$

Thus $p_{\text{mdw}}(t)$ is the cdf of a WEI(η, β), where

$$\eta = \exp(\mu) = \frac{\eta_1 \eta_2}{\left(\eta_1^{\theta \beta} + \eta_2^{\theta \beta} \right)^{1/(\theta \beta)}}. \tag{24}$$

Note that: (a) when $\beta_1 = \beta_2 = \beta, p_{\text{mdw}}(t)$ is the cdf of a WEI(η, β) with η given by (24); (b) when $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ and $\theta = 1, p_{\text{mdw}}(t) = p_{\text{miw}}(t)$ and they are the cdf of a WEI(η, β) with η given by (24) evaluated at $\theta = 1$. This is the CRM cdf with independent Weibull risks considered in **Result 3**.

D. Bivariate Density

The density is given by the mixed second partial derivative of $S(t_1, t_2)$ with respect to t_1 and t_2 . For simplicity write $S = S(t_1, t_2)$ and define $M = -\ln(S) = [\exp(\theta w_1) + \exp(\theta w_2)]^{1/\theta}$. Using $w_i = [\ln(t_i) - \mu_i]/\sigma_i$ and taking the derivative of $\ln(S)$ with respect to t_2 ,

$$\frac{\partial \ln(S)}{\partial t_2} = -\frac{\partial M}{\partial t_2}.$$

Equivalently,

$$\frac{\partial S}{\partial t_2} = -S \frac{\partial M}{\partial t_2}.$$

Taking the derivative with respect to t_1

$$\frac{\partial^2 S}{\partial t_1 \partial t_2} = S \left(\frac{\partial M}{\partial t_1} \frac{\partial M}{\partial t_2} - \frac{\partial^2 M}{\partial t_1 \partial t_2} \right). \tag{25}$$

Direct computations yield

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial M}{\partial t_1} &= M^{1-\theta} \frac{\exp(\theta w_1)}{\sigma_1 t_1} \quad \text{and} \\
 \frac{\partial^2 M}{\partial t_1 \partial t_2} &= (1-\theta) \frac{M^{2-2\theta}}{M} \prod_{i=1}^2 \frac{\exp(\theta w_i)}{\sigma_i t_i}.
 \end{aligned} \tag{26}$$

Substituting (26) into (25)

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 S}{\partial t_1 \partial t_2} &= S \left[\frac{\partial M}{\partial t_1} \frac{\partial M}{\partial t_2} + (\theta - 1) \frac{M^{2-2\theta}}{M} \prod_{i=1}^2 \frac{\exp(\theta w_i)}{\sigma_i t_i} \right] \\
 &= S \frac{\partial M}{\partial t_1} \frac{\partial M}{\partial t_2} \left(1 + \frac{\theta - 1}{M} \right) \\
 &= S \frac{\partial \ln(S)}{\partial t_1} \frac{\partial \ln(S)}{\partial t_2} \left[1 + \frac{\theta - 1}{-\ln(S)} \right],
 \end{aligned}$$

where for $i = 1, 2$

$$\frac{\partial \ln(S)}{\partial t_i} = -\frac{\exp(\theta w_i)}{\sigma_i t_i} [-\ln(S)]^{1-\theta}.$$

See **Lu and Bhattacharyya** (1990, page 554) for an equivalent expression for the density.

References

Crowder, M. (1989). A multivariate distribution with Weibull connections. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* **51**(1): 93–107.

Crowder, M. J. (2001). *Classical Competing Risks*. New York: Chapman & Hall/CRC.

Crowder, M. (2012). *Multivariate Survival Analysis and Competing Risks*. New York: Chapman & Hall/CRC.

- Courant, R. and F. John (1965). *Introduction to Calculus and Analysis: Volume One*. New York: Interscience Publishers.
- Hougaard, P. (1986). A class of multivariate failure time distributions. *Biometrika* **73**(3): 671–678.
- Hougaard, P. (1989). Fitting a multivariate failure time distribution. *IEEE Transactions on Reliability* **38**(4): 444–448.
- Jiang, R. and D. Murthy (2003). Study of n -fold Weibull competing risk model. *Mathematical and Computer Modelling* **38**(11), 1259–1273.
- Johnson, N. L. and S. Kotz (1972). *Continuous Multivariate Distributions*. New York: John Wiley & Sons.
- Kotz, S., N. Balakrishnan, and N. L. Johnson (2000). *Continuous Multivariate Distributions* (Second edition). New York: John Wiley & Sons.
- Lawless, J. F. (2003). *Statistical Models and Methods for Lifetime Data* (Second edition). New York: John Wiley & Sons.
- Lee, C. and M. J. Wen (2010). A multivariate Weibull distribution. *Pakistan Journal of Statistics and Operation Research* **5**(2).
- Lee, L. (1979). Multivariate distributions having Weibull properties. *Journal of Multivariate Analysis* **9**: 267–277.
- Lu, J. C. and G. K. Bhattacharyya (1990). Some new constructions of bivariate Weibull models. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics* **42**(3): 543–559.
- Meeker, W. Q. and L. A. Escobar (1998). *Statistical Methods for Reliability Data*. New York: John Wiley & Sons.
- Meeker, W. Q., L. A. Escobar, and Y. Hong (2009). Using accelerated life tests results to predict product field reliability. *Technometrics* **51**(2): 146–161.
- Murthy, D. P., M. Xie, and R. Jiang (2004). *Weibull Models*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Nelsen, R. B. (2006). *An Introduction to Copulas* (Second edition). New York: Springer-Verlag.
- Pintilie, M. (2006). *Competing Risks. A Practical Perspective*. New York: John Wiley & Sons.

Metagabros de la isla Gran Roque (Venezuela). Geoquímica y petrografía

Luz Mary Toro-Toro*, Mario Moreno-Sánchez, Arley de Jesús Gómez-Cruz, Juliana Giraldo-García

Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

Resumen

La isla Gran Roque, situada al norte de Venezuela, es una de las pocas islas del sur del Caribe en donde afloran rocas de corteza oceánica. Estas rocas corresponden a metagabros de grano fino a grueso, con textura relicto subofítica definida por cristales de plagioclasa rodeados por minerales ferromagnesianos.

La asociación de actinolita, clorita, plagioclasa y cuarzo indica que la roca alcanzó un grado metamórfico bajo en facies de esquivo verde. La composición geoquímica de las rocas de la isla Gran Roque es coherente con la clasificación petrográfica. Estas rocas muestran afinidad toleítica y patrones planos de tierras raras, lo que indica que provienen de magmas generados en dorsales oceánicas de tipo MORB-N.

Palabras clave: Gran Roque, meta-gabros, MORB-N, Venezuela.

Abstract

Metagabbros of Gran Roque Island (Venezuela). Geochemistry and petrography

The Gran Roque Island, located in northern Venezuela, is part of the southern Caribbean islands where the basic basement is outcropping. This basement is composed of fine-grained metagabbros, with subophitic relict texture defined by the larger plagioclase laths that enclose the ferromagnesian minerals.

The mineral assemblage of chlorite-actinolite-plagioclase-quartz indicates that the rock reached a low metamorphic grade green schist facies. The chemistry of the Gran Roque island metagabbros supports the petrographic identification and characterization. These rocks exhibit tholeiitic affinity and REE flat patterns, which could be correlated to magmas generated at oceanic ridges of N-MORB type.

Key words: Gran Roque, metagabbros, N-MORB, Venezuela.

Introducción

El grosor de la corteza oceánica “normal” rara vez supera los 10 kilómetros; sin embargo, se calcula que en las áreas de emisión de basaltos de meseta (*plateau* o, en sentido más amplio, “grandes provincias ígneas” o LIP, del inglés *large igneous provinces*), el espesor de la corteza puede alcanzar entre 15 y 30 kilómetros (Sinton, 1996; Sinton, *et al.*, 1998). La mayor parte de la placa del Caribe se atribuye a la actividad de un punto caliente, el que se presume estuvo situado en el océano Pacífico durante el Cretácico tardío y que produjo una fuerte actividad ígnea intrusiva y extrusiva que engrosó la corteza (Donnelly, *et al.*, 1973; Edgar, *et al.*, 1971). La placa del Caribe es un segmento de litosfera terrestre conformado principalmente por una corteza oceánica de rocas básicas cubierto por el mar Caribe, con una extensión de 3,2 millones de kilómetros y un promedio de profundidad de 2.500 metros. Debido a su gran espesor, la placa del Caribe pudo haberse emplazado por obducción sobre el margen

occidental del norte de Sudamérica, formando una serie de terrenos producto de la acreción en los Andes de Colombia y Ecuador (Kerr, *et al.*, 1996a; Saunders, *et al.*, 1996).

El espesor de la placa del Caribe no es uniforme: varía desde los 8 km en la corteza oceánica normal hasta los 20 km en la corteza engrosada o *plateau*. Aunque la corteza engrosada es una característica dominante en la placa, también es común encontrar corteza normal del tipo extensional, como en la cresta de Beata y el escarpe de Hess (Sinton, *et al.*, 1998). El acceso directo al basamento de la placa del Caribe ha estado limitado a las perforaciones hechas durante el *Deep Sea Drilling Project* (DSDP) y el *Ocean Drilling Program* (ODP), por medio de los cuales se ha reconocido la estructura y composición de los gabros y basaltos de esta

*Correspondencia:

Luz Mary Toro-Toro, luz.toro@ucaldas.edu.co

Recibido: 7 de mayo de 2014

Aceptado: 15 de septiembre de 2014

placa (**Donnelly, et al.**, 1973). Son evidentes las dificultades para acceder al basamento de la placa del Caribe *in situ*, sin embargo, la exposición del basamento en “ventanas tectónicas” (**Sinton, et al.**, 1998) en los márgenes de la placa es una oportunidad para estudiar la estructura y la composición de estas rocas.

El margen sur de la placa del Caribe, que limita con el norte de Sudamérica, es una zona tectónicamente difusa y de gran complejidad estructural. El límite puede trazarse dentro de una amplia faja constituida por una serie de fallas de rumbo y cabalgamientos que afectan el norte de Colombia, las islas de Barbados, Trinidad, Tobago, Aruba, el archipiélago de los Roques y la costa norte de Venezuela. Además, la placa del Caribe es geológicamente importante, ya que es una de las grandes provincias ígneas (LIP) del mundo, cuyo origen se sitúa en el océano Pacífico durante el Cretácico tardío (**Duncan & Hargraves**, 1984).

El archipiélago de los Roques, cerca de la costa norte de Venezuela, es uno de los pocos lugares al sur de la placa del Caribe en los que esta expone su suelo, lo cual es geológicamente importante, ya que su basamento puede arrojar luz sobre la posible homogeneidad geoquímica de dicha placa.

Según **Schubert & Moticska** (1972), las rocas del basamento que afloran en la isla Gran Roque (Venezuela), situada al sur de la placa del Caribe, están enmarcadas dentro del denominado “complejo metaígneo de Gran Roque”. La isla tiene una superficie de 1,7 km², constituida en su mayor parte por depósitos recientes; en el sector norte se exponen cerca de 0,6 km² de basamento constituido principalmente por metadiabasas y metagabros (**González de Juana, et al.**, 1980; **Ostos**, 1990; **Urbani**, 2005); según **Schubert & Moticska** (1972), las rocas de la isla están afectadas tanto por metamorfismo de contacto como por metamorfismo regional bajo en la zona de clorita. Las islas de Gran Roque y La Orchila, 60 km al este, se encuentran intruidas por rocas ácidas, entre las que se cuentan cuerpos graníticos, diques aplíticos, y diques pegmatíticos; sin embargo, en La Orchila se expone un zócalo más antiguo constituido por esquistos, filitas y neises (**Schubert & Moticska**, 1972). En la isla de Gran Roque las rocas más antiguas corresponden a anfibolitas y gabros metamorfoseados con una edad de 130 ± 14 millones de años (Ma), e intruidas por rocas félsicas de una edad de 65 ± 3,6 Ma, edades calculadas con el método K/Ar (**Santamaría & Schubert**, 1974). Según el análisis geoquímico presentado por **Ostos** (1990), los metabasaltos y metadiabasas de la isla son de naturaleza toleítica, y su ambiente geológico es de basaltos de dorsal. En cuanto a las rocas graníticas, **Ostos** (1990) concuerda con **Santamaría y Schubert** (1974) en que estas se originaron en un arco de islas volcánico.

El objeto de este trabajo es aportar nuevos datos petrográficos y geoquímicos de las rocas de la placa del Caribe que afloran en la isla Gran Roque (Venezuela). Los resultados obtenidos en este trabajo servirán en parte como base de comparación con bloques o terrenos que se sospecha podrían ser fragmentados de la placa del Caribe original.

Localización

El área de estudio (isla Gran Roque) se localiza en el mar Caribe, en el extremo noroeste del archipiélago de Los Roques, el cual se encuentra dentro de la cadena de las islas Aruba – Los Testigos, al norte de las costas venezolanas (Figura 1). Las coordenadas geográficas que limitan la zona de estudio son 11° 56' 35" y 11° 57' 32" latitud norte, 66° 41' 49" y 66° 39' 47" longitud oeste. La isla Gran Roque tiene forma de cuña alargada en dirección noroeste, tiene una longitud de 3 km y un ancho máximo de 1 km (Figura 1), su área es de aproximadamente de 1,7 km² (**Schubert & Moticska**, 1972). Dicha isla está a unos 168 km al norte de La Guaira, puerto de Caracas. A la zona de estudio se accede por vía marítima o aérea.

Metodología

Se tomaron muestras para análisis petrográficos y geoquímicos de roca total, estos últimos elaborados por los Laboratorios AcmeLabs (*Acme Analytical Laboratories*) en Vancouver BC, Canadá, mediante el método de espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (*Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry*, ICP – MS). La precisión que se logra por este procedimiento es de ±2 y ±5 para una concentración analítica entre 50 y 5 ppm, respectivamente. El análisis modal se llevó a cabo utilizando un conteo de 500 puntos.

Marco geológico regional

La región Caribe es muy compleja desde el punto de vista tectónico, ya que es el resultado de la interacción de la placa del Caribe con las placas de Nazca, Cocos, Norteamérica y Sudamérica. Los límites actuales de la placa del Caribe son los siguientes.

Al este, con la zona de subducción de las placas de Norteamérica y Sudamérica por debajo de la placa del Caribe, dando lugar al arco volcánico de las Antillas Menores.

El límite occidental es la zona de subducción entre las placas de Cocos y Nazca, que subducen bajo la placa del Caribe, dando lugar al arco volcánico centroamericano.

Al norte, el límite se encuentra dominado por el desplazamiento transcurrente con la placa de Norteamérica, desde el centro de Guatemala hasta el norte de las Antillas Menores, que se manifiesta mediante extensos sistemas de fallas de desgarre.

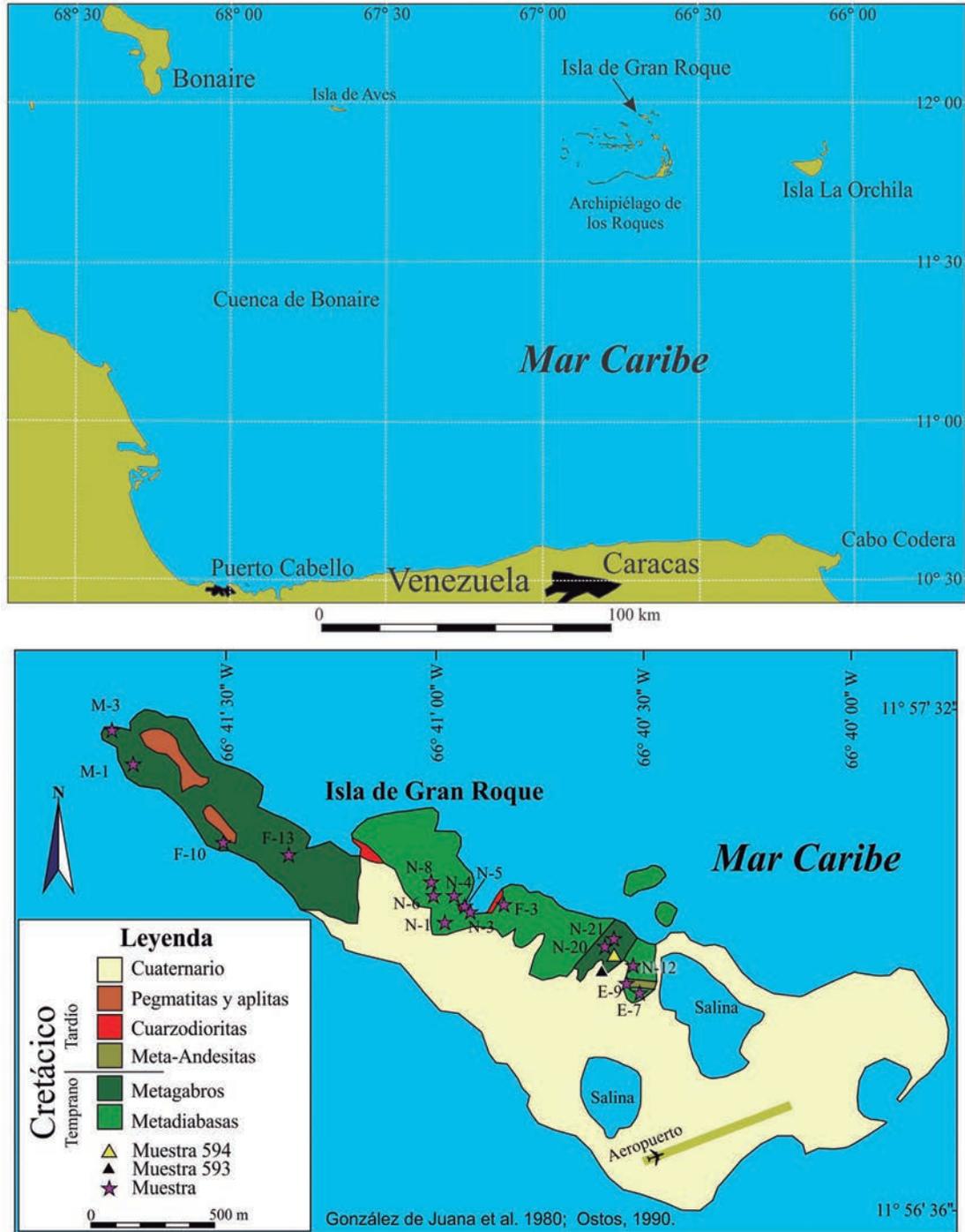


Figura 1. Mapa Geológico y de localización de La Isla Gran Roque, Archipiélago Los Roques (Venezuela). Las estrellas indican los sitios de muestreo de Ostos (1990) y los triángulos de este trabajo.

Por último, el límite sur, ha actuado de manera transcurrente con un sentido dextro durante la mayor parte de la historia geológica y en la actualidad funciona como una zona de subducción en la que la placa del Caribe se consume por debajo de la de Sudamérica (Draper & Gutiérrez, 1997).

La reconstrucción de la historia evolutiva se dificulta debido a la ausencia de patrones magnéticos, lo que sugiere centros de expansión en la mayor parte de la placa (James, 2007). El único centro de expansión activo desde el Oligoceno en la placa del Caribe es la cuenca de Cayman. La placa del

Caribe no es fisiográficamente uniforme y puede dividirse en tres grandes cuencas separadas por accidentes submarinos: la cuenca de Granada, separada de la de Venezuela por el cresta de Aves, y la cuenca de Colombia, separada de la de Venezuela por la cresta de Beata. La característica más notable de la placa del Caribe es que presenta una corteza con espesor mayor al promedio de la corteza oceánica y menor que el espesor de la corteza continental, aspecto reconocido inicialmente por **Officer, et al.**, (1957), e interpretado como corteza oceánica con espesor anómalo (**Edgar, et al.**, 1973). La corteza de la placa del Caribe, sin embargo, no es homogénea, pues al occidente de la cresta de Beata su espesor es de 20 km y hacia el sureste de la cuenca de Venezuela es muy delgado, entre 2 y 5 km (**Diebold & Driscoll**, 1999). El espesor en las cuencas de Granada y Colombia oscila entre los 10 y 22 km (**Case, et al.**, 1990).

La isla Gran Roque es una pequeña extensión de tierra al norte del archipiélago con apenas 1,7 km cuadrados de extensión, de los cuales solo 0,6 km representan afloramientos de basamento. La parte restante de la isla corresponde a depósitos marinos cuaternarios. En los sectores de los cerros occidental y oriental afloran metagabros, denominados “gabros hornbléndicos” (**Aguerrevere & López**, 1938). La metadiabasa, referida por **Aguerrevere & López** (1938) como diabasa de grano fino, es la roca que constituye el cerro central y la parte oeste del oriental. En los tres cerros se presentan intrusiones de cuarzo-diorita que forman pequeños cuerpos irregulares y diques. Por último, todas estas rocas fueron intruidas por diques y venas de composición aplítica. Las rocas presentan un intenso diaclasamiento, y es muy común encontrar material fosfático de color verde pistacho, amorfo, que se encuentra en venas a través de la roca caja. Esta fosfatización es producto de la alteración de la roca caja producida por soluciones de ácido fosfórico provenientes del guano y de las lluvias.

Petrografía

Los metagabros son rocas de grano fino a grueso, de color verde oscuro a negro, que conservan sus rasgos primarios, entre ellos su textura relicto subofítica. El componente mineralógico primario es la plagioclasa y los intersticios se encuentran ocupados por piroxenos (Figura 2). El piroxeno se presenta en cristales subhedrales-anhedrales de un tamaño que varía entre 0,1 y 0,7 mm; es de color verde pálido con pleocroísmo y su composición es augítica. La composición de la plagioclasa en cristales euhedrales con macla tipo albita corresponde a (An_{60-70}), obtenida mediante el método de Michel-Levy. En cuanto a la mineralogía secundaria, esta corresponde a anfíboles, clorita, epidota, carbonatos, cuarzo y esfena, minerales estos que se presentan en reemplazo de los piroxenos (Figura 2a). Los anfíboles secundarios se presentan en cristales con hábito acicular, de color verde claro a amarillo

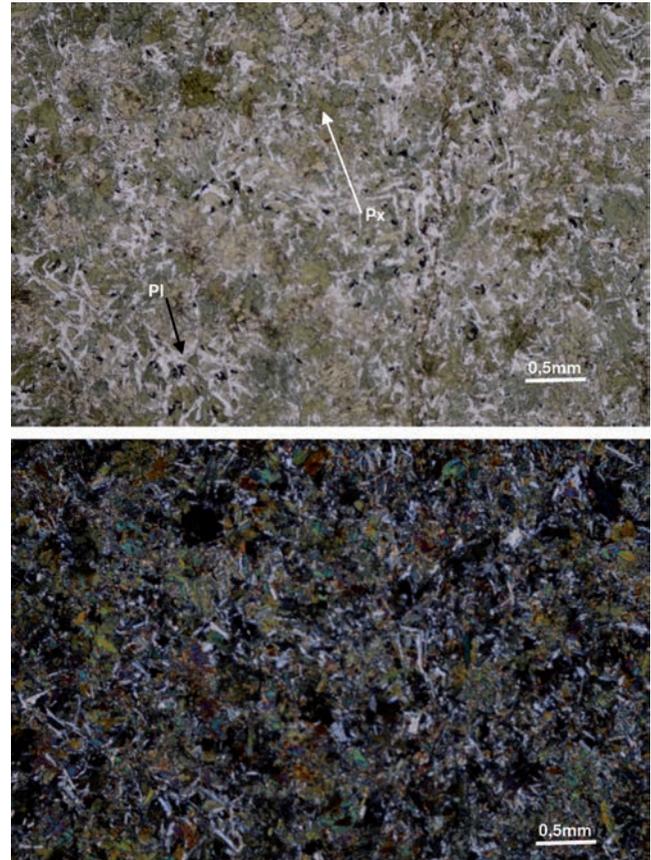


Figura 2. Aspecto petrográfico de los metagabros con textura relicto subofítica definida por cristales de plagioclasa (Pl) euhedral y los intersticios ocupados por piroxenos (Px).

pálido, con tamaños menores de 0,2 mm con pleocroísmo, identificados como actinolitas. La epidota se presenta en cristales prismáticos cortos o granulares en contacto con la actinolita. La clorita en masas micáceas es de tamaño muy fino, de color verde, con leve pleocroísmo, y color de interferencia café del primer orden. Tanto el cuarzo como los carbonatos ocupan los espacios.

La paragénesis metamórfica está representada por actinolita, plagioclasa, clorita, cuarzo, carbonatos y epidota, que representan condiciones que alcanzaron el grado bajo en facies esquisto verde. No es fácil determinar la composición de la plagioclasa producto del proceso metamórfico debido al tamaño de los cristales, que es menor de 0,1 mm.

Geoquímica

En la Tabla 1 se presentan los resultados de los análisis químicos realizados; los diagramas fueron elaborados en el programa Geochemical Data Toolkit (GCDKit 3.0). Según la petrografía, las rocas estudiadas de la isla Gran Roque han sido afectadas por procesos metamórficos e hidrotermales,

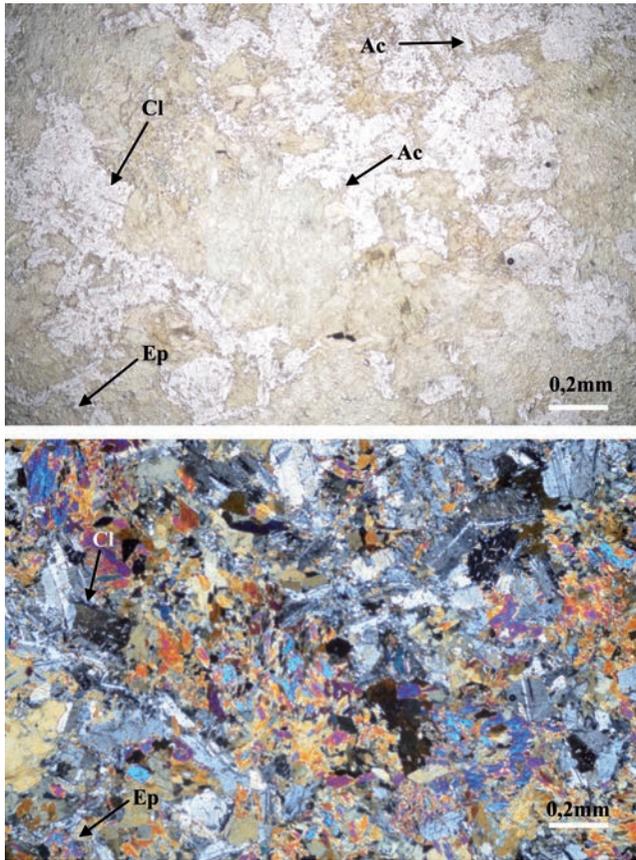


Figura 2a. La mineralogía secundaria que se desarrolla a partir de piroxenos que se transforman anfíboles aciculares de actinolita (Ac) y los cristales plagioclasa en epidota (Ep), carbonatos (Ca) y clorita (Cl).

que probablemente produjeron movilidad de elementos, lo cual modifica la composición química original de la roca; de ahí que se deben emplear diagramas en los que se usen, preferentemente, elementos inmóviles (Pearce, 1996). Las discrepancias observadas entre los datos geoquímicos de este trabajo y los datos de Ostos (1990), pueden deberse a las diferencias analíticas de los laboratorios, por tanto los datos de este autor no fueron usados en las gráficas presentadas.

En el diagrama de clasificación de rocas volcánicas de Winchester & Floyd (1976), en el cual se proyectan las rocas plutónicas, se grafica así: Nb/Y Vs. SiO₂. En la Figura 3a se observa que las muestras analizadas corresponden a rocas basálticas subalcalinas de afinidad toleítica. En el diagrama ternario AFM (Irvine & Baragar, 1971), se evidencian claramente los bajos niveles de álcalis y el carácter toleítico de las rocas gabroicas muestreadas en la isla Gran Roque (Figura 3b).

En el diagrama de tierras raras (*rare earth element*, REE), normalizadas con respecto a la condrita según el procedimiento de Nakamura (1974), las rocas muestran un muy

Tabla 1. Análisis químicos de elementos mayores y trazas incluyendo las tierras raras. El Fe₂O₃ representa el Fe total

Muestras	M 593	M 594
Elementos Mayores (% peso)		
SiO ₂	48,82	48,32
Al ₂ O ₃	14,47	14,21
Fe ₂ O ₃	10,98	7,70
MgO	9,16	12,23
CaO	11,83	13,12
Na ₂ O	4,77	1,37
K ₂ O	0,08	0,11
TiO ₂	0,97	0,32
P ₂ O ₅	0,21	0,32
Cr ₂ O ₃	0,058	0,18
LOI	1,2	1,50
Total	99,76	99,70
Elementos trazas (ppm)		
Ba	16	191
Ga	14,4	10,4
Hf	1,4	0,4
Nb	3,2	0,9
Rb	1	2,1
Sn	<1	1
Sr	129,2	130,1
Ta	0,3	0,1
Th	<0,2	<0,2
U	<0,1	<0,1
V	337	213
Zr	46,8	18,3
Y	18,6	9,2
La	2,7	1
Ce	7,5	2,9
Pr	1,13	0,46
Nd	5,3	2,5
Sm	1,84	0,91
Eu	0,69	0,34
Gd	2,65	1,18
Tb	0,5	0,25
Dy	3,33	1,61
Ho	0,71	0,32
Er	2	1,07
Tm	0,29	0,15
Yb	1,81	0,9
Lu	0,3	0,16

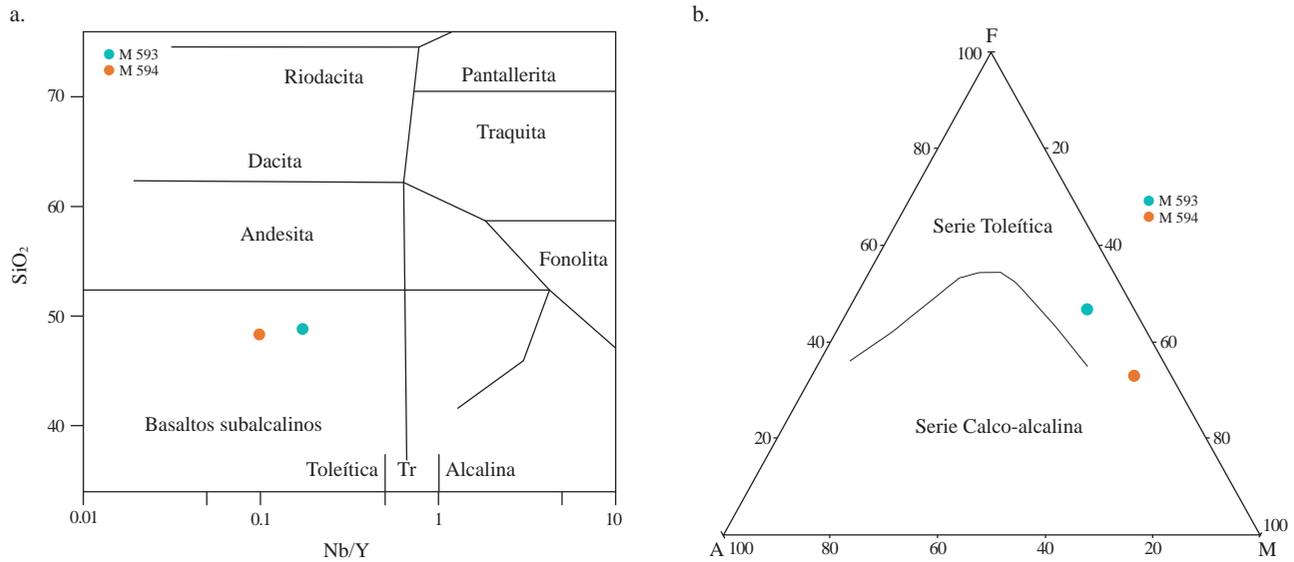


Figura 3. a. Diagrama de clasificación de Winchester & Floyd (1976). Los límites toleítico (Tol), transicional (Tr) y alcalino (Alc) corresponden a Pearce (1982). **b.** Diagrama AFM para dividir rocas subalcalinas, en Serie Toleítica y Serie Calco-alcalina, propuesto por Irvine & Baragar (1971).

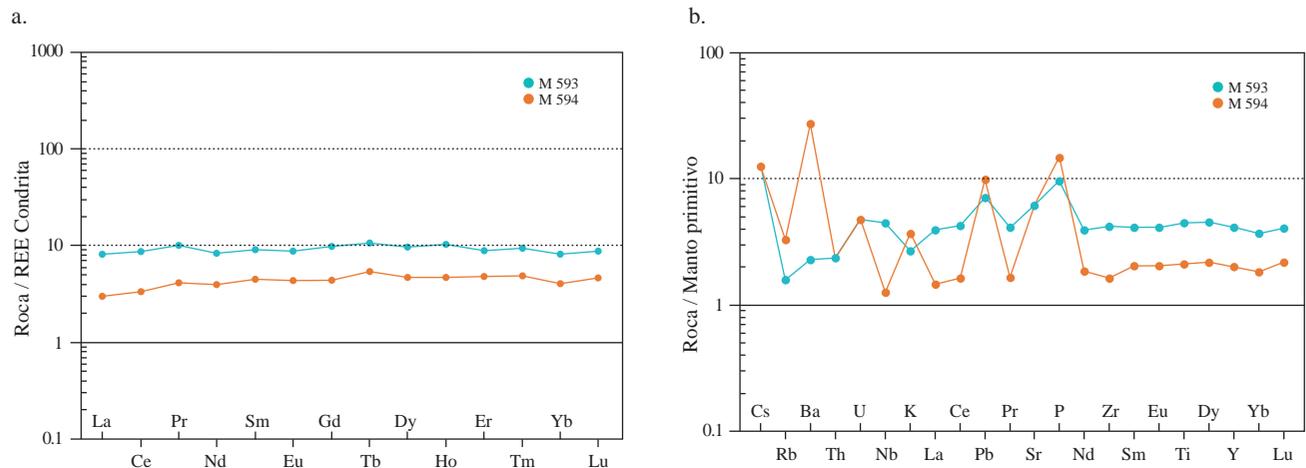


Figura 4. a. Diagrama de REE normalizadas con respecto a la condrita (Nakamura, 1974). **b.** Diagramas multielementos normalizados con respecto a manto primitivo (Sun & McDonough, 1989)

leve empobrecimiento en elementos de las tierras raras livianas (*light rare earth element*, LREE) con respecto a elementos de tierras raras pesadas (*heavy rare earth element*, HREE), y se observa que los patrones de normalización son relativamente planos y homogéneos. En este diagrama es evidente un enriquecimiento con respecto al valor de la condrita del orden de 10 y 3 veces, comportamiento típico de rocas generadas en una dorsal meso-oceánica tipo MORB-N (Figura 4a). La relación $(La/Lu)_N$ para las muestras M 593 y M 594 tiene valores de 0,92 y 0,64 y la relación $(La/Sm)_N$ presenta valores

de 0,90 y 0,68, respectivamente, lo que significa que estas muestras tienen similitud con rocas de dorsal oceánica tipo MORB-N, en la que ambas relaciones son menores de 1 (Wilson, 1989).

En el diagrama de multielementos propuesto por Sun & McDonough (1989), en el cual se normaliza con respecto a la composición del manto primitivo, estas rocas revelan patrones similares a MORB y en él se observa un acentuado enriquecimiento en Ba, de hasta 30 veces, en la muestra M 594. Además, se observan anomalías positivas en Cs, Pb y Sr

en ambas muestras. Esta dispersión en las concentraciones puede responder al metamorfismo, por medio del cual los elementos más móviles vuelven a movilizarse durante estos procesos (Figura 4b).

Para determinar en qué tipo de MORB se formaron las rocas, se utilizó el diagrama ternario de discriminación $Zr/4 - 2Nb - Y$ para rocas basálticas propuesto por Meschede (1986), en el cual las muestras se ubican en el campo de rocas generadas en una dorsal meso-oceánica y cuyas fuentes provienen del segmento MORB-N en el manto superior (Figura 5a). Este resultado se confirma usando el diagrama Nb/Y Vs. TiO_2/Y (Pearce, 2007) (Figura 5b).

Discusión

Las rocas metamórficas que afloran en la parte central de la isla Gran Roque al norte de Venezuela, corresponden a metagabros y se vieron afectadas por un metamorfismo de bajo grado que alcanzó la facies esquisto verde, conservando su textura original subofítica.

En cuanto a la geoquímica, las rocas tienen una tendencia toleítica, con indicios de formación en un ambiente de dorsal meso-oceánica normal (MORB-N). La isla Gran Roque es una de las pocas exposiciones *in situ* de la corteza oceánica del Caribe, de ahí que los resultados de este trabajo aportan información geoquímica básica para la comparación con terrenos alóctonos que se han interpretado como fragmentos de esta placa. Al comparar las concentraciones de los elementos traza de las muestras analizadas con los valores planteados para las rocas generadas en ambiente MORB y de *plateau*, establecidos en el *Basaltic Volcanism Study Project* de 1981 (Wilson, 1989, Nivia, 1987, y Kerr, et al., 1997), se puede ver que los valores de las rocas estudiadas caen en el

campo de dorsal meso-oceánica (MORB). De igual manera, muestran similitudes con rocas generadas en el *Plateau* del Caribe, lo que concuerda con la propuesta de Kerr, et al., (1996b), Fitton, et al., (1997), y Thompson, et al., (2003).

Según el modelo planteado por Pindell & Kennan (2001), la placa del Caribe nace en el Cretácico temprano sobre un punto caliente (¿Galápagos?), situado en el océano Pacífico. Durante el Cenozoico la placa se desplazó hacia el este en el espacio dejado por Norte y Sudamérica (James, 2006). Según el modelo de evolución propuesto por Pindell (1994), las rocas de la Cordillera Occidental de Colombia se originaron en el margen de la placa del Caribe, por lo que Kerr, et al., (2000) las denominan *Plateau* oceánico caribe-colombiano (*Caribbean-Colombian Oceanic Plateau*, CCOP). La subducción de la placa Protocaribe (corteza oceánica normal) bajo el margen de la placa del Caribe (constituida en su mayor parte por rocas de *plateau*) da origen al arco de las Antillas (Kerr, et al., 2000; Moreno-Sánchez & Pardo-Trujillo, 2003; Pindell, 1994), lo que explica la presencia de granitoides calcoalcalinos que intruyen las rocas básicas en el margen sur de la placa del Caribe y el occidente colombiano. La isla Gran Roque, junto con las islas de Aruba, Curazao, Aves, Bonaire, La Orchila y la Blanquilla, son, al parecer, los remanentes del desplazamiento de la placa y el arco del Caribe hacia el este durante el Cenozoico, como lo sugiere en estos lugares la presencia de un basamento oceánico Caribe, algunas veces muy deformado y afectado por subducción.

Conclusiones

Las rocas estudiadas, clasificadas como metagabros y afectadas por metamorfismo de bajo grado en facies esquisto verde, conservan la textura ígnea original subofítica, desarrollada entre plagioclasas y piroxenos.

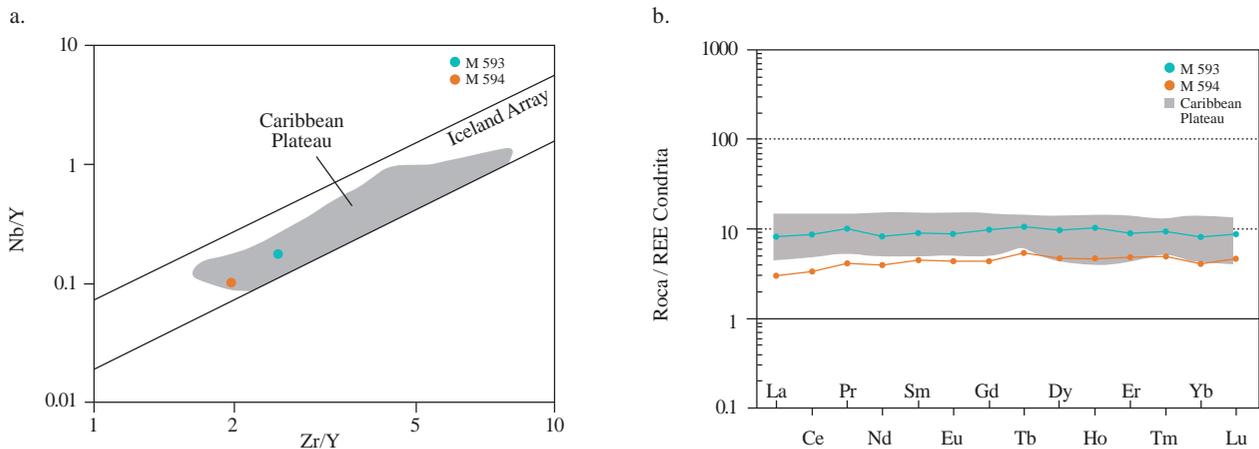


Figura 5. a. Diagrama de REE normalizadas con respecto a la condrita, según Nakamura (1974), el área gris corresponde a el comportamiento típico de rocas de Plateau del Caribe (Kerr et al., 1996). **b.** Diagrama Nb/Y vs. Zr/Y (Fitton et al., 1997 citado en Thompson et al., 2003), en donde se evidencia que las rocas fueron originadas en plateau del Caribe

Los análisis geoquímicos y las correlaciones de elementos traza indican que las rocas básicas de la isla Gran Roque poseen un carácter subalcalino y pertenecen a la serie toleítica, con características de rocas de piso oceánico de tipo MORB. Las REE normalizadas con respecto a condrita, manto primitivo y MORB-N, muestran patrones característicos de rocas generadas en dorsales mesoocéánicas de tipo normal (MORB-N). Con base en diagramas en los que se muestra el comportamiento típico de rocas generadas en el *Plateau* del Caribe, se evidenció que las rocas de Gran Roque bajo estudio son muy similares, pues según los análisis realizados tienen características tanto de ambiente MORB como de *plateau* oceánico.

La presencia de rocas graníticas de arco de islas, que afecta el basamento de gabros y diabasas de la isla de los Roques (Ostos, 1990), es una característica usual en los márgenes de la placa del Caribe y sugiere que el *Plateau* del Caribe en este sector formó parte del arco volcánico de las Antillas.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación de España, por la financiación del proyecto “Paleobiogeografía del Ordovícico del norte de Sudamérica y sus relaciones con la Cuenca Central Andina y el margen mediterráneo de Gondwana”, durante el cual se realizó la visita al área de estudio.

Bibliografía

- Aguerrevere, S., & López, V. 1938. The geology of the island Gran Roque (Federal Dependencies, Venezuela) and its phosphate deposits. *Boletín de Geología y Minería* **2**: 155-181.
- Case, J. E., MacDonald, W. D., & Fox, P. J. 1990. Caribbean crustal provinces; Seismic and gravity evidence. En Dengo, G., Case, J. E., eds. *The Caribbean Region. The Geology of North America*, Volume H. Boulder, Colorado, Geological Society of America, p. 15-36.
- Diebold, J., & Driscoll, P. 1999. New insights on the formation of the Caribbean basalt province revealed by multi-channel seismic images of volcanic structures in the Venezuelan Basin. En Mann, P., ed. *Caribbean Sedimentary Basins, Sedimentary Basins of the World*, Elsevier, p. 561-589.
- Donnelly, T.W., Melson, K., Kay, R., Rogers, J.J.W. 1973. Basalts and dolerites of Late Cretaceous age from the central Caribbean. En Edgar, N.T., Saunders, J.B., eds. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume 15*. Washington, DC, United States Government, p. 989-1012.
- Draper, G., & Gutiérrez, A. 1997. La estructura del Cinturón de Maimón en la isla de Hispaniola y sus implicaciones geodinámicas. *Revista Sociedad Geológica de España*, **10**: 281-299.
- Duncan, R.A. & Hargraves, R.B. 1984. Plate tectonics evolution of the Caribbean region in the mantle reference plane. En Bonnini, R.B., Hargraves, R.B., eds. *The Caribbean South America Plate Boundary and Regional Tectonics*, Volume 16. GSA Memory, p. 81-93.
- Edgar, N.T., Ewing, J.I., & Hennion, J. 1971. Seismic refraction and reflection in the Caribbean Sea. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin* **55**: 833-870.
- Fitton, J.G., Saunders, A.D., Norry, M.J., Hardarson, B.S., Taylor, R.N. 1997. Thermal and chemical structure of the Iceland plume. *Earth and Planetary Science Letters* **153**: 197-208.
- González de Juana, C., Iturralde de Arozena, J.M., & Picard, X. 1980. *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas*. Caracas, Foninves, 1031 p.
- Irvine, T.N., & Baragar, W. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rock. *Canadian Journal of Earth Science* **8**: 523-548.
- James, K.H. 2006. Arguments for and against the Pacific origin of the Caribbean Plate: Discussion, finding for an inter-American origin. *Geologica Acta* **4**: 279-302.
- James, K. H. 2007. The Caribbean Ocean Plateau – an overview, and a different understanding, Caribbean Plateau, Aberystwyth, Wales, UK., University of Wales, Institute of Geography and Earth Science, p. 1-28.
- Kerr, A.C., Marriner, G.F., Tarney, J., Nivia, A., Saunders, A.D., Thirlwall, M.F., Sinton, C.W. 1997. Cretaceous basaltic terrains in Western Colombia: Elemental, chronological and Sr-Nd isotopic constraints on petrogenesis. *Journal of Petrology*, **38**: 677-702.
- Kerr, A.C., Tarney, J., Marriner, G.F., Nivia, A., Klaver, G.T., Saunders, A.D. 1996a. The geochemistry and tectonic setting of late Cretaceous Caribbean and Colombian volcanism. *Journal of South America Earth Sciences* **9**: 111-120.
- Kerr, A.C., Tarney, J., Marriner, J.F., Klaver, G.T., Saunders, A.D., Thirlwall, M.F. 1996b. The geochemistry and petrogenesis of the Late-Cretaceous picrites and basalts of Curacao, Netherlands Antilles: A remnant of an oceanic plateau. *Contributions to Mineral and Petrology* **124**: 29-43.
- Kerr, A.C., White, R.V., & Saunders, A.D. 2000. LIP reading: Recognizing oceanic plateaux in the geological record. *Journal of Petrology* **41**: 1041-1056.
- Meschede, M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, **56**: 207-218.
- Moreno-Sánchez, M., & Pardo-Trujillo, A. 2003. Stratigraphical and sedimentological constrains on western Colombia: Implications on the evolution of the Caribbean Plate. En Bartolini, C., Buffler, R.T., and Blickwede, J.F., eds. *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics*, American Association of Petroleum Geologist, memoir **79**: 891-924.
- Nakamura, N. 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica and Cosmochimica Acta* **38**: 757-775.

- Nivia, A.** 1987. Geochemistry and origin of the Amaime and volcanic sequences Southwestern Colombia [Tesis en Ciencias]: Londres, Universidad de Leicester.
- Officer, C. B., Ewing, J. I., Edwards, R. S., & Johnson, H. R.** 1957. Geophysical investigations in the eastern Caribbean, Venezuelan Basin, Antilles Island Arc, and Puerto Rico Trench. *GSA Bulletin* **68**: 359-378.
- Ostos, M.R.** 1990. Tectonic evolution of the south-central Caribbean based on geochemical data: Ph. D. thesis, Rice University, Houston, Texas, 221 p.
- Pearce, J.A.** 1996. A user's Guide to Basalt Discrimination Diagrams. In Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for massive sulphide exploration. Geological association of Canada. Short Course Notes, v. 12.
- Pearce, J.A.** 2007. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos* **100**: 14-48.
- Pindell, J., & Kennan, L.** 2001. Kinematic Evolution of the Gulf of Mexico and the Caribbean. Transactions, Petroleum Systems of Deep-water Basins: Global and Gulf of Mexico Experience, GCSSEPM 21st Annual Foundation Bob F. Perkins Research Conference. Houston, Texas, p. 193-220.
- Pindell, J.L.** 1994. Evolution of the Gulf of Mexico and the Caribbean. En S.K., D., and Jackson, T.A., eds. Caribbean Geology: An introduction. Kingston, Jamaica, University of the West Indies Publishers Association/University of the West Indies Press, p. 13-39.
- Santamaría, F., & Schubert, C.** 1974. Geochemistry and geochronology of the Southern Caribbean-Northern Venezuela plate boundary. *Bulletin of the Geological Society of America* **85**: 1085-1098.
- Saunders, A.D., Tarney, J., Kerr, A.C., & Kent, R.W.** 1996. The formation and fate of large igneous provinces. *Lithos* **37**: 81-95.
- Schubert, C., & Moticska, P.** 1972. Reconocimiento Geológico de las Islas Venezolanas en el Mar Caribe entre Los Roques y Los Testigos (Dependencias Federales). *Acta Científica Venezolana* **23**: 210-223.
- Sinton, C.W.** 1996. A tale of two large igneous provinces: Geochronological and geochemical studies of the North Atlantic volcanic province and the Caribbean oceanic plateau: Ph. D. thesis, Oregon State University, Corvallis, 1993 p.
- Sinton, C.W., Duncan, R.A., Storey, M., Lewis, J., Estrada, J.J.** 1998. An oceanic flood basalt province within the Caribbean plate. *Earth and Planetary Science Letters* **155**: 221-235.
- Sun, S.S., and McDonough, W.F.** 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. En Saunders, A.D., and Norry, M.J., eds. *Magmatism in Ocean Basins*, Volume 42: London, Geological Society, Special Publications, p. 313-345.
- Thompson, P.M.E., Kempton, P.D., White, R.V., Kerr, A.C., Tarney, J., Saunders, A.D., Fitton, J.G., McBirney, A.** 2003. Hf-Nd isotope constraints on the origin of the Cretaceous Caribbean plateau and its relationship to the Galapagos plume. *Earth and Planetary Sciences Letters* **217**: 59-75.
- Urbani, F.** 2005. Geología de la isla del Gran Roque, Parque Nacional los Roques, Venezuela: guía de excursión, FUNVISIS y UCV, p. 28.
- Wilson, M.** 1989. *Igneous petrogenesis, a global tectonic approach*: Dordrecht, Springer, 466 p.
- Winchester, J.A., & Floyd, P.A.** 1976. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* **20**: 325-343.

Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia

Efraín Domínguez-Calle^{1,*}, Sergio Lozano-Báez²

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

²Asistente de investigación de la Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Resumen

El aumento de los desastres naturales en todo el mundo ha generado grandes pérdidas económicas, ambientales y de vidas humanas. Los sistemas de alerta temprana se han desarrollado como una herramienta para mitigar el impacto de estos eventos, en torno a los cuales existe mucha información que, infortunadamente, se encuentra dispersa. En este contexto, el presente trabajo tuvo como propósito hacer una revisión bibliográfica de las publicaciones sobre el tema, profundizando en dos de los principales desastres naturales: las inundaciones y las sequías. Se presenta, igualmente, lo concerniente a los sistemas de alerta temprana en Colombia, así como algunas recomendaciones para mejorar su uso.

Palabras clave: sequía, inundación, riesgo, gestión del riesgo, predicción.

State of the art of the early warning system in Colombia

Abstract

The overall increase of natural disasters has generated significant economic, environmental and human life losses. As a tool for mitigating these impacts, early warning systems have been developed, about which there is a lot of information that, unfortunately, is scattered. In this context, this paper aimed at reviewing the literature on the topic, delving into two major disasters: floods and droughts. We also present early warning systems in Colombia and some recommendations on how to improve their use.

Key words: Drought, flood, risk, risk management, prediction.

Marco conceptual

El fenómeno del cambio climático ha llevado a un incremento en las amenazas meteorológicas e hidrológicas (UNEP-GEAS, 2012). Un reflejo de ello son los 6.000 desastres naturales que entre 1995 y 2004 causaron 900.000 muertos, 2.500 millones de personas damnificadas y US\$ 738 billones en pérdidas materiales a nivel mundial (Basher, 2006). Las inundaciones y las sequías son las amenazas meteorológicas e hidrológicas de más importancia debido a la magnitud de los daños que causan, por lo que en las últimas décadas ha crecido el interés por los sistemas de alerta temprana (SAT) para enfrentarlas. Tales sistemas han contribuido a reducir las pérdidas económicas y el número de heridos o víctimas mortales (Ocharan, 2007; Lenton, 2011).

El desarrollo de dichos sistemas se inició en 1960, cuando la Organización de las Naciones Unidas comenzó a adoptar medidas en este sentido. Sin embargo, fue en 1970, con la resolución 2717 de este organismo, que se planteó formalmente la necesidad de desarrollarlos. Posteriormente, en 1989, y con el fin de reducir los daños causados por los eventos catastróficos, se estableció la Década Internacional

para la Reducción de los Desastres Naturales de 1990 al año 2000 (IDNDR); desde entonces, todos los años, el 13 de octubre, se celebra un día conmemorativo. A partir de ese momento aumentó el interés por los sistemas de alerta temprana, lo que desembocó en 1994 en la realización de la Conferencia Internacional de las Naciones Unidas para la Reducción de los Desastres Naturales, en la cual se establecieron las directrices para la prevención, la preparación y la mitigación de los desastres naturales en el siglo XXI. En 1999 las Naciones Unidas adoptaron la resolución 54/219 con el fin de dar inicio a la Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres. Por último, en el 2005, durante la Conferencia Mundial sobre la Reducción de los Desastres, se estableció un plan de acción conocido como el Marco de Acción de Hyogo, el cual establece las prioridades para la gestión del riesgo (UNISDR, 2013).

*Correspondencia:

Efraín Domínguez-Calle, e.dominguez@javeriana.edu.co.

Recibido: 30 de abril de 2014

Aceptado: 9 de septiembre de 2014

Los sistemas de alerta temprana han evolucionado con el conocimiento científico. En su desarrollo, **Basher** (2006) identifica cuatro etapas.

1. Los sistemas pre-científicos, que se basan en las primeras observaciones sobre fenómenos simples como la forma de las nubes, el estado del océano o la visibilidad de las estrellas.
2. Los sistemas de alerta temprana *ad hoc*, que son sistemas específicos desarrollados por iniciativa de científicos o personas interesadas en el tema del riesgo.
3. Los sistemas de alerta temprana desarrollados por los servicios meteorológicos, que implican una entrega organizada, lineal y unidireccional de los productos de la alerta a los usuarios por parte de los expertos.
4. El sistema de alerta temprana integral, el cual vincula todos los elementos necesarios para la advertencia temprana y la respuesta eficaz, e incluye el papel del elemento humano del sistema y la gestión de riesgos.

Definición de los conceptos de sistema de alerta temprana y riesgo

El concepto de sistema de alerta temprana se emplea en los diferentes contextos en los que el riesgo está implícito (natural, geofísico, socio-político, industrial, entre otros) (**Basher**, 2006). En la literatura especializada se encuentran muchas definiciones del concepto (**Davies, Buchanan y Lambert**, 1991; **Maskrey**, 1997; **UNISDR**, 2006; **Grasso**,

Beck & Manfredi, 2007; **Hall**, 2007; **Ocharan**, 2007; **Medina-Cetina & Nadim**, 2008; **UNISDR**, 2009; **Intrieri, et al.**, 2012; **UNEP & GEAS**, 2012; **Birkmann, et al.**, 2013). Al revisar cada una de estas definiciones se encuentran elementos comunes que nos permiten definir un sistema de alerta temprana como el conjunto de herramientas, dispositivos de control, capacidades de gestión e instrumentos tecnológicos que las instituciones claves identifican para difundir la información de manera oportuna a las comunidades expuestas a un riesgo, y cuyo resultado son medidas de mitigación orientadas a reducir los efectos de los desastres naturales y las pérdidas económicas y de vidas, así como las lesiones.

Un concepto muy relacionado con los sistemas de alerta temprana es el de riesgo. Podemos definir el riesgo como “la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas” (**UNISDR**, 2009). Los desastres naturales y las consecuentes pérdidas sociales, ambientales y económicas han llevado a la creación de la gestión del riesgo, la cual se refiere a las acciones y procesos sociales orientados a minimizar las consecuencias negativas de los desastres, incluidas las actividades posteriores a estos, tales como la rehabilitación y la reconstrucción del territorio. La gestión del riesgo incorpora cinco componentes principales: 1) la identificación y evaluación del riesgo; 2) la reducción del riesgo; 3) la protección financiera; 4) los preparativos y la respuesta a los desastres, y 5) la recuperación después de un desastre. El cuarto componente incluye los sistemas de alerta temprana (Figura 1) (**Ghesquiere & Mahul**, 2010; **Yamin, et al.**, 2013).

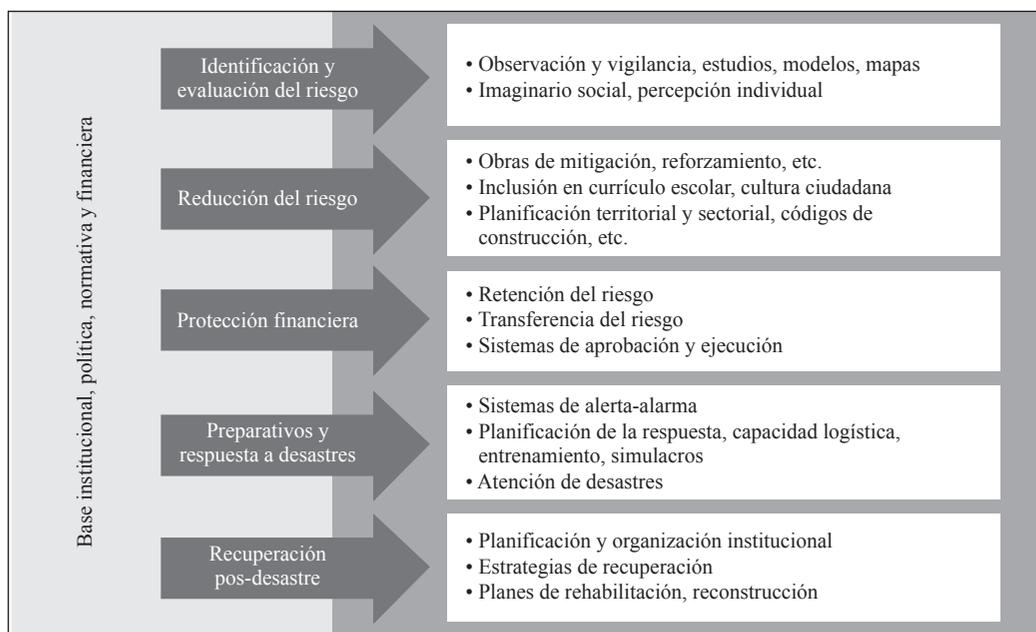


Figura 1. Principales componentes de la gestión del riesgo (Tomada de: **Yamin, et al.**, 2013).

Estructura de los sistemas de alerta temprana

Los sistemas de alerta temprana pueden tener diferentes estructuras que varían en su complejidad, pero, por lo general, están conformados por los siguientes subsistemas (Maskrey, 1997):

- subsistema de alerta, compuesto por las predicciones y la monitorización de los peligros a nivel nacional e internacional, el cual produce información científica que se transmite a las autoridades nacionales encargadas de los desastres;
- subsistema de información del riesgo, el cual permite generar el escenario del riesgo e identificar los impactos potenciales, así como los grupos y sectores vulnerables que pueden verse afectados por el desastre;
- subsistema de preparación, mediante el cual se desarrollan estrategias y acciones para reducir los daños generados por el desastre, y
- subsistema de comunicación, cuyo objetivo es comunicar la información oportuna sobre el peligro, haciendo énfasis en los grupos vulnerables y teniendo en cuenta medidas de mitigación, escenarios potenciales de riesgo y estrategias de preparación.

Recientemente se ha comenzado a enfatizar la importancia de los sistemas de alerta temprana centrados en la gente, los cuales contemplan los siguientes cuatro elementos fundamentales para su correcto funcionamiento (UNISDR, 2006).

1. Conocimiento de los riesgos: consiste en comprender el riesgo, para lo cual es necesario evaluarlo mediante la recolección de datos que permitan establecer las medidas de mitigación y prevención.
2. Servicio de seguimiento y alerta: emite los pronósticos y la alerta; debe funcionar 24 horas al día y estar coordinado con las diferentes instituciones. Además, debe respaldarse en el conocimiento científico para emitir pronósticos confiables.
3. Difusión y comunicación: debe contarse con un sistema de comunicación para transmitir la información sobre el riesgo y la alerta temprana. La información debe ser clara, útil, llegar a tiempo y ser accesible a todas las personas en peligro.
4. Capacidad de respuesta: la comunidad debe comprender el riesgo en el que se encuentra, respetar el sistema de alerta, saber responder ante los avisos de alerta y tener planes de respuesta.

Las sequías

Las sequías son un fenómeno normal y recurrente en todos los regímenes climáticos; se producen por la reducción natural de la precipitación durante un periodo y están asociadas

a factores como las altas temperaturas, la baja humedad relativa, los vientos fuertes, la intensidad y el número de días de lluvia escasa. Se diferencia de otros desastres por la duración (meses o años) y la cobertura espacial (muy extensa) (Wilhite & Svoboda, 2000; Mishra & Singh, 2010).

Según Trambauer, *et al.*, (2013), las sequías se clasifican en sequías meteorológicas, es decir, periodos de tres meses o más en que la precipitación mensual es significativamente menor al promedio de los años anteriores; sequías hidrológicas, producidas por un periodo prolongado de baja precipitación que afecta la disponibilidad de agua requerida por los habitantes de una región; sequías agrícolas que ocurren en cultivos donde existe un desequilibrio entre la cantidad de agua que demandan y su disponibilidad, y, por último, sequías socioeconómicas, producto de la relación de la demanda y la oferta de un bien económico con elementos hidrometeorológicos.

El análisis y la predicción de las sequías se convierten hoy en una herramienta clave y necesaria para la planeación y el manejo del recurso hídrico, debido a que su impacto afecta la calidad y la disponibilidad del agua, además de acelerar los procesos de erosión, generar pérdidas económicas y de cultivos, y afectar la seguridad alimentaria. Este desastre genera el mayor número de damnificados, con impactos no estructurales que afectan grandes áreas geográficas (Mishra & Singh, 2010; Mishra & Singh, 2011). En 1974, por ejemplo, la sequía en Sudán y Etiopía ocasionó la muerte de 450.000 personas y, más recientemente, en el 2011, la sequía en Somalia generó una crisis humanitaria que puso en peligro a 10 millones de personas (Vicente-Serrano, *et al.*, 2012). Para citar un caso colombiano reciente, la sequía ocurrida en el departamento del Casanare dejó una gran mortandad de animales.

Los sistemas de alerta temprana de sequías

A nivel mundial, los sistemas de alerta temprana de sequías se encuentran poco desarrollados. Sin embargo, se destacan el sistema de información y alerta mundial de la Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO-GIEWS), y el del Centro de Investigación de Peligros Benfield, de la Universidad de Londres. Estas instituciones facilitan información sobre las sequías a nivel mundial a través de reportes y mapas interactivos. Además, la página de Internet de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2013) ofrece información importante sobre los niveles de precipitación, la nubosidad y las predicciones climáticas (UNEP-GEAS, 2012). En la tabla 1 se presentan ejemplos de los sistemas de alerta temprana de sequías más destacados.

Predicción de las sequías

De acuerdo con Mishra & Singh (2011), los componentes de la predicción de sequías son los siguientes.

Tabla 1. Ejemplos de los principales sistemas de alerta temprana de sequías

SAT*	Lugar	Productos / Métodos	Sitio de Internet
SAT para la hambruna (FEWS, 2010)	Este de África, Afganistán y Centro-américa	Condiciones de sequía a través de boletines mensuales para las regiones	http://www.fews.net/Pages/default.aspx?l=es
U.S. Drought Monitor (2000)	Estados Unidos	Mapa interactivo con las condiciones y pronósticos de sequía. Integra múltiples indicadores, con información de campo y de expertos. Su calidad y desempeño se consideran excelentes (Svoboda, <i>et al.</i> , 2002)	http://droughtmonitor.unl.edu/
Centro Climático de Beijing (BBC, 2003)	China	Mapas y reportes diarios de las condiciones de sequía generados a partir de la información de sensores remotos del Centro Meteorológico Nacional de Satélites y de la red de estaciones que monitoriza las precipitaciones y la humedad del suelo	http://cmdp.ncc.cma.gov.cn/pred/en_cs.php
Observatorio Europeo para la Sequía (EDO, 2013)	Europa	Reportes, series de tiempo, catálogo de metadatos y mapas interactivos de la situación y el pronóstico de sequías, y evaluación de algunos índices de para emitir predicciones.	http://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1000
Observatorio Chileno Agroclimático (2013)	Chile	Conjunto de mapas y figuras con las condiciones de sequía y proyecciones para la región. Se basa en el sistema de datos del Instituto Internacional de Investigación para el Clima y la Sociedad (IRI) y en los datos sobre precipitación (déficit y superávit), además de los niveles de los ríos y las condiciones de la vegetación.	http://www.climatedatalibrary.cl/UNEA/maproom/
Observatorio Nacional de la Sequía (ONS, 2014)	España	Mapas, informes y planes especiales para enfrentar sequías, demarcación de cuencas hidrográficas, planificación y gestión de sequías, generados mediante la integración de las instituciones españolas con competencia en el tema del agua.	http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/

1. Variables de entrada, las cuales incluyen:

- variables hidrometeorológicas asociadas a las precipitaciones, los flujos de corrientes, los niveles de agua subterránea y la humedad del suelo;
- índices de sequía, entre los cuales los más usados son el índice de sequía de Palmer (PDSI) (Palmer, 1965), los deciles (Gibbs & Maher, 1967), el índice de humedad del cultivo (CMI) (Palmer, 1968), el índice de suministro de agua superficial (SWSI) (Shafer & Dezman, 1982), el índice de precipitación estandarizado (SPI) (McKee, *et al.*, 1993), el índice de sequía de recuperación (RDI) (Weghorst, 1996), y el índice de sequía perpendicular (Ghulam, Qin & Zhan, 2007).
- índices climáticos, que incluye la Oscilación del Sur - El Niño (*El Niño-Southern Oscillation*, ENSO), y tienen en cuenta los índices de temperatura superficial del mar, la Oscilación del Atlántico Norte y las oscilaciones decadales, interdecadales y multidecadales del Pacífico.

2. Una metodología: entre las existentes se destacan el análisis de regresión, el análisis de series de tiempo, los modelos de probabilidad, los modelos de redes neuronales artificiales y los modelos híbridos. Cada una de estas metodologías presenta sus ventajas y limitaciones, pero no existe una metodología estandarizada para la predicción de las sequías.

3. Variables de salida: son predicciones de las sequías a largo plazo, que deben contar con los posibles escenarios de impacto, con los periodos de inicio y terminación, y, además, con la probabilidad de ocurrencia.

A pesar de lo anterior, la predicción de las sequías se ve dificultada por la imprecisión en la determinación de su inicio y de las diferentes etapas e intensidades del fenómeno hidrometeorológico (Mishra & Singh, 2011).

Las inundaciones

Las inundaciones son una amenaza constante y constituyen un fenómeno que se desencadenan de forma rápida y repentina (UNEP-GEAS, 2012). Representan una de las amenazas más frecuentes y de mayor gravedad a nivel mundial y anualmente causan miles de muertes y millones de dólares en pérdidas económicas por daños (Chandrasekar & Cifelli, 2012). Las inundaciones se asocian a precipitaciones extremas (Ren, *et al.*, 2010) y pueden generarse en los ríos, cuyo caudal aumenta debido a la lluvia o la nieve derretida, o ser producto de las fuertes mareas durante las tormentas, o del incremento en el nivel del mar debido al cambio climático (Kundzewicz, 2002).

Sistemas de alerta temprana de inundaciones

Entre los sistemas de alerta temprana de inundaciones se destacan los siguientes a nivel mundial.

- Sistema de Alerta Global para las Inundaciones (**GFAS**, 2006) (<http://gfas.internationalfloodnetwork.org/gfas-web/>), el cual ofrece información muy útil de libre acceso, realiza predicciones y lanza alertas. Cuenta con mapas que muestran la información sobre las precipitaciones por periodos y hace seguimiento y monitorización de algunos ríos, embalses y lagunas.
- El observatorio de inundaciones de Dartmouth (<http://floodobservatory.colorado.edu/>), que ofrece estimaciones de las precipitaciones, así como imágenes satelitales e información de las principales inundaciones, sin embargo, no muestra pronósticos de las precipitaciones o de las inundaciones (**Dartmouth Flood Observatory**, 2010).

A nivel regional se encuentran los siguientes sistemas.

- Sistema Europeo de Alerta de Inundaciones (**EFAS**, 2010) (<http://www.efas.eu/>), el cual ofrece información sobre la posibilidad de inundación de los ríos con tres días de anticipación. Además, proporciona una visión general de las principales inundaciones.
- Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (**NOAA**, 1970) (<http://www.noaa.gov/>), que ofrece observaciones y predicciones de las condiciones hidrológicas de los principales afluentes de Estados Unidos. También ofrece información sobre lluvias que pueden generar inundaciones rápidas con seis horas de anticipación.
- Sistema de Alerta Temprana para Centroamérica (**SATCA**, 2007) (<http://www.satcaweb.org/>), el cual recopila la información hidrometeorológica de las instituciones globales y regionales encargadas de monitorizar los fenómenos atmosféricos, con el fin de fortalecer la capacidad de anticipar los desastres naturales en Centroamérica.
- El proyecto de la Unión Europea HYDRATE (www.hydrate.tesaf.unipd.it), que basa sus predicciones en la medición y análisis de la humedad del suelo y emplea modelos hidrológicos distribuidos. En su metodología recomienda combinar una guía para las inundaciones repentinas con el método de umbral de escorrentía y el índice de diagnóstico de crecidas repentinas (*Flash Flood Diagnostic Index*, FFDI) (**Borga, et al.**, 2011).

Predicción de las inundaciones

Los requisitos para establecer un sistema de predicción de inundaciones son contar con un sistema remoto (radar o satélite), un sistema para la detección de las precipitaciones, modelos de predicción hidrológica e indicadores de predicción numérica, así como la capacidad de generar pronósticos confiables (**Collier**, 2007). Uno de los métodos más usados para la predicción de las inundaciones es el consignado en la guía para las inundaciones repentinas

(*Flash Flood Guidance*, FFG) (**Mogil, et al.**, 1978). La FFG puede emitir alertas con 1 a 24 horas de anticipación y la conforman principalmente tres elementos:

1. el modelo para el cálculo continuo de la humedad del suelo;
2. los cálculos de la FFG, y
3. las condiciones mínimas de la inundación (**Norbiato & Dinale**, 2009).

Otro método muy usado en la actualidad es la predicción numérica del tiempo (*numerical weather prediction*, NWP), conocida como sistema de predicción por conjunto (*ensemble prediction system*, EPS), el cual se recomienda cuando los datos de los caudales aguas arriba no están disponibles o los equipos de transmisión de datos fallan (**Cloke & Pappenberger**, 2009).

En general, los diferentes métodos para la predicción de inundaciones se pueden agrupar de la siguiente manera (**Plate**, 2007).

- Grupo A: son métodos con un enfoque de predicción directa que emplean modelos deterministas, incluidos los modelos de precipitación-escorrentía y curvas de descargas.
- Grupo B: comprende aquellos métodos que necesitan series de tiempo muy largas con modelos hidrológicos complejos y con grandes variaciones en la distribución de las precipitaciones; generalmente incorporan la incertidumbre y utilizan el método de Monte Carlo para calcular las desviaciones de los datos reales y de los pronósticos.
- Grupo C: son los métodos que a partir de las condiciones iniciales generan hidrogramas de respuesta que emplean datos históricos y no requieren un modelo.
- Grupo D: estos métodos representan una mejora con respecto a los del grupo B debido a que no necesitan procedimientos extensos de cálculo. Son adecuados para cuencas pequeñas.
- Grupo E: son métodos tradicionales que se emplean en los grandes ríos y utilizan análisis de regresión para la medición aguas arriba y aguas abajo. Se recomiendan cuando no hay linealidad, pero sí muchas entradas de afluentes o mucha lluvia en la cuenca.

Existen muchos otros modelos para la predicción de las inundaciones, sin embargo, la mayoría se basa en una formulación de la precipitación-escorrentía muy parecida. Las principales diferencias entre estos modelos son la complejidad de los procesos y el número de parámetros necesarios para su aplicación (**Werner, et al.**, 2005). Algunos de los modelos más comunes son el TOPKAPI (**Liu & Todini**, 2002), el LISFLOOD (**De Roo, et al.**, 2000),

los modelos de precipitación-escurrentía y los sistemas de modelación matemática como el MIKE (**Göppert, et al.**, 1998).

Uno de los aspectos más difíciles de la predicción de inundaciones es la estimación precisa de las precipitaciones, lo que normalmente se hace con medidores de lluvia (**Georgakakos & Hudlow**, 1984; **Moore, Bell & Jones**, 2005). En los últimos años se ha incrementado el uso de sensores remotos, como los radares, que permiten muestrear una mayor área en periodos cortos, suministran información sobre los movimientos y la evolución de las precipitaciones, y emiten la alerta con más antelación (**Chandrasekar & Cifelli**, 2012). Aun así, la falta de exactitud y el nivel de incertidumbre de la mayoría de los pronósticos de precipitación son muy grandes (**Borga, et al.**, 2011) debido a la rápida aparición y la dispersión espacial de este fenómeno. La predicción de las inundaciones se ve limitada por la simplificación de las condiciones presentes y la incertidumbre de los modelos hidrológicos. Es por ello que se recomienda hacer investigaciones que hagan más énfasis en aquellos lugares donde no hay ningún tipo de medición hidrometeorológica. De todas maneras, se destaca el potencial de la nueva generación de modelos de pronóstico de inundaciones basados en datos distribuidos sobre una cuadrícula (**Moore, Bell & Jones**, 2005; **Borga, et al.**, 2011).

La gestión del riesgo y los sistemas de alerta temprana en Colombia

Colombia no es la excepción frente al incremento de los desastres naturales en el mundo. **Cardona, et al.**, (2004) presentan un listado descriptivo, con la estimación de las pérdidas y la cuantificación de los costos de los distintos desastres naturales en el territorio colombiano desde 1979 hasta el 2004. Recientemente, el fenómeno de La Niña durante el 2010 y el 2011 dejó pérdidas económicas, daños en la infraestructura y víctimas mortales que evidenciaron las deficiencias de la gestión del riesgo y la necesidad de fortalecer los sistemas de alerta temprana en el país (**Campos, et al.**, 2012).

Antes de describir los actuales sistemas de alerta temprana de Colombia, es necesario referirse a la gestión del riesgo, concepto que ha evolucionado constantemente desde la creación del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres en 1989, que recientemente adoptó el nombre de Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD) a través de la Ley 1523 de 2012. Dicho sistema es operado por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), encargada de dirigir la implementación de la gestión del riesgo de desastres y de coordinar el funcionamiento y el desarrollo continuo del sistema (Figura 2). Es importante destacar, además, que la política de gestión del riesgo en Colombia se ajusta a los

lineamientos de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR), así como al Marco de Acción de Hyogo (UNGRD, 2012).

Los sistemas de alerta temprana se han venido desarrollando de manera paralela. La primera experiencia en este sentido fue en 1976, con el Servicio Colombiano de Hidrología y Meteorología (SCMH), el cual se basaba en el modelo Sacramento y operaba con tarjeta perforada para procesar la información proveniente de radios y teléfonos. Este sistema suministraba datos cuantitativos y daba apoyo a los organismos de socorro en la temporada invernal (**Dominguez, Angarita & Rivera**, 2010). En la actualidad, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) presenta un informe técnico diario de alertas ambientales de origen hidrometeorológico y genera comunicados especiales para los eventos extraordinarios. Estos pronósticos se basan en dos modelos de mesoescala: el modelo de *Weather Research and Forecasting* (WRF) y el modelo de mesoescala y microescala V5 (MM5). Ambos utilizan como insumo los datos iniciales suministrados por el modelo de baja resolución de la NOAA, conocido como GFS (*Global Forecast System*). Con dichos modelos se generan las predicciones climáticas para las regiones naturales (Caribe, Pacífico, Andina, Insular, Orinoquia y Amazonia) a corto (mes actual), mediano (uno y dos meses siguientes) y largo plazo (tres a cinco meses siguientes), y en cada una de ellas se incluye la probabilidad de ocurrencia de los fenómenos macrolimáticos (Niña/Niño), y la información sobre los niveles de los ríos (cuencas de los ríos Magdalena, Cauca, San Jorge, Sinú, Atrato, Meta, Arauca y Amazonas), e información sobre la precipitación, los deslizamientos y los incendios (**IDEAM**, 2008; **Ruíz**, 2014). Dichos pronósticos se pueden consultar en la página web del IDEAM: <http://pronosticos.ideam.gov.co/jsp/index.jsf>.

Además de este sistema nacional, en varias regiones de Colombia se han venido desarrollando sistemas de alerta temprana locales. A continuación presentamos los principales ejemplos.

1. *Sistema de alerta temprana del Distrito Capital de Bogotá*: este se articula a través de la acción de un amplio conjunto de entidades públicas, recientemente agrupadas para conformar el Sistema Distrital de Gestión de Riesgo y Cambio Climático (SDGR-CC) mediante el acuerdo 546 de 2013, el cual creó, así mismo, el Fondo Distrital para la Gestión de Riesgo y Cambio Climático (FONDIGER). El SDGR-CC está conformado por todos los organismos y entidades públicas del ámbito nacional y regional con jurisdicción en el Distrito Capital, así como por las organizaciones privadas con o sin ánimo de lucro y las organizaciones comunitarias y ciudadanas. La institución distrital encargada del sistema es el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER),

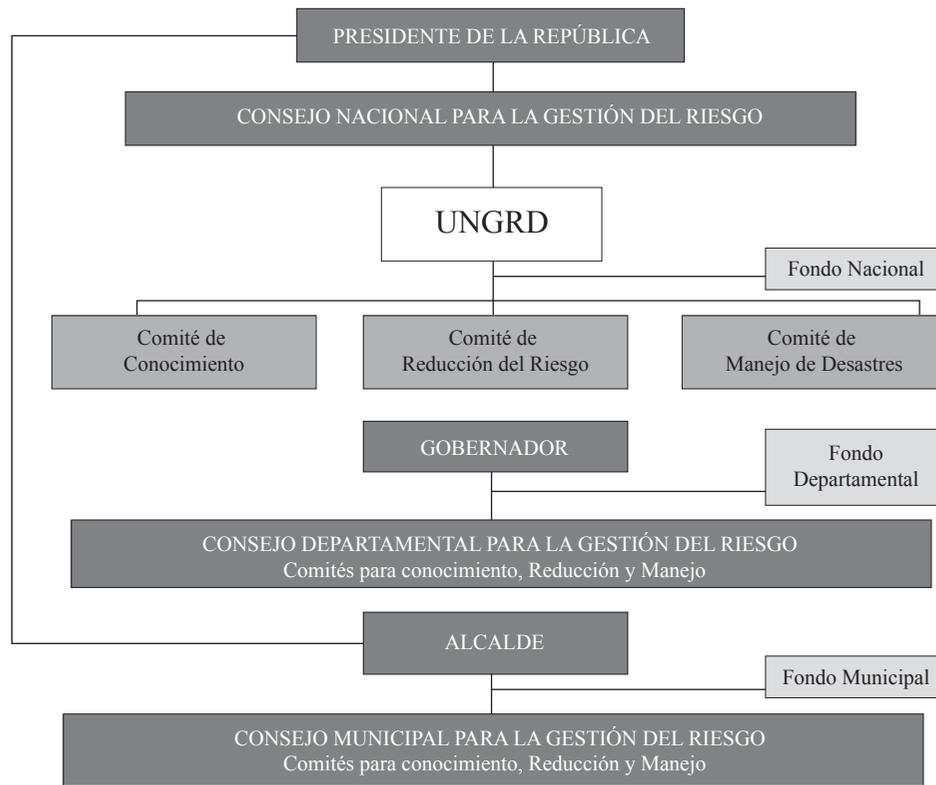


Figura 2. Estructura de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) (con base en: UNGRD, 2014)

conocido anteriormente como Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE). La información correspondiente se puede consultar en el Sistema de Información para la Gestión del Riesgo y Atención de Emergencias (SIRE- <http://www.sire.gov.co/>), cuyo objetivo es facilitar la gestión del riesgo y la atención de emergencias en el Distrito Capital. Este sistema de alerta temprana está conformado por la Red de Acelerógrafos de Bogotá (RAB), la cual registra las aceleraciones que se producen en el terreno cuando se presentan sismos y cuenta con 30 acelerógrafos digitales marca KINEMETRICS distribuidos en toda el área urbana de la ciudad; de estos aparatos, 28 son modelo ETNA y los dos restantes son modelo K2. Además, existe la Red Hidrometeorológica de Bogotá (RHB), la cual consta de 27 estaciones para el monitoreo de las variables hidrometeorológicas y los niveles de los ríos ubicados en el perímetro urbano; las estaciones funcionan 24 horas al día los 365 días del año. Los equipos cuentan con sistemas automáticos de registro, almacenamiento y transmisión de la información a la base del IDIGER, donde es analizada y utilizada para generar alertas a la comunidad (SIRE, 2014). Otro elemento importante es el Sistema de Información Sísmica Básica (Sisbog-Daño). Este es un sistema de cómputo especializado en el análisis de daños tras la ocurrencia

de un terremoto y tiene las siguientes funciones: a) visualización de toda la información básica general de la ciudad; b) evaluación de la respuesta dinámica de los suelos en la superficie; c) evaluación aproximada de los daños en todas las edificaciones de la ciudad, y d) envío de informes a los tomadores de decisiones y a los diferentes medios de comunicación (Bernal, 2009).

2. *Sistema de Alerta Temprana Ambiental (SIATA)*: este sistema tiene como área de influencia la ciudad de Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, y cuenta, además, con el apoyo y los aportes de las Empresas Públicas de Medellín (EPM) e ISAGEN. El principal objetivo del SIATA es alertar de manera oportuna a la comunidad sobre la probabilidad de ocurrencia de un evento hidrometeorológico extremo que pueda generar una situación de emergencia. Para ello monitoriza constantemente las variables atmosféricas, las cuencas y las laderas de la región. La principal característica del SIATA es su enfoque basado en sistemas, es decir, divide un sistema complejo en varios subsistemas con una posterior integración, hecho que se ve reflejado en la diferentes redes que lo conforman, entre las que se encuentran la red hidrometeorológica, conformada por 66 estaciones pluviométricas, 15 de las cuales monitorizan variables

meteorológicas (temperatura, humedad relativa, presión, dirección y velocidad del viento); la red de sensores de nivel, que toma los datos de humedad, temperatura y conductividad eléctrica en el suelo y está conformada por 30 sensores de humedad; la red de cámaras en vivo (*live streaming*), conformada por siete cámaras; tres radares, uno en el Área Metropolitana (en Santa Elena) y dos de la Aerocivil ubicados en Corozal, Sucre, y el otro en Bogotá, y otras redes como la Red Acelerográfica de Medellín (RAM), la Red Acelerográfica del Valle de Aburrá (RAVA) y la Red de Calidad de Aire del Área Metropolitana. Cada una de las estaciones transmite en tiempo real con el propósito de garantizar el flujo constante de información hacia el servidor, para posteriormente difundirla a través de Twitter, de tutoriales en Youtube y de una página web amigable (<http://siata.gov.co/newpage/index.php>) (SIATA, 2014).

3. *Sistema de alertas agroclimáticas tempranas (SAAT) participativas con organizaciones y familias de custodios indígenas y campesinos de la cuenca alta del río Cauca*: este sistema, ubicado en los municipios de Popayán, Puracé, Sotará y Toto en el departamento de Cauca, tiene como objetivo contribuir al fortalecimiento de capacidades para prevenir los riesgos agroclimáticos a partir de la articulación del conocimiento cultural e institucional y de la construcción participativa. En consecuencia, el eje principal de toda su estructura es la participación de la comunidad representada en las organizaciones campesinas. Como resultado, las comunidades locales conocen el clima, investigan sobre los indicadores biológicos y planifican sus sistemas productivos. La evaluación de las predicciones climáticas internacionales se realizan con base en la información de la NOAA. Para la evaluación de las predicciones climáticas nacionales y regionales se recurre a los pronósticos trimestrales del IDEAM. Por último, tiene en cuenta los indicadores biológicos a nivel comunitario, incluido el conocimiento ancestral de las comunidades indígenas y campesinas (Fundación Pro Cuencas Río Las Piedras, 2013).
4. *Sistema de alerta temprana para la cuenca del río Combeima*: la cuenca del río Combeima se encuentra en la parte centro-occidental del departamento del Tolima, sobre el flanco oriental de la cordillera Central de Colombia; su sistema de alerta temprana tiene como objetivo mitigar el impacto de las inundaciones, los flujos de lodos y avalanchas, los deslizamientos, las erupciones volcánicas y los movimientos del terreno causados por sismos; está conformado por una red de monitorización compuesta por estaciones instaladas y operadas por el IDEAM, y por estaciones automáticas operadas por el Comité Regional de Prevención y Atención de Desastres del Tolima (CREPAD). La monitorización de la sismicidad en el

Volcán Nevado del Tolima se basa en la información del Servicio Geológico Colombiano (INGEOMINAS). La información recopilada por las estaciones se transmite a través de una antena repetidora hacia el Centro de Operación del CREPAD, donde posteriormente se analiza la información en tiempo real por medio de la aplicación de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA), y se generan alarmas categorizadas por parámetros, que se visualizan en la aplicación web SAT. Otro componente importante es el sistema de comunicación y alarmas, conformado por una red de comunicaciones constituida por los comités regionales o locales de riesgo, las entidades públicas o privadas y la población de la cuenca del Río Combeima, la cual transmite la información por radio en banda VHF (sistema de voz). (Agencia Suiza para el Desarrollo y COSUDE, 2010).

5. *Sistema acústico de alerta temprana en Bucaramanga*: en el 2012 se instaló en la Comuna 14 de Bucaramanga un bloque de perifoneo que se activa inalámbicamente desde el Comité Municipal de Gestión y Riesgo cuando se registran datos extremos en los instrumentos de medición. La señal sonora tiene un radio aproximado de 2 km a la redonda y permite proteger la vida de 100 mil habitantes de ocho barrios y veredas del corregimiento Tres de Bucaramanga (Jerez, 2014).
6. *Sistema de alerta temprana de la Guajira*: este es coordinado por CORPOGUAJIRA en convenio con la Cruz Roja, y su objetivo son las inundaciones y deslizamientos; presenta una descripción de las condiciones climáticas para el departamento y los municipios a través de boletines diarios que se publican en la página web (<http://www.corpoguajira.gov.co/>), con las variables de temperatura mínima, temperatura máxima, viento, humedad, presión atmosférica y punto de rocío.

A continuación se describen otros sistemas de alerta temprana que hoy se encuentran en la fase de implementación.

1. *Sistema de alerta temprana para el área metropolitana de Barranquilla*. La ciudad de Barranquilla se caracteriza por tener inundaciones que anualmente ocasionan daños materiales y dejan centenares de damnificados y víctimas mortales. En un esfuerzo por combatir este fenómeno, el Grupo de Investigación en Telecomunicaciones y Señales y el Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales (IDHEA) de la Universidad del Norte vienen desarrollando un sistema de alerta temprana desde el 2012. Hasta la fecha solamente se han instalado algunos pluviómetros, sin embargo, se espera que en los próximos años se cuente con sensores de nivel para los arroyos, modelos hidrológicos e hidráulicos y una plataforma en Internet de acceso libre que recibirá y publicará la información enviada por los pluviómetros y sensores. Además, con el propósito de

fortalecer la gestión del riesgo en el departamento de Atlántico, se espera instalar un sensor remoto ambiental basado en un radar polarimétrico Doppler de banda X, con una frecuencia de 9,41 Ghz, potencia pico de 8 KW y un radio de cobertura de 40 km. Durante la implementación y el desarrollo del sistema se involucrará a las comunidades en la creación de un sistema de comunicación (Acosta, 2013).

2. *El Sistema de alerta temprana de Norte de Santander.* La implementación del sistema comenzó en el 2013 con el objetivo de prevenir a los habitantes de las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita sobre la posibilidad de ocurrencia de eventos climáticos extremos. El proyecto busca generar información en tiempo real para analizar y articular las actividades de prevención en 19 municipios del departamento de Norte de Santander, incluida la ciudad capital Cúcuta. El sistema podrá detectar los eventos de inundación con seis horas de anticipación (Vejarano, 2013).

Recomendaciones para el trabajo de los sistemas de alerta temprana en Colombia

La búsqueda de la información presentada se hizo en Google y en bases de datos científicas (ScienceDirect, Scielo, SpringerLink y Scopus), lo que evidenció que en Colombia las estadísticas y la información científica y confiable sobre estos aspectos es escasa y de acceso limitado. Solamente el SIATA y el SAT de Bogotá, Distrito Capital, a través del SIRE, ofrecen una página web con acceso a información hidrometeorológica en tiempo real. Se destaca, igualmente, la página web de alertas y pronósticos del IDEAM, la cual ofrece a los usuarios alertas y pronósticos actualizados. La situación opuesta es la del sistema de alerta temprana para la cuenca del río Combeima, que a juzgar por la extensa presentación contenida en el documento de la **Agencia Suiza para el Desarrollo y COSUDE** (2010), sería de una alta calidad. Sin embargo, dicha presentación se pone en duda al momento de querer verificar la información, pues la página web está desactualizada. Lo mismo ocurre con el SAAT para la cuenca alta del río Cauca, que solo presenta los resultados del proyecto en el documento “Fundación Pro Cuencas Río Las Piedras” (2013). Esta situación se repitió con los demás sistemas de alerta temprana locales, por lo que se hace evidente la necesidad de una mayor divulgación a través de publicaciones científicas y páginas web que reflejen los resultados y el funcionamiento de cada uno de ellos.

Los cuatro elementos que las Naciones Unidas recomiendan (UNISDR, 2006), están presentes solamente en los SIATA y SAT del Distrito Capital. Sin embargo, ninguno de los sistemas ofrece información de libre acceso sobre las alertas anticipadas de inundación, el número de eventos predichos, el tiempo de respuesta de la comunidad ante una emergencia o la confiabilidad de los pronósticos que se emiten. Un

ejemplo es el sistema de alerta temprana de La Guajira, que, aunque emite pronósticos, no da la información sobre cómo lo hace, qué instrumentos de medición emplea, si estos están funcionando correctamente y si los comunicados llegan a la comunidad.

Uno de los aspectos más importantes para poder realizar predicciones confiables son las series de tiempo (Borga, *et al.*, 2011), que, para el caso colombiano, son muy recientes, tienen un alto costo o simplemente no existen en algunos lugares (Domínguez, Angarita & Rivera, 2010). Podemos decir que la efectividad de los sistemas de alerta temprana a nivel nacional se relaciona con la gestión del riesgo a cargo de la UNGRD, por lo que los concejos municipales y departamentales para la gestión del riesgo basan su funcionamiento y sus sistemas de alerta temprana en los pronósticos emitidos por el IDEAM. Infortunadamente, los modelos que utiliza el IDEAM tienen una resolución con la que no es posible anticipar desastres naturales como los vendavales, los tornados o las trombas marinas, debido a que las dimensiones espaciales y la duración de estos eventos son muy pequeñas. Además, hay que tener en cuenta que estos modelos deben usarse con mucha precaución, ya que pueden estar respaldados por datos subestimados, sobrestimados o que representan superficialmente las condiciones de las variables hidrometeorológicas, las cuales muchas veces necesitan de una mayor resolución para realizar una predicción con éxito (Ruíz, 2014).

En los sistemas de alerta de Colombia hace falta más investigación sobre desastres como los tsunamis, que en décadas anteriores han ocasionado grandes pérdidas. En este sentido, Solarte & Agredo (2011) proponen un modelo para la implementación de un sistema de alerta temprana con este énfasis. Es importante resaltar que en Colombia el mayor riesgo lo representan las amenazas sísmicas altas y medias, seguidas por el potencial que tienen las inundaciones y los movimientos en masa (Campos, *et al.*, 2012), por lo que los sistemas en este campo deben estar articulados a sistemas eficientes de comunicación e incluir el manejo del riesgo. La mejor estrategia comprobada a nivel mundial para el manejo de tales amenazas es no tener asentamientos en zonas de alto riesgo; sin embargo, muchas veces esto no es posible, por lo que se debe recurrir a la reubicación y, en otros casos, a realizar obras de infraestructura que protejan o disminuyan el peligro de la comunidad en riesgo (Yamin, *et al.*, 2013). Para este efecto, el sistema de alerta temprana del Distrito Capital ha desarrollado el Sistema Único de Registro de Asentamientos (SURR). Por último, otros elementos que los sistemas de alerta temprana deben incluir son la evaluación y el análisis del riesgo en cada uno de los territorios; una herramienta útil para este propósito es el programa CAPRAS (<http://www.ecapra.org/es/>), que utiliza técnicas probabilistas

para el análisis de las amenazas y las pérdidas causadas por los desastres naturales y ha mostrado excelentes resultados a nivel mundial.

En síntesis, los sistemas de alerta temprana son una herramienta fundamental que debe estar articulada a la predicción de los desastres naturales. Sin embargo, en la mayoría de los casos la aplicación de dichos sistemas presenta deficiencias, por lo que en su desarrollo deben considerarse los aspectos que se mencionan a continuación.

- Nomenclaturas y procedimientos comunes que sirvan de base de la acción y la coordinación entre las diferentes instituciones vinculadas al ámbito de la alerta temprana. La falta de una terminología unificada genera confusión y dificulta la comprensión de los productos de un sistema de alerta temprana en momentos de emergencia.
- La articulación funcional entre los sistemas, es decir, la creación de instancias de trabajo que integren todas las dimensiones de la gestión del riesgo y trabajen con una lógica de sistema, con el fin de disminuir el aislamiento entre unos y otros. En Colombia no existe una comunidad de sistemas de alerta temprana sino muchas y muy variadas entre sí.
- Mejorar la capacidad de difusión de la información e incrementar los esfuerzos y las acciones en las comunidades vulnerables, así como reducir el número de falsas alarmas (**Lenton**, 2013).
- Tener una mayor claridad sobre los beneficios de los sistemas de alerta temprana mediante el uso de indicadores y mediciones económicas que demuestren la necesidad de contar con ellos y su efectividad, con base en la cultura del sistema que propone **Basher** (2006).
- Es necesario reconocer que el funcionamiento de los sistemas de alerta temprana está expuesto a los errores humanos; las deficiencias y dificultades ocurren en la comunicación del riesgo y en la capacidad de respuesta de las comunidades vulnerables (**Basher**, 2006).
- Los sistemas de alerta temprana solo serán eficientes cuando haya libre acceso a la información meteorológica, y para ello es necesario el compromiso político y una mayor capacidad institucional (**UNISDR**, 2009).
- Los sistemas de alerta temprana deben pesar mucho más en el manejo y conservación de los ecosistemas, de manera que contribuyan a que los tomadores de decisiones adopten las medidas necesarias para disminuir los impactos ambientales de los desastres naturales y evitar la pérdida de los servicios de los ecosistemas.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.

Bibliografía

- Acosta, M.** 2013. Sistemas de Alerta Temprana (SAT) para la Reducción del Riesgo de Inundaciones Súbitas y Fenómenos Atmosféricos en el Área Metropolitana de Barranquilla. *Scientia et Technica*. **18** (2): 303-308.
- Agencia Suiza para el Desarrollo & COSUDE.** 2010. Implementación de un sistema de alerta temprana para la cuenca del Río Combeima, Departamento del Tolima – Colombia. Bogotá: COSUDE.
- Basher, R.** 2006. Global early warning systems for natural hazards: Systematic and people-centered. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, **364** (1845): 2167-2182.
- BCC.** 2003. Beijing climate center. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: http://cmdp.ncc.cma.gov.cn/pred/en_cs.php.
- Bernal, G.** 2009. Sistema de estimación inmediata del daño post-terremoto para la ciudad de Bogotá. Tesis de Maestría. Universidad de los Andes.
- Birkmann, J., Chang, D. & Setiadi, N.** 2013. Enhancing early warning in the light of migration and environmental shocks. *Environmental Science & Policy*. **27**: S76-S88.
- Borga, M., Anagnostou, E., Blöschl, G., Creutin, J.** 2011. Flash flood forecasting, warning and risk management: The HYDRATE project. *Environmental Science & Policy*. **14** (7): 834-844.
- Campos, A., Holm, N., Díaz, C., Rubiano, D., Costa, C., Ramírez, F., Dickson, E.** 2012. Resumen ejecutivo. Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. Banco Mundial. Bogotá.
- Cardona, O., Wilches, G., Mansilla, E., Ramírez, F., Marulanda, M.** 2004. Estudio sobre desastres ocurridos en Colombia: estimación de pérdidas y cuantificación de costos. Evaluación de Riesgos Naturales (ERN), Bogotá.
- Chandrasekar, V. & Cifelli, R.** 2012. Concepts and principles of rainfall estimation from radar: Multi-sensor environment and data fusion. *Indian Journal of Radio y Space Physics*. **41**: 389-402.
- Cloke, H.L. & Pappenberger, F.** 2009. Ensemble flood forecasting: A review. *Journal of Hydrology*. **375**: 613-626.
- Collier, C.** 2007. Flash flood forecasting: What are the limits of predictability? *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **133**: 3-23.
- Dartmouth Flood Observatory.** 2010. Space-based Measurement and Modeling of Surface Water. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: <http://floodobservatory.colorado.edu/>.
- Davies, S., Buchanan, S.M. & Lambert, R.** 1991. Early warning in the Sahel and Horn of Africa: The state of the art. A review of the literature. Volume 1 of 3, Research Report No. 20. IDS, Brighton, U.K. Dreeze.
- De Roo, A.P., Wesseling C.G. & Van Doysen, W.P.** 2000. Physically based river basin modeling within a GIS platform: The model LISFLOOD. *Hydrological Processes*. **14**: 1981-1992.

- Domínguez, E., Angarita, H. & Rivera, H.** 2010. Viabilidad para pronósticos hidrológicos de niveles diarios, semanales y decadales en Colombia. *Ingeniería e Investigación*. **30** (2): 178-187.
- EDO.** 2013. Observatorio Europeo para la Sequía. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: <http://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1000>.
- EFAS.** 2014. European Flood Awareness System. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: <http://www.efas.eu/>.
- FEWS.** 2010. Famine Early Warning Systems Network. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: <http://www.fews.net/Pages/default.aspx?l=es>.
- Fundación Pro Cuencas del Río Las Piedras.** 2013. Sistema de alertas agroclimáticas tempranas (SAAT) participativas con organizaciones y familias de custodios indígenas y campesinos de la cuenca alta del río Cauca. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- Georgakakos, K. & Hudlow, M.** 1984. Quantitative precipitation forecast techniques for use in hydrologic forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*. **65** (11): 1186-1208.
- Ghesquiere, F. & Mahul O.** 2010. Financial Protection of the State against Natural Disasters: A Primer. Washington, D.C. World Bank Policy Research Working Papers. Paper 5429.
- Ghulam, A., Qin, Q. & Zhan, Z.** 2007. Designing of the perpendicular drought index. *Environmental Geology*. **52** (6): 1045-1052.
- Gibbs, W.J. & Maher, J.V.** 1967. Rainfall deciles as drought indicators. Commonwealth of Australia, Melbourne. *Bureau of Meteorology Bulletin*. **48**: 33-84.
- GFAS.** 2006. Global Flood Alert System. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: <http://gfas.internationalfloodnetwork.org/gfas-web/>.
- Göppert, H., Ihringer, J., Plate, E.J., Morgenschweis, G.** 1998. Flood forecast model for improved reservoir management in the Lenne River catchment, Germany. *Hydrological Sciences Journal*. **43**: 215-242.
- Grasso, V. F., Beck, J.L., & Manfredi, G.** 2007. Automated decision procedure for earthquake early warning. *Engineering Structures*. **29** (12): 3455-3463.
- Hall, P.** 2007. Early Warning Systems: Reframing the discussion. *The Australian Journal of Emergency Management*. **22** (2): 32-36.
- Hansen, J.W., Mason, S.J., Sun, L., Tall, A.** 2011. Review of seasonal climate forecasting for agriculture in Sub-Saharan Africa. *Experimental Agriculture*. **47**: 205-240.
- IDEAM.** 2008. Protocolo para la emisión de los pronósticos hidrológicos. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R., Casagli, N.** 2012. Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology*. **147**: 124-136.
- Jerez, N.** 2014. Sistema acústico de alerta temprana instalado en la comuna 14 monitorea y previene sobre riesgos naturales. Oficina asesora de prensa. Alcaldía de Bucaramanga.
- Krzysztofowicz, R.** 2001. The case for probabilistic forecasting in hydrology. *Journal of Hydrology*. **249**: 2-9.
- Kundzewicz, Z. W., Budhagooncharoen, S., Bronstert, A., Hoff, H., Lettenmaier, D., Menzel, L., Schulze, R.** 2002. Coping with variability and change: Floods and droughts. *Natural Resources Forum*. **26** (4): 263-274.
- Liu, Z., & Todini, E.** 2002. Towards a comprehensive physically-based rainfall-runoff model. *Hydrology and Earth System Sciences*. **5**: 859-881.
- Lenton, T. M.** 2011. Early warning of climate tipping points. *Nature Climate Change*. **1** (4): 201-209.
- Lenton, T. M.** 2013. What early warning systems are there for environmental shocks? *Environmental Science y Policy*. **27**: S60-S75.
- Maskrey, A.** 1997. Early Warning Programme Report on National and Local Capabilities for Early Warning. IDNDR Secretariat, Geneva.
- Mckee, T.B., Doeskin, N.J. & Kleist, J.** 1995. Drought monitoring with multiple time scales. Proc. Ninth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Boston. Pp. 233-236.
- Medina-Cetina, Z. & Nadim, F.** 2008. Stochastic design of an early warning system. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. **2**: 223-236.
- Meza, F.J., Hansen, J.W. & Osgood, D.** 2008. Economic value of seasonal climate forecasts for agriculture: Review of ex-ante assessments and recommendations for future research. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. **47**: 1269-1286.
- Mishra, A. K. & Singh, V.P.** 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*. **391** (1-2): 202-216.
- Mishra, A.K. & Singh, V.P.** 2011. Drought modeling – A review. *Journal of Hydrology*. **403**: (1-2): 157-175.
- Mogil, H. M., Monro, J.C. & Groper, H.S.** 1978. NWS's flash flood warning and disaster preparedness programs. *Bulletin of the American Meteorological Society*. **59**: 690-699.
- Moore, R. J., Bell, V.A. & Jones, D.A.** 2005. Forecasting for flood warning. *Comptes Rendus Geoscience*. **337** (1-2): 203-217.
- NOAA.** 1970. National Oceanic and Atmospheric Administration. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: <http://www.noaa.gov/>.
- Norbiato, D. & Dinale, R.** 2009. Flash flood warning in ungauged basins by use of the flash flood guidance and model-based runoff thresholds. *Meteorological Applications*. **16**: 65-75.
- ONS.** 2012. Observatorio Nacional de la Sequía. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/>.

- Observatorio Chileno Agroclimático.** 2013. Monitoreo de Sequía. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: <http://www.climatedatalibrary.cl/UNEA/maproom/>
- Ocharan, J.** 2007. Sistemas de Alerta Temprana. Fotografía actual y retos futuros. Cuadernos internacionales de tecnología para el desarrollo humano. **6**: 39-43.
- OMM.** 2013. Organización Meteorológica Mundial. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: http://www.wmo.int/pages/index_es.html.
- Palmer, W.C.** 1965. Meteorological drought. Research Paper, vol. 45. U.S. Washington, D.C: Department of Commerce Weather Bureau.
- Palmer, W.C.** 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The crop moisture index. *Weatherwise*. **21** (4): 156-161.
- Plate, E. J.** 2007. Early warning and flood forecasting for large rivers with the lower Mekong as example. *Journal of Hydro-environment Research*. **1** (2): 80-94.
- Ren, M., Wang, B., Liang, Q. & Fu, G.** 2010. Classified real-time flood forecasting by coupling fuzzy clustering and neural network. *International Journal of Sediment Research*. **25** (2): 134-148.
- Ruíz, F.** 2014. ¿Cómo interpretar los modelos de pronóstico del estado del tiempo? Subdirección de Meteorología. IDEAM.
- SATCA.** 2007. Sistema de Alerta Temprana para Centroamérica. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: <http://www.satcaweb.org/alertatemprana/inicio/satcaweb.aspx>.
- Shafer, B.A. & Dezman, L.E.** 1982. Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. Proc. 50th Annual Western Snow Conference, Colorado State University, Fort Collins, USA.
- SIATA.** 2014. Sistema de Alerta Temprana Ambiental. Fecha de consulta: 20 de julio. Disponible en: <http://www.siata.gov.co/newpage/index.php>.
- SIRE.** 2014. Sistema Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: <http://www.sire.gov.co/>.
- Solarte, P. & Agredo, G.** 2011. Design of an early warning system to detect tsunamigenic events associated with the extreme tide level changes in the Colombian pacific coast. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. **1** (17): 40-47.
- Svoboda, M., LeComte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Ángel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., Stephens, S.** 2002. The drought monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society*. **83** (8): 1181-1190.
- Trambauer, P., Maskey, S., Winsemius, H., Werner, M., Uhlenbrook, S.** 2013. A review of continental scale hydrological models and their suitability for drought forecasting in (sub-Saharan) Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*.
- UNEP & GEAS.** 2012. Early Warning Systems: A State of the Art Analysis and Future Directions. *Environmental Development*. **4**: 136-171.
- UNISDR.** 2009. Terminología sobre reducción del riesgo de desastres. Naciones Unidas. Ginebra, Suiza. 38 pp.
- UNGRD.** 2012. Líneas estratégicas y avances en priorización de zonas de intervención. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. Bogotá.
- UNGRD.** 2014. Estructura del Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastre. Fecha de consulta: 22 de julio de 2014. Disponible en: <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Estructura.aspx>.
- UNISDR.** 2013. Milestones in the History of Disaster Risk Reduction. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: <http://www.unisdr.org/who-we-are/history#idndr>
- UNISDR.** 2006. Global Survey of Early Warning Systems. United Nations Report. Ginebra, Suiza. 46 pp.
- UNISDR.** 2009. Terminology on Disaster Risk Reduction. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: <http://www.unisdr.org>.
- UNISDR.** 2009. Living with risk: A global review of disaster reduction initiatives. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: <http://www.unisdr.org/we/inform/publications/657>.
- U.S. Drought Monitor.** 2000. United States Drought Monitor. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: <http://droughtmonitor.unl.edu/>
- Vejarano, A.** 2013. El proyecto de sistema de alerta temprana en las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita, Norte de Santander. Fecha de consulta: 20 de julio de 2014. Disponible en: <http://www.institut-gouvernance.org/es/experiencia/fiche-experiencia-38.html>.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., Gimeno, L., Eklundh, L., Giuliani, G., Weston, D., Pegram, G.G.** 2012. Challenges for drought mitigation in Africa: The potential use of geospatial data and drought information systems. *Applied Geography*. **34**: 471-486.
- Weghorst, K.** 1996. The reclamation drought index: Guidelines and practical applications. Denver, Colorado: Bureau of Reclamation.
- Werner, M.G., Schellekens, J., & Kwadijk, J.C.** 2005. Flood Early Warning Systems for Hydrological (sub-) Catchments. Wiley, UK: Encyclopedia of Hydrological Sciences. 3456 pp.
- Wilhite, D. A. & Svoboda, M.D.** 2000. Drought Early Warning Systems in the Context of Drought Preparedness and Mitigation. En: Donald A. Wilhite, M.V.K. Sivakumar y Deborah A. Wood (Editores). *Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management*. Proceedings of an Expert Group Meeting held in Lisbon, Portugal, 5-7 September 2000 (pp. 1-21). Ginebra, Suiza: World Meteorological Organization.
- Yamin, L. E., Ghesquiere, F. & Ordaz, M. G.** 2013. Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre. El caso de Bogotá, Colombia. Bogotá. Banco Mundial y Universidad de los Andes.

Enfoque y alcance

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN) es una publicación periódica trimestral, multidisciplinaria, que tiene como objetivo dar a conocer artículos inéditos de investigación de alta calidad.

La Revista publica artículos científicos en las áreas de ciencias físicas (física, fisico-química, materiales y matemáticas); ciencias naturales (biología, botánica, zoología, ecología, bioquímica, química); ciencias de la tierra (geología, medio ambiente); ciencias humanas (filosofía, psicología, antropología, sociología); ciencias biomédicas y ciencias químicas, está reseñada en varios índices nacionales e internacionales tales como Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (International Center for Scientific Research), Current Mathematical Publications, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO, Online Computer Library Center – OCLC, Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record, RLG. Nacionalmente se encuentra reseñada en la base de datos Publindex de Colciencias.

La página web de la Revista (www.raccefyn.co) permite el acceso libre y abierto a los artículos con el fin de contribuir a la visibilidad, al acceso y a la difusión de la producción científica.

El primer número se publicó en diciembre de 1936, año de creación oficial de la Academia, bajo la dirección del doctor Jorge Álvarez Lleras y hasta el momento se han editado 37 volúmenes.

Criterios para publicar

Indicaciones a los autores

Los autores deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Los trabajos presentados deberán ser originales en inglés o español y de alto nivel sobre aspectos relacionadas con las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos los trabajos aceptados quedan como propiedad permanente de la Academia Colombiana Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de manera que la misma podrá publicarlos en formato físico y electrónico, incluyendo internet (Ver transferencia de derechos de autor).
2. El autor de la correspondencia debe aceptar mediante comunicación escrita firmada que el manuscrito es un trabajo original y no ha sido publicado por ningún medio, ni está siendo evaluado por otra publicación impresa o

electrónica y que ha sido aceptado por todos los autores para su publicación en la Revista y que los derechos de autor no han sido cedidos a nadie con anterioridad (Ver formato declaración originalidad, conflicto de intereses y sesión de derechos de autor en la página web de la Revista: <http://www.raccefyn.co>).

3. La participación de los autores en el trabajo debe ser suficiente como para aceptar públicamente la responsabilidad de los aportes de cada uno. El orden de los autores en la publicación deberá ser una decisión compartida de los coautores, que deben ser capaces de explicar el orden en el que aparecen sus nombres.
4. De acuerdo con el ICMJE, todos los colaboradores que no cumplen los criterios de autoría o hayan realizado contribuciones menores deben aparecer en la sección de agradecimientos, pero no ser citados como autores. Las ayudas económicas y materiales deben aparecer en los agradecimientos.
5. La terminología física, química y bioquímica, debe seguir las normas del Comité de Nomenclatura de la Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada (IUPAC). Deben usarse las abreviaturas internacionales convencionales y las unidades del Sistema Internacional (SI). Los nombres científicos se deben escribir con la forma recomendada por “International Code of Botanical Nomenclature”

Envío y presentación del manuscrito

Los artículos deben enviarse a través de <http://www.raccefyn.co>

El manuscrito, incluyendo además de la página del título, el resúmenes, las referencias, las tablas y sus títulos, las leyendas de figuras, deben estar escritos en procesador de palabras Word a doble espacio, usando la fuente Arial de tamaño 12, sin justificar el texto. No olvide usar la numeración en todo el manuscrito.

Los manuscritos deben incluir la siguiente información:

1. Una página en Word con los nombres y apellidos (nombre completo y apellido, si desea poner el segundo apellido, debe ir separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grado académico), filiaciones y correos electrónicos.
2. Título completo del manuscrito en español e inglés.
3. Título corto

4. Resumen en español y en inglés que no supere 250 palabras.
5. Palabras clave en español y en inglés que no superen en número a seis.
6. Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico y dirección electrónica.
7. Direcciones electrónicas de todos los coautores.
8. Texto, referencias y tablas en un mismo archivo junto con las leyendas de las figuras.
9. Figuras en formato jpg o tiff.

Estructura del manuscrito

Introducción: se debe mostrar el marco teórico en el cual se inscribe el tema de la investigación, propósito del artículo y justificación del estudio, indicando además la delimitación de la pregunta problema.

Materiales y métodos: se describirán los sujetos de observación o experimentación, aparatos o dispositivos y la metodología empleada en el estudio.

Análisis estadístico: señalar los métodos estadísticos utilizados y cómo se han analizado los datos.

Resultados: deben presentarse en secuencia lógica, con las tablas y figuras acompañadas de una explicación y análisis de las mismas.

Discusión: debe hacerse énfasis en los aspectos nuevos e importantes del estudio, contrastando los resultados con la información pertinente disponible en la literatura actualizada y relacionar las conclusiones con los objetivos propuestos. Se deben incluir las implicaciones y limitaciones de los hallazgos y comparar las observaciones relevantes con las de otros estudios.

Los resultados y la discusión pueden presentarse también en forma combinada. En cuyo caso la sección se denominará Resultados y Discusión.

Conclusiones: Resumen de la investigación y su estado actual. Aquí se pueden plantear objetivos futuros a seguir en la línea de investigación.

Citación: todas las referencias bibliográficas se insertarán en el texto y deberán llevar siempre el apellido del autor o autores y el año de publicación entre paréntesis. Si el apellido del autor o autores forma parte de la estructura formal de la frase, sólo se pondrá entre paréntesis la fecha; por ejemplo: Pérez y Ribas (1996). Si son tres, cuatro o cinco autores se pondrán los apellidos de todos los autores la primera vez que se referencian en el texto, y después

sólo se pondrá el apellido del primer autor seguido de *et al.* Si son seis o más autores sólo se pondrá el apellido del primero añadiendo “*et al.*”, desde la primera vez que se referencian. Si existieran varias referencias de un autor en un mismo año se consignarán con las letras a, b, c, etc., después del año.

Cita directa o textual

Si la cita textual tiene menos de 40 palabras se presenta entre comillas dentro del texto y al final se incluye entre paréntesis el apellido, año de publicación y la página de donde se extrajo.

Ejemplo:

El objetivo de los estudios explicativos es “responder a las causas de los eventos físicos o sociales” (Hernández, Fernández y Baptista, 1991, p.66).

Si la cita comprende más de 40 palabras se ubica en un bloque independiente del texto, sin comillas y dejando una sangría al lado izquierdo.

Ejemplo:

Las revistas científicas son sistemas contextuales de comunicación, de difusión académico investigativa y fortalecimiento de competencias científicas (escritura, investigación, evaluación, edición), en los cuales la comunidad académica comparte creencias, orientaciones y el compromiso de contribuir, utilizar y hacer avanzar el conocimiento de forma colaborativa y cooperativa. (Mesa & Sánchez, 2010, p.4).

Parfraseo o resumen

Se debe mencionar al autor y la fecha.

Ejemplo:

Según Sánchez (1991), el cemento es uno de los materiales más populares e indispensables en la construcción actual.

Existen dos tipos de aprendizaje: la recepción pasiva de conocimientos y el redescubrimiento de la realidad (Piaget, 1980).

Si se cita un documento escrito entre tres y cinco autores, deben escribirse los apellidos de todos la primera vez que se citen y después incluir el apellido del primer autor seguido de “*et al.*” (sin cursiva y con punto después del “*al.*”).

Si se cita un documento escrito por seis o más autores, se presenta la primera cita con el apellido del primer autor seguido de “*et al.*”. En la lista de referencias escriba las iniciales y apellidos de los primeros seis autores y para los restantes utilice “*et al.*”

Lista de referencia

Es el listado alfabético (según el primer apellido de los autores citados en negrilla) de las fuentes consultadas y citadas

durante la redacción de un trabajo. La lista de referencias es obligatoria. Se deben citar de la siguiente manera:

Libros

Autor. Año. Título completo. Edición. Editorial, lugar de publicación, página

Ejemplo:

Ramírez J. E., S.J. 1975. Historia de los terremotos en Colombia. Segunda edición. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, 250 pp.

Revista seriada

Autor, A.A., B.B. Año. Título del artículo. Título de la revista publicación seriada, volumen (número entre paréntesis), páginas del artículo.

Ejemplo:

Ríos, L., Riva, F., Canaquire, L. 2008. Reporte situacional del tráfico ilegal de fauna silvestre en la Rev. Acad. Colomb. Cienc. 38(147):218-22.

Artículo de revista electrónica

Ejemplo:

Sarabia A., Cifuentes H., Dimate M. 2006. Estudio macrosísmico del sismo ocurrido el 12 de julio de 1785. Ingeominas. Bogotá. Fecha de consulta. Disponible en: <http://aplicaciones1.ingeominas.gov.co/sicat/html/Metadato.aspx?CID=239714>

Artículo de periódico impreso:

Ejemplo:

Duque, J. G. 7 de junio de 2012. Antioquia reasume competencia para decidir futuro del túnel. El Colombiano, pp. 10.

Tesis

Ejemplo:

Gómez Capera A.A. 1998. *Atenuación de la intensidad sísmica para el territorio colombiano*. Tesis de grado en Física, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Congresos y simposios

Ejemplo:

Sánchez Upegui, A. A. Octubre 2010. *Aplicación de la lingüística textual en los criterios de evaluación de artículos académicos e investigativos*. En Simposio Nacional de Pedagogía y Currículo. Red Colombiana de Pedagogía, Medellín

Trabajos inéditos o publicaciones informales

Si el trabajo está disponible en un sitio web institucional o personal agregue el nombre de la institución y URL.

Ejemplo:

Jaramillo, G. 2012. El patrimonio arquitectónico. Manuscrito inédito. Departamento de Artes, Universidad Latinoamericana. Disponible en: <http://...>

Materiales legales

En cuanto a las citas en el texto se proporcionan los mismos datos de cualquier referencia, autor, año y en lo posible número de página, si no hay un autor identificado, se anotan las primeras palabras del título y la fecha.

Ejemplo:

Colombia. Ministerio de Educación Nacional. Ley 23 de 1982 sobre derechos de autor.

Tablas y figuras

Las tablas y cuadros se denominan tablas y llevan numeración arábiga de acuerdo con el orden de aparición. El título correspondiente se coloca en la parte superior de la tabla y las notas en la inferior. Los símbolos para unidades deben aparecer en el encabezamiento de las columnas. Si es necesario exponer alguna información, utilice las letras minúsculas del alfabeto según orden de aparición en la respectiva tabla: a, b, c, d, e, etc.

Las fotografías, gráficos, dibujos y esquemas se denominan figuras, se enumeran según el orden de aparición y sus leyendas se escriben en hoja separada. Si se trata de micro fotografías debe indicarse el aumento utilizado. Las personas, o sus nombres, no deben ser identificables en las fotografías de lo contrario se requiere permiso escrito para su publicación.

Cuando las tablas y figuras hayan sido tomadas de revistas o libros, sean impresos o electrónicos, se debe especificar la fuente y adjuntar autorización de la respectiva publicación para su reproducción.

Agradecimientos

Podrán ser expresados a personas o entidades que hayan ayudado a la realización del trabajo. Se mencionarán las personas y el tipo de ayuda aportada, así como las entidades, instituciones o fundaciones que hayan financiado o suministrado materiales. En caso de proyectos de investigación financiados será suficiente con mencionar el código de registro y la entidad, institución o fundación que lo apoya económicamente.

Proceso de revisión por pares

Se recibirán solo los artículos que cumplan con todos los requisitos que se mencionan en las indicaciones a los autores. Los artículos serán evaluados en primera instancia por el Editor y el Comité Editorial de la Revista.

Cada manuscrito será enviado a dos especialistas en el tema, que evaluarán y enviarán sus recomendaciones. Este proceso de revisión tendrá una duración de 20 días.

El editor informará a cada uno de los autores el avance de su trabajo en el proceso de evaluación.

Los pares académicos adoptan tres opciones: a) aceptación sin modificaciones; b) aceptación con correcciones; c) no aceptación. En caso de desacuerdo de los pares, el original será enviado a una tercera evaluación.

En cualquiera de las opciones, el autor será informado y deberá realizar las modificaciones correspondientes en el manuscrito y enviarlo en las cuatro semanas siguientes. Además deberá enviar un documento en el que responda a todas las observaciones hechas por los evaluadores.

Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, el artículo no será considerado para publicación en el siguiente número de la revista. En caso de sobrepasar dicho plazo, se entenderá que los autores retiran el trabajo en su forma actual y, si se remite de nuevo, el Comité Editorial de la Revista podrá considerar que se trata de un nuevo trabajo.

Los trabajos aceptados son propiedad de la Revista ACCEFYN y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

Corrección de estilo y publicación del manuscrito

Aceptados los artículos estos se enviarán a corrección ortotipográfica. Se usará la herramienta de control de cambios de Word, en la cual quedará registro de cada una de las sugerencias realizadas y los comentarios o dudas para que el autor o autores aprueben y contesten.

La versión corregida deberá ser enviada nuevamente para su aprobación definitiva en un plazo mínimo de 48 horas. El manuscrito deberá ir con una carta al editor, informando cuales correcciones fueron procesadas. El editor le informará al autor la fecha y el número del volumen en que será publicado.

Rectificaciones y correcciones de errores

Las rectificaciones sobre la información suministrada por parte de los autores, se harán en el número inmediatamente posterior al anuncio de las mismas y serán responsabilidad de los mismos autores. La Revista se encargará de publicar una nota aclaratoria a manera de erratas. En el caso que sean necesarias mejoras y corrección de errores ortotipográficos, de manejo visual de la información o imprecisiones involuntarias, el (los) autor(es) podrán comunicarse al correo de la Revista para que puedan realizarse en las versiones electrónicas de la Revista.

Falsificaciones de artículos

Si en el proceso editorial se encuentra falsificación, omisión de datos, duplicidad del artículo o plagio, se devolverá el original al autor con la debida notificación a su institución patrocinadora, centro de investigación o universidad.

Conflicto de intereses

Si los autores o coautores, editores o revisores (evaluadores) tienen algún conflicto de interés que pueda de alguna manera influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación, éste debe ser declarado.

Los conflictos de interés más evidentes son los llamados conflictos financieros, resultado de relaciones entre empleador-empleado, financiaciones y patentes, así como también honorarios, consultorías, investigación pagada por compañías que dependen de los resultados investigativos, etc.

También existen los conflictos personales resultado de amistades o animadversiones, competencias académicas y pasiones en el campo intelectual o moral (por ej. parientes en una compañía que se beneficiaría de los resultados que se van a publicar, el uso de los resultados publicados para promoción inmediata basada en el artículo publicado, creencias religiosas que estén en conflicto directo con la investigación que se va a publicar, etc.

Transferencia de derechos de autor

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También pueden publicarse el título del trabajo, resumen, tablas y figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, también dando el crédito a la revista de ACCEFYN.

b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.

c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y coautores del trabajo y/o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.

d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas a revisión junto con los manuscritos.

e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN).

To our readers and authors

Criteria for publication

Information for Authors

The authors must adhere to the following requirements:

1. The works submitted must be original, in English or Spanish, and of high quality in an area related to the Exact, Physical or Natural Sciences. All works accepted will remain permanent property of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences so that such work can be published in hard copy or in electronic format, including web posting. (See transference of authors' rights).
2. The author submitting the work must confirm via written and signed communication that the manuscript represents original work and that it has not been published in any form, and that it is not under review by any other publisher for publication in hard copy or in electronic format and that publication in the Revista has been agreed by all authors, and the the authors' rights have not been previously granted to a third party. (See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
3. The participation of the authors in the submitted work must be materially sufficient so as to share in the public responsibility of its contents. The order of appearance of the each of the authors of the publication must reflect a decision shared by all the co-authors, each of whom must be prepared to justify the order in which his name appears.
4. In accordance with the ICMJE (www.raccefyn.co), all collaborators who do not comply with the criteria for authorship, or who have realized minor contributions must be included in the Acknowledgement Section, and must not be cited as authors. The Acknowledgement Section must also include reference to any financial and economic assistance.
5. The terminology must adhere to the International Code for Botanical Nomenclature. The physical, chemical or biochemical terminology norms of the Nomenclature Committee of International Union for Pure and Applied Chemistry (IUPAC). The abbreviations must follow the international conventions as well as the units must conform to the International System (SI). The scientific names must be written in the format recommended by the "International Code of Botanical Nomenclature".

Submission and Presentation of manuscript

The manuscripts should be submitted using the website of the Academy: <http://www.accefyn.co>

The manuscript, including the title page, the abstract, tables with titles, graphics with descriptive legends, must be prepared in Microsoft WORD processor in double space. Use Areal font size 12 without justification. Do not forget to number the entire manuscript.

The manuscripts must contain the following information:

1. A page in Microsoft Word with the names and surnames (complete name , first and second family name separated by a hyphen) of all the authors (without positions , and without academic degrees), academic affiliations and email addresses.
2. Complete manuscript title in Spanish and English.
3. Short Title
4. Abstract in Spanish and English using 250 or less words
5. Key words in Spanish and English not containing more than 6 words.
6. Name of the author responsible for all correspondence, including his complete address, telephone number and email address.
7. Electronic addresses of all the co-authors.
8. Text, bibliographical references and tables in the same file together with the legends for all the figures.
9. Figures must be in jpg or tiff format.

Manuscript Structure

Introduction: there must be a clear description of the theoretical framework of the theme of the investigation, purpose of the article and justification of the study, indicating the limitation of the problem question.

Materials and methods: a description of the object of observation or experimentation, instruments or devices and the methodology employed in the study.

Statistical analysis: indicate the statistical methods used and the data analysis employed.

Results: these must be presented in a logical sequence, with the accompanying tables and figures with their respective explanations and analysis.

Discussion: emphasis must be given to those aspects of the study which are new and important, contrasting the results with the relevant information available in the recent literature and relate the conclusions with the proposed objectives. Mention must be made of the implications and limitations of the results found and a comparison of the relevant observations with that of other studies.

The results and the discussion may also be presented in a combined form.

Conclusion: an up to date survey of the investigation. Mention can be made here of future objectives of the same line of investigation.

Bibliography: these citations must be verifiable, enumerated and referred to in the body of the article enclosing each number with square brackets. When a citation is made, indicate in the text the author, the year and page in the following way:

Direct or textual quotation

If the textual citation has under 40 words it should be given in between quotation marks within the text and at the end it should include in parenthesis the surname, the year of publication and the page from which it was extracted.

Example:

The objective of the explicative studies is “ to respond to the causes of the physical or social events” (Hernández, Fernández and Baptista, 1991, p.66)

If the citation goes over 40 or more words it must be placed in a separate block independent of the text, without quotation marks allowing for bleeding on the left margin.

Example:

The scientific journals are contextual system of communication, of academic or investigative diffusion and strengthening of scientific competence (writing, investigation, evaluation, editing), in which the academic community shares beliefs, orientation and the commitment to contribute, use and advance the formal knowledge of collaboration and cooperation. (Mesa & Sánchez, 2010, p.4)

Paraphrase or summary

Mention must be made of the author and the date.

Example:

According to Sánchez (1991), cement is one of the most popular and indispensable materials in today’s construction.

There exist two types of learning: the passive reception of knowledge and the rediscovery of reality (Piaget, 1980)

If a cited document has between three or five authors, the surnames of all the authors must be given the first time they

are cited and afterwards include the surname of the first author followed by “ et al.” (not in italics and with a period after the “al.”).

If a cited document has six or more authors, place the first citation with the surname of the first author followed by “et al.” In the bibliographical list write the initials and surnames of the first six authors and for the rest use “ et al.”

Bibliographical list

It is the list, in alphabetical order (according to the first surname of the cited authors, which should be in bold) of the sources consulted and cited in the text of the article. It is mandatory to include the bibliographical list. It should be cited in the following way:

Books

Author. Year of publication. Title of the book. Edition. Publisher, place of publication, page(s).

Example:

Ramírez J. E., S.J. 1975. Historia de los terremotos en Colombia. Segunda edición. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, 250 pp.

Article from periodical journal

Author, A.A., Author, B.B. Year. Title of the article. Title of the journal, volume (number in parenthesis), pages.

Example:

Ríos, L., Riva, F., Canaquire, L. 2008. Reporte situacional del tráfico ilegal de fauna silvestre en la en la región nororiental del Perú . Rev. Acad. Colomb. Cienc. 38(147):218-22.

On line periodical article

Example:

Sarabia A., Cifuentes H., Dimate M. 2006. Estudio macrosísmico del sismo ocurrido el 12 de julio de 1785. Ingeominas. Bogotá. Date of query: (day, month, year). Available at: <http://aplicaciones1.ingeominas.gov.co/sicat/html/Metadato.aspx?CID=239714>

Newspaper article

Example:

Duque, J. G. 7 de junio de 2012. Antioquia reasume competencia para decidir futuro del túnel. El Colombiano, pp. 10.

Thesis

Example:

Gómez Capera A.A. 1998. *Atenuación de la intensidad sísmica para el territorio colombiano*. Tesis de grado en Física, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Congresses and symposia

Example:

Sánchez Upegui, A. A. Octubre 2010. *Aplicación de la lingüística textual en los criterios de evaluación de artículos académicos e investigativos*. In: Simposio Nacional de Pedagogía y Currículo. Red Colombiana de Pedagogía, Medellín

Unpublished manuscript or informal publications

If the work is available at an institutional or personal web site, please add the name and URL of the institution.

Example:

Jaramillo, G. 2012. El patrimonio arquitectónico. Manuscrito inédito. Departamento de Artes, Universidad Latinoamericana. Recuperado de <http://...>

Legal documents

Regarding the citations in the text, the same data included in all other references should be provided (author, year, and if available, the same page number). If there is no identifiable author, the first words of the title should be noted, as well as the date.

Example:

Colombia. Ministerio de Educación Nacional. Ley 23 de 1982 sobre derechos de autor.

Tables and graphics

The tables and frames are called tables and carry an arabic numeration in accordance with the order in which they appear. The corresponding title is placed on the upper part of the table and notes are placed in the lower part. Symbols for unit measures must appear in the column headings.

If it is necessary to display some information, use lower case letters from the alphabet according to the appearance of the table: a, b, c, d, e, etc.

Photographs, graphics, pictures or sketches are named figures, are enumerated in order of appearance, and their legends must be written in a separate page. With respect to microfiches, indicate the size of the augmentation used. People or their names should not be identifiable in photographs, unless written permission for their publication has been obtained.

When tables and figures have been taken from magazines or books, published in hard copy or electronically, specify the source and include the authorization for its reproduction from the respective publication.

Acknowledgments

These can be expressed to persons or entities who have aided in the realization of the work. Mention is made

of persons and their type of aid provided, as well as to entities or institutions which have provided financial and material assistance. In case of investigative projects with financial support it suffices to mention the registry code and the entity, institution or foundation which provided the economic support.

The peer-review process

Only articles which comply with the requirements mentioned in the information for authors will be accepted. The articles will be given their first evaluation by the Editor and the Editorial Committee of the Revista.

Each manuscript will be sent to two experts on the topic who will provide recommendations after review and evaluation. This process of revision will have a duration of 30 days.

The editor will inform each of the authors of the status of the process of evaluation of their work.

The academic peers will adopt one of three options: a) acceptance without modifications; b) acceptance with corrections; c) Deny acceptance. In case of disagreement among the peers, the original manuscript will be sent out for a third evaluation.

Under any of the three options, the author will be informed and must follow the corresponding modifications of the manuscript and return it within the following four weeks. In addition, the author(s) must provide a written document with answers to all the peers observations.

If the author takes more than 30 days to respond to the suggestions from the reviewers, the article will not be considered for publication in the next issue of the Revista. In case the response from the author takes longer than the allocated time, it is understood that the authors will retrieve the work in its present form and, if a new submission is made, the Editorial Committee of the Revista may treat it as a new work.

The works accepted for publication become property of the Revista ACCEFYN and may be reproduced in their entirety or partially by the Revista.

The Revista does not assume responsibility for the scientific content, nor for the legal implications of any of the published articles.

Publication of the manuscript

Once the article has been accepted, it will undergo a style and format revision which will bring it to its definitive version. The authors will receive the galley proofs in PDF format for the correction of errors before its printing. The corrected version must be returned for final approval within a period

of 48 hours. The manuscript must be accompanied with a letter to the editor informing him of the corrections that were carried out. The editor will inform the author of the date and volume number in which the publication will appear.

Conflicts of interest

If the authors or co-authors, the editors or reviewers (evaluators) have some conflict of interest which may in any way influence the transparency and objectivity of the peer review process and publication, it must be so declared.

The most obvious conflicts of interest are those referred to as financial conflicts, which result between, employer-employee, investments and patents, as well as honoraria, consulting, paid investigation by companies which depend on the investigative results, etc.

There also exist personal conflicts arising from friendships, animosity, academic competencies and passions in the moral or intellectual field (for example relatives in a company which will benefit from the results to be published, the use of the results for immediate promotion based on the published article, religious beliefs which are in direct conflict with the investigation that will be published, etc).

Transfer of author rights

In case the article is approved for publication, the main author in representation of himself and his co-authors or the main author and his co-authors must cede the author rights

of the corresponding article to the Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), except in the following cases:

a) The authors and co-authors will retain the right to revise, adapt, prepare derived works, oral presentations and distribution to some colleagues of reprints of their own published work, as long as the corresponding credit is given to the Revista of ACCEFYN. It is also permissible to publish the title of the work, summary, tables and figures of the work in the corresponding web sites of the authors or their employers, also giving credit to the Revista of ACCEFYN.

b) If the work has been realized under contract, the author's employer has the right to revise, adapt, prepare derivative works, reproduce or distribute in hard copy the published work, in a secure manner and for the exclusive use of his employees.

c) If the Revista of ACCEFYN were approached for permission by a third party for using, printing or publishing specifically articles already published, the Revista of ACCEFYN must obtain the express permission of the author and co-authors of the work and/or of the employer with the exception of use in classrooms, libraries, or reprinted in a collective work.

d) The Revista of ACCEFYN reserves the possible use in its front cover of figures submitted with the manuscripts.

e) No other right, other than the author's right, can be claimed by the Revista of ACCEFYN.

